

RD-ICUAP

ISSN 2448-5829



Año 10 No. 29 Mayo-Agosto 2024
Reserva No. 04-2021-092723014900-203
<http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap>
Difusión vía red de cómputo
RD-ICUAP Es una publicación del Instituto de Ciencias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

latindex



RD-ICUAP

Cintillo Legal

RD-ICUAP Año 10, No. 29 mayo-agosto de 2024, es una difusión periódica cuatrimestral editada por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con domicilio en 4 sur No. 104, Col. Centro, C.P. 72000, difundida a través del Instituto de Ciencias BUAP, con domicilio en el edificio IC8, Ciudad Universitaria, Col. San Manuel, Puebla, Pue., C.P. 72570, Tel. 01-22-222 95500 ext. 4170, www.rd.buap.mx, editores responsables Dr. Enrique González Vergara y M.C. Beatriz Espinosa Aquino, enriquez.gonzalez@correo.buap.mx beatriz.espinosa@correo.buap.mx Reserva de derecho al uso exclusivo 04-2021-092723014900-203, ISSN 2448-5829 ambos otorgados por el Instituto Nacional del derecho de autor de la Secretaría de Cultura. Responsables de la última actualización de este número, Instituto de Ciencias Dr. Enrique González Vergara y M.C. Beatriz Espinosa Aquino, fecha de la última modificación, abril 2024.

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

Índice

AÑO 10 No. 29

	MENSAJE DE LA RECTORA		
	MENSAJE DE LA DIRECTORA DEL ICUAP		
	MENSAJE INVESTIGADORAS RECONOCIDAS DEL ICUAP		
11-26	LA DIETA CETOGÉNICA COMO TERAPIA NUTRICIONAL ADYUVANTE EN PACIENTES CON GLIOBLASTOMA, UNA DESCRIPCIÓN TEÓRICA		
27-39	EL ESTRÉS Y SU RELACIÓN CON ALGUNAS PATOLOGÍAS ASOCIADAS A LA REPRODUCCIÓN FEMENINA		
40-49	UN RECORRIDO AL PEQUEÑO MUNDO DE LAS BACTERIAS		
51-67	INVASIÓN DE SARGAZO EN PLAYAS DEL CARIBE, UNA OPORTUNIDAD PARA EL DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES		
68-81	TEXTILES FUNCIONALES PARA LA INHIBICIÓN DE BACTERIAS.		
83-91	ENFERMEDADES NO TRANSMISIBLES Y EL SEDENTARISMO		
92-105	POLÍTICAS INSTITUCIONALES SOBRE CERTIFICACIONES DEL INGLÉS EN EDUCACIÓN PARA LA SALUD EN NIVEL POSGRADO: EL CASO DEL ESTADO DE PUEBLA		
106-121	EDUCACIÓN PREVENTIVA PERIODONTAL: UN ENFOQUE VITAL PARA ADULTOS CON DIABETES E HIPERTENSIÓN		
122-132	ENERGÍA EÓLICA IMPULSADA POR TRÁFICO VEHICULAR, UNA OPCIÓN PARA EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR ALUMBRADO PÚBLICO		
	BIOTECNOLOGÍA Y EL RENACER DEL ICUAP	133-135	
	HACER CIENCIA. VIVENCIAS EN EL ICUAP	136-138	
	EXPERIENCIAS DE VIDA EN UN LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN ICUAP	139-141	
	ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN PLANTAS: UN MECANISMO DE DEFENSA ANTE LOS HERBÍVOROS	142-149	
	LAS AVES DE GRANJA REQUIEREN VACUNARSE PARA MANTENER LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS CON ALTO VALOR NUTRICIONAL A BAJO COSTO.	150-163	
	TRANSISTOR DE TUNELAMIENTO, EL FENÓMENO CUÁNTICO PRESENTE Y SU MEJORAMIENTO	164-178	
	CELDA SOLARES AVANZADAS: EL PAPEL CRUCIAL DE LAS TECNOLOGÍAS TÁNDEM.	179-193	
	CELDA SOLAR DE BAJO COSTO SENSIBILIZADA POR TINTE	194-204	
	LA SIGATOKA, UNA AMENAZA PARA EL CULTIVO DE PLÁTANO Y BANANO EN MÉXICO.	205-217	
	NANOMATERIALES DE CARBONO PARA LIBERACIÓN DE FÁRMACOS.	218-229	
	DE HÉROE A VILLANO: GADOLINIO EN EL DIAGNÓSTICO DE VANGUARDIA COMO REDENCIÓN A UNA EMERGENTE CONTAMINACIÓN	230-340	

EDITORIAL

Estimados Lectores, nos es muy grato compartir con nuestros seguidores y el público en general el Número Especial de los Posgrados del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

RD-ICUAP, cumple 10 años ininterrumpidos, con una edición cuatrimestral. Nuestro objetivo es la comunicación pública de los avances recientes de las diferentes disciplinas que se cultivan en el Instituto de ciencias de la BUAP y en general de toda la comunidad de nuestra Universidad y de diversas Instituciones hermanas. En el marco de la conmemoración de los festejos de los 50 años de la creación del Instituto de Ciencias queremos dar a conocer y destacar la dedicación del estudiantado de los posgrados y de los investigadores en estancia posdoctoral y su compromiso por la excelencia académica, lo cual ha sido motor en la generación de avances científicos y tecnológicos en beneficio de la sociedad.

Además queremos destacar que la revista RD-ICUAP cuenta con número DOI y se encuentra incluida en el índice latinoamericano de revista LATINDEX así como en el Catálogo de Revistas Europeas de Divulgación Científica HIDDEN NATURE, lo que garantiza la visibilidad a nivel internacional.

En esta vinculación internacional a partir de 2020 entre RD y Hidden Nature nos ha permitido estar presentes para la lectura y consulta en Europa a través del directorio de revistas <https://www.hidden-nature.com/directorio-revistas-divulgacion-cientifica/>

Este Número Especial concentra algunos trabajos de los 14 programas de posgrado del Instituto de Ciencias, reuniendo 17 artículos y 3 experiencias de Jóvenes Investigadores en las primeras etapas de su desarrollo profesional.

Nuestro propósito es llegar cada vez más al público de diferentes niveles educativos y a la población en general, por lo que hemos propuesto diferentes medios para leer, consultar y seguir a través de las redes sociales como son YouTube, Facebook, X, Spotify e Instagram. Asimismo, el programa “RD-Divulga” transmite a través del canal de YouTube JournalRD, cada último día hábil de mes, un webinar en donde se dan a conocer destacados trabajos de la comunidad de investigadoras e investigadores en diversos temas en un lenguaje cordial que ayuda a transmitir el

conocimiento y el interés científico en la población. Además se producen vídeos de divulgación inspirados en los artículos publicados en la revista y a través de podcast “Compartiendo Ciencia” los cuales están disponibles en SPOTIFY.

Asimismo, es importante reconocer la creatividad, talento y profesionalismo del grupo del Departamento de Comunicación Gráfica y Social de la Facultad de Arquitectura como colaboradores de RD-ICUAP, quienes han contribuido con el diseño y maquetación de este número,

De la misma forma, destacamos el apoyo institucional de nuestras autoridades la Dra. María Lilia Cedillo Ramírez, rectora de la BUAP, quien ha hecho posible la publicación de este Número Especial de Posgrados del ICUAP su apoyo financiero para el tiraje de este número como legado del 50 aniversario del Instituto de Ciencias.

No queremos despedirnos sin antes reconocer a todas las personas que estuvieron durante el proceso de este número, editores, revisores, diseñadores gráficos y autores.

Hasta pronto, nos despedimos recordando que la lectura y el conocimiento abre la conciencia, la libertad y nos permite vivir mejor sígamos Compartiendo Ciencia.

¡Nos leemos en el próximo número!

Dr. Enrique González Vergara
Editor Responsable

PhDs. Beatriz Espinosa Aquino
Editora Responsable

Celebración del 50 aniversario del Instituto de Ciencias

El Instituto de Ciencias posee un bien ganado reconocimiento por sus contribuciones a la generación de conocimientos científicos y tecnológicos para la comunidad y por la formación de capital humano socialmente responsable.

Fue el 23 de agosto de 1973, que el ingeniero Luis Rivera Terrazas presentó el proyecto de creación del Instituto de Ciencias de la UAP, representando a una Comisión de la escuela de Ciencias Físico Matemáticas. La finalidad de dicho proyecto — según explicaba Terrazas— era el de “reorganizar, coordinar y promover de manera sistemática la investigación científica en nuestra institución, que, reiteramos, se encontraba por esos años notablemente dispersa, y sin objetivos definidos”.

La propuesta fue aceptada por las autoridades universitarias, y al año siguiente, en 1974, se iniciaron las actividades del ICUAP, fungiendo como primer director el propio ingeniero Terrazas, quien junto con 26 investigadores y 18 auxiliares en las diversas áreas del conocimiento fueron los pioneros del trabajo académico y científico del mismo.

En la búsqueda de una visión más rica y compleja de la política de investigación que requería la universidad, se presentaron diversas propuestas, entre otras:

Incrementar el acervo científico de la institución

Detectar los problemas esenciales de México y, en concreto, de la región Puebla-Tlaxcala

Combatir la centralización de la investigación en nuestro país, y

Vincular la docencia, la investigación y la extensión.

Al paso de los años, el ICUAP experimentó un crecimiento significativo. Se ampliaron las instalaciones para recibir a más estudiantes y se diversificaron las áreas de estudio para incluir campos emergentes en ciencias.

La introducción de programas de posgrado atrajo a estudiantes y académicos de todo México y del extranjero, y el ICUAP comenzó a establecer asociaciones con instituciones académicas y de investigación internacionales, con dependencias gubernamentales y con diferentes empresas, enriqueciendo así el entorno de aprendizaje y promoviendo la colaboración científica a nivel global.

Hoy, al cumplir 50 años, el ICUAP cuenta con 148 investigadores, 260 estudiantes de 14 programas de posgrado (maestría y doctorado) y colabora con más de 28 planes de estudio a nivel licenciatura.

Sus mayores fortalezas derivan de la multidisciplinariedad del conocimiento, que se ve reflejada en los integrantes de la comunidad.

Con orgullo podemos afirmar que el Instituto de Ciencias de la BUAP, cumple los objetivos para los que fue creado y ha ido expandiendo sus campos de acción, hasta convertirse en un centro de excelencia en la educación y la investigación científica en México, con un prometedor futuro.

Mi más amplio reconocimiento a todos y cada uno de los integrantes del ICUAP, instituto del que los universitarios y la sociedad toda, nos sentimos muy orgullosos.

Dra. Ma. Lilia Cedillo Ramírez. Rectora.



Mensaje de Dra. Carolina Morán Raya

Directora del Instituto de Ciencias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

La investigación es una de las piedras angulares del avance científico y tecnológico en nuestra Universidad y fundamenta nuestro lema: “pensar bien para vivir mejor”. En particular, en el Instituto de Ciencias, el trabajo desarrollado por estudiantes de posgrado juega un papel fundamental en la generación de conocimiento y soluciones innovadoras a los desafíos que enfrentamos en la actualidad. Por ello, nos complace presentarles el número especial de la revista de divulgación científica RD-ICUAP del Instituto de Ciencias, en el marco del 50 aniversario del ICUAP, en formatos digital e impreso, dedicado exclusivamente a mostrar los trabajos de investigación realizados por estudiantes de posgrado de diversas disciplinas bajo la dirección de investigadores del Instituto.

En este número especial queremos destacar y reconocer el esfuerzo y dedicación de estos estudiantes, quienes invierten tiempo, energía y pasión en la realización de sus trabajos de investigación. Su compromiso con la excelencia académica y su capacidad para generar ideas creativas y originales son el motor que impulsa el avance científico y tecnológico en nuestra sociedad. Sin duda, su contribución es invaluable y merece ser reconocida y celebrada. De la misma manera queremos hacer una mención a la participación de investigadores visitantes y de estancia posdoctoral cuya inquietud y deseos de investigación los ha traído de vuelta a la BUAP a seguirse desarrollando y preparando.

Asimismo, queremos hacer un reconocimiento especial al personal Académico que ha acompañado y guiado a estos estudiantes a lo largo de sus investigaciones. Su conocimiento, experiencia y dedicación ha sido fundamental para orientar y apoyar el desarrollo de los proyectos de investigación, en muchos casos, por varias generaciones. El papel del profesorado en la formación de los futuros investigadores es esencial y su labor de docencia y acompañamiento no debe pasar desapercibida.

De la misma forma, es importante destacar el apoyo institucional por parte de la Dra. Ma. Lilia

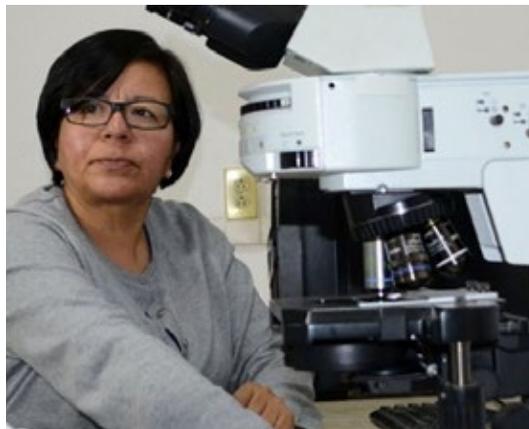
Cedillo Ramírez, rectora de la BUAP, que ha hecho posible la publicación de estos trabajos de investigación y de la cristalización de este número especial de los posgrados en RD-ICUAP. Su apoyo financiero, logístico y administrativo, ha permitido que los avances de investigación se presenten aquí y se divulguen por vía electrónica a todo el orbe.

Este número especial de la revista de divulgación científica es una excelente plataforma para celebrar la trayectoria y el legado del ICUAP en su 50 aniversario. Durante años, este Instituto ha sido un bastión de la investigación científica y un referente local, nacional e internacional del trabajo de investigación que se desarrolla al seno de sus siete centros, cuatro departamentos de investigación y 14 programas de posgrado.

Por tanto, el número especial de RD – ICUAP, es el testimonio del valor y la relevancia de la investigación realizada por estudiantes de posgrado con el apoyo recíproco e incondicional de sus profesores y colaboradores.

Agradecemos a todas las personas involucradas en este proceso y los animamos a seguir impulsando la divulgación, la investigación y la innovación científica en beneficio de la sociedad.

Abril, 2024.



Mensaje dirigido a los estudiantes

Desde que en el mundo se inventó la escritura (ca. 3500 a.C.) y se emitieron comunicaciones de todo tipo, la escritura se tornó en un instrumento poderoso para plasmar pensamientos, compartir estados de ánimo, transmitir avances científicos y tecnológicos. Así, la escritura transitó desde el uso de punzones sobre barro en Mesopotamia, hojas y cortezas de árbol en Egipto, cañas en Grecia, plumas de ave en Roma y plumas estilográficas en el mundo. Hoy, la aparición de las computadoras y la comunicación digital ha trastocado completamente el placer de escribir. Aunque parezca errado, el escribir con la mano, implica hilar letras, activar simultáneamente varias áreas cerebrales para guardar en la memoria palabras, frases y oraciones.

Si escribir ayuda a organizar y estructurar pensamientos y a desarrollar la creatividad, es también una experiencia muy íntima y personal, en la que se está en contacto con el alma. ¿Qué decir de su dupla, la lectura? Se dice que en un escritor se reconoce lo que ha leído.

Para este binomio lectura-escritura aplica la frase de Platón: “Si dos personas tienen una manzana cada una y la intercambian, cada una seguirá teniendo una manzana. En cambio, si las dos personas intercambian una idea, ahora cada una tendrá dos ideas”. Ese es el efecto de la lectura como provisión de conocimiento e ideas para la inspiración en la escritura.

Escribir acerca de los experimentos y resultados en un laboratorio o sistema bajo estudio, apuntar todo lo referente al proceso y obtener algún avance, deja sin duda los datos y la explicación de la pequeña o gran aportación a la ciencia, pero contárselo de manera sencilla al mundo que les leerá en los medios de transporte, la calle, el café, el laboratorio mismo, completa la satisfacción y afora con alegría la contribución. Los invitamos a reflexionar sobre lo importante que es escribir y al mismo tiempo, acceder después a nuestro propio pasado, a nuestro “yo” en continua evolución. A decir de H. Hesse: “Escribir poemas malos es más gratificante que leer los más bellos”

Yasmi Reyes y María de la Paz Elizalde



LA DIETA CETOGENICA COMO TERAPIA NUTRICIONAL ADYUVANTE EN PACIENTES CON GLIOBLASTOMA, UNA DESCRIPCIÓN TEÓRICA

THE KETOGENIC DIET AS AN ADJUVANT NUTRITIONAL
THERAPY IN PATIENTS WITH GLIOBLASTOMA:
A THEORETICAL DESCRIPTION

Diana Guadalupe Matadamas Pérez
Camila Fabiana Zarza Camacho
Carolina Morán Raya
María Esmeralda Rivera Castro
Alfonso Daniel Díaz Fonseca
Juan Manuel Bravo-Benítez*

<http://orcid.org/0009-0008-2653-8104>
<http://orcid.org/0009-0009-3801-185X>
<http://orcid.org/0000-0002-2023-2242>
<http://orcid.org/0000-0003-4468-8858>
<http://orcid.org/0000-0003-4092-6636>
<http://orcid.org/0000-0003-2396-7890>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

Escuela de Nutrición, Universidad Regional del Sureste, Oaxaca de Juárez, México.
ORCID id: <http://orcid.org/0009-0008-2653-8104>
Email: dianamatadamasp@gmail.com
Dirección: Eulalio Gutiérrez 1002 Col. Miguel Alemán. Oaxaca. Oax. CP 68120

Departamento de Educación en Investigación Clínica, RedOSMO, Oaxaca Site Management Organization,
Oaxaca de Juárez, México.
ORCID id: <http://orcid.org/0009-0009-3801-185X>
Email: camilazarzac@gmail.com

Dirección: Humboldt 302, ruta independencia, Centro, 68000 Oaxaca de Juárez, Oax.
Laboratorio de Aplicaciones Biomédicas, Centro de Investigación en Físicoquímica de Materiales,
Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

RESUMEN

Esta revisión profundiza en las bases fisiológicas de la dieta cetogénica y su capacidad para influir en el entorno metabólico desfavorable que impulsa el crecimiento del Glioblastoma Multiforme. Mediante el análisis de investigaciones recientes, se aporta información sobre la implementación de la dieta cetogénica en pacientes con GBM. Al considerar factores como la composición nutricional, la duración del tratamiento y los resultados alcanzados, se muestran perspectivas alentadoras en términos de supervivencia y calidad de vida. Asimismo, se subraya la importancia de una supervisión médica cercana y de adaptar la dieta a las necesidades individuales para maximizar los beneficios. No obstante, a pesar de las observaciones prometedoras, se recalca la necesidad de futuras investigaciones que establezcan pautas clínicas sólidas y ofrezcan una comprensión más profunda del potencial de la dieta cetogénica como terapia complementaria contra el glioblastoma multiforme. En resumen, esta revisión proporciona información valiosa para profesionales de la salud, nutricionistas y científicos comprometidos en la búsqueda de enfoques innovadores destinados a mejorar los resultados en pacientes con tumores cerebrales primarios como el Glioblastoma Multiforme.

Palabras clave: Dieta cetogénica, cáncer, glioblastoma.

INTRODUCCIÓN

La presente revisión recopila datos de diversos ensayos clínicos, estudios de caso, artículos en revisión y otras publicaciones en revistas clínicas; relacionados con el metabolismo de las células tumorales y el empleo de una dieta cetogénica. El presente trabajo aborda conceptos concretos de cáncer del sistema nervioso central, glioblastoma multiforme, incidencias en población latinoamericana, dieta cetogénica, fisiología y cómo dicha dieta actúa en el organismo, bajo la premisa de que el tejido nervioso tiene afinidad de utilizar la glucosa como sustrato principal y, por otra parte, la incapacidad de las células tumorales de usar cetonas como fuente alterna de energía, modificando el metabolismo del cáncer, con resultados prometedores.

ABSTRACT

This review delves into the physiological underpinnings of the ketogenic diet and its ability to influence the unfavorable metabolic environment that propels the growth of Glioblastoma Multiforme. Through the analysis of recent research, it illuminates the implementation of the ketogenic diet in GBM patients. By considering factors such as nutritional composition, treatment duration, and attained outcomes, promising perspectives emerge in terms of survival and quality of life. Similarly, it emphasizes the significance of close medical supervision and tailoring the diet to individual needs to maximize benefits. However, despite the promising observations, it underscores the need for future research to establish robust clinical guidelines and provide a deeper comprehension of the potential of the ketogenic diet as a complementary therapy against glioblastoma multiforme. In summary, this review offers valuable information for healthcare professionals, nutritionists, and scientists devoted to exploring innovative approaches aimed at enhancing outcomes in patients with primary brain tumors like Glioblastoma Multiforme.

Keywords: Ketogenic diet, glioblastoma, cancer.

Cáncer en el Sistema Nervioso Central

El cáncer en el sistema nervioso central (SNC) implica una alta tasa de mortalidad. Los tumores malignos constituyen un grupo heterogéneo de neoplasias, cuyo diagnóstico por imagen es complicado de diferenciar, dado que los tumores no tienen límites definidos, lo cual complica su intervención quirúrgica. Los tumores primarios en el SNC presentan una incidencia mundial de 10.8 por cada 100,000 habitantes por año, lo que causa el 2.6% de las muertes por cáncer y tienen mayor prevalencia en niños y jóvenes, con una mortalidad del 30%. El cáncer de SNC ocupa el primer lugar en incidencia (después del cáncer de mama y el cáncer de tiroides) (Bray & Piñeros, 2016). Los tumores cerebrales más

prevalentes son las metástasis intracraneales de cánceres sistémicos, los meningiomas y los gliomas, específicamente el GBM. En un metaanálisis publicado en 2016, donde se evaluaron poblaciones latinoamericanas de Centroamérica, Sudamérica y el Caribe, de aproximadamente 1,093,000 personas diagnosticadas con cáncer de SNC, se reportó que dentro del 58% de un grupo de adultos (>20 años), el 89% de ellos, presentó GBM (Figura 1) (García-Espinosa et al., 2022). Este tumor se describe en los siguientes apartados y se concluye que es altamente común, agresivo, mortal y muestra una respuesta deficiente al tratamiento quimioterapéutico o radioterapéutico.

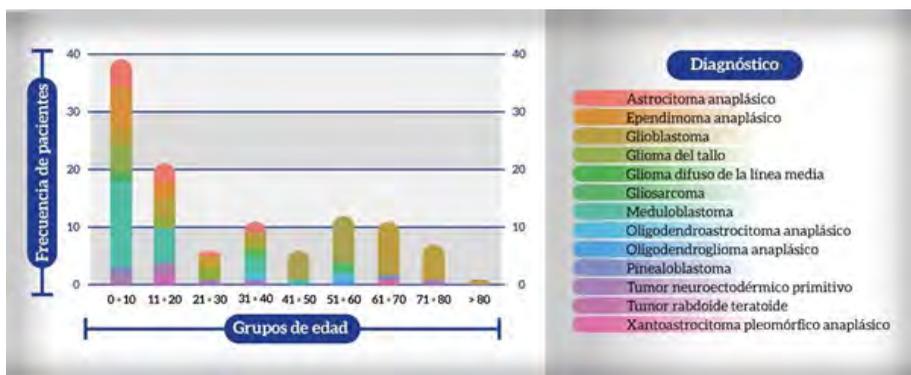


Figura 1. Gráfico de incidencias respecto al diagnóstico de tumores del sistema nervioso central, clasificados según histología por grupos de edad en Latinoamérica (Elaboración propia).

Análisis Detallado del Glioblastoma Multiforme: Características y Descripción

El GBM es el tumor cerebral primario maligno más común, agresivo y con alta tasa de mortalidad. En etapas tempranas y dependiendo de la zona en el cerebro donde se ubique, provoca síntomas como debilidad persistente, entumecimiento de extremidades, pérdida de la visión o alteración del lenguaje. Incluso síntomas sutiles como alteración cognitiva, trastornos del estado de ánimo, fatiga y trastornos leves de la memoria dificultando el diagnóstico en las etapas tempranas de la patología. Las cefaleas también se presentan y aumentan en frecuencia debido al constante crecimiento tumoral del GBM. Las convulsiones son

infrecuentes en pacientes recién diagnosticados con GBM (aproximadamente 25%) (Alexander & Cloughesy, 2017). La clasificación de este tumor se basa en las características moleculares, así como en las histológicas, según la actualización de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2016 (Louis et al., 2016; Rivas et al., 2021). Regularmente, para su tratamiento, se recurre al protocolo Stupp (radioterapia posoperatoria más quimioterapia concomitante y adyuvante con temozolomida) y la media de supervivencia general es de 16 meses con tratamiento (Lakomy et al., 2020).

Métodos de Diagnóstico y Biomarcadores para el Glioblastoma Multiforme

Senhaji y col. (2022) describe los biomarcadores principales para diagnosticar el GBM, los cuales incluyen: A) Mutación de genes de isocitrato deshidrogenasa 1/isocitrato deshidrogenasa 2 (IDH1/IDH2). El IDH participa en el ciclo de Krebs, produciendo NADPH para el cerebro, principalmente. La mutación del gen IDH es específica para gliomas de alto grado (80%) y GBM (10%). Estos suelen ser GBM de tipo silvestre (GB1) (Senhaji et al., 2022). Mientras que la mutación del gen IDH2 es indicador para leucemia mieloide aguda y en fases tempranas (gliomagénesis) de GBM, aunque es infrecuente y suele ser un GBM mutante GB2; B) Gen metilguanina-ADN metil-transferasa (MGMT): metilación del sitio promotor MGMT mediante una prueba de reacción en cadena de la polimerasa de tejido tumoral en parafina. El GBM es quimiosensible al tratamiento con temozolomida; C) Receptor del factor de crecimiento epidérmico (EGFR, Epidermal Growth Factor Receptor, por sus siglas en inglés), es un receptor involucrado en diversas vías de señalización de la célula, como la inhibición de la apoptosis y el estímulo de la proliferación celular, entre otros. El EGFR se amplifica en aproximadamente el 60% de los GBM primarios o GB1; en los GBM secundarios, es infrecuente; D) Telomerasa TERT (TERT por sus siglas en inglés, telomerase reverse transcriptase), es un complejo enzimático que extiende y mantiene los

telómeros. En el GBM, la mutación del TERT produce un acortamiento en los telómeros, lo que permite la diferenciación de los GBM (Olympios et al., 2021).

Existen distintas técnicas de diagnóstico por imagen para GBM; entre las más frecuentes se encuentra la resonancia magnética, la tomografía y la angiografía; en estas es común observar una lesión infiltrativa y heterogénea con “realce” en la imagen, además de una necrosis central rodeada por un edema peritumoral. Este tumor compromete la sustancia blanca profunda y el cuerpo caloso. El GBM con mutación IDH2, es decir, el GB2 (aproximadamente el 5% de los casos diagnosticados), presenta un tumor voluminoso sin intensificación, infiltración cortical, gran tamaño, necrosis y edema mínimos (frecuentemente en los lóbulos frontales y temporales) (Banelli et al., 2017; Smith et al., 2022). Además, se observa el progreso tumoral de un GBM mediante resonancia magnética posterior a 20 días. Es importante mencionar que el GBM tiene una progresión rápida. Sin tratamiento, el GBM tiene una mediana de supervivencia de 3 a 4 meses. Es infrecuente que la tasa de supervivencia sea mayor al 5%; los registros mencionan que dichas cifras se encuentran por debajo del 5%. Cuando el tumor presenta recurrencia, la supervivencia disminuye a 3 a 4 meses (Faraz et al., 2016)

Explorando El Metabolismo Del Cáncer: El Impacto Del Efecto Warburg

En la década de los años 1920, Otto Warburg publicó que en el proceso de respiración celular existía una vía metabólica alternativa en la cual la glucosa, al convertirse en piruvato, generaba lactato como residuo (Vaupel et al., 2019). Esto ocurría incluso en presencia de oxígeno abundante (glucólisis aeróbica), lo que constituía una alteración metabólica universal en la tumorigénesis. Warburg atribuyó este fenómeno a una lesión en las células respiratorias. Hoy en día, existe evidencia de que

las mitocondrias presentan una reprogramación metabólica activa para la producción de energía y la proliferación constante de células cancerosas. Esta reprogramación lleva a una sobreexplotación de los transportadores de glucosa (GLUT) y las enzimas glucolíticas, generando un tráfico glucolítico acelerado que conduce a la acumulación de intermediarios glucolíticos. Estos intermediarios contribuyen a la formación de biomasa cancerosa y a la producción rápida de ATP para satisfacer las

demandas energéticas, mientras que el lactato se acumula como residuo. Esta acumulación de lactato crea un ambiente favorablemente ácido que, a su vez, induce resistencia a ciertas terapias antitumorales y compromete la inmunidad antitumoral. En resumen, este fenómeno implica un aumento en la relación entre la glucólisis y el consumo de oxígeno (Pascale et al., 2020). Específicamente, ocurren cuatro procesos moleculares y funcionales del efecto Warburg incluyen: A) Aceleración significativa de los flujos

glucolíticos y el consumo de oxígeno, B) Producción de ATP para satisfacer las altas demandas de energía, C) Respaldo y desviación de intermediarios glicolíticos, incluida la inhibición de la entrada de piruvato en las mitocondrias y D) Sobreexpresión de genes como el factor 1 alfa inducible por hipoxia (HIF-1 α), p53 mutante, homólogo de fosfatasa, microARN y tensina mutante (PTEN), que inhiben la biogénesis y las funciones mitocondriales saludables (Vaupel & Multhoff, 2021).

La Dieta Cetogénica: Una Visión Concisa y Reveladora

Wilder acuñó el término “dieta cetogénica”, haciendo referencia a regímenes alimenticios ricos en grasas y bajos en hidratos de carbono (Hohn et al., 2019). Posteriormente, en 1925, Dowis propuso un cálculo para la dieta cetogénica: 1 gramo de proteína por kilogramo de peso corporal, de 10 a 15 gramos de hidratos de carbono al día, y el resto de las calorías provenientes de las grasas (Dowis & Banga, 2021). Más adelante, Mohorko (17) introdujo una dieta basada en triglicéridos de cadena media (TCM), lo que permitió una restricción menos severa de hidratos de carbono y proteínas.

En los años 1970, la dieta Atkins, concebida por Robert C. Atkins, se volvió ampliamente popular (Tahreem et al., 2022). Este régimen alimenticio impone una restricción total de hidratos de carbono (con una ingesta menor al 10%), mientras prioriza las grasas y no establece límites para la cantidad de proteínas o kilocalorías consumidas.

Esta singularidad constituye la característica distintiva central de la dieta cetogénica. La dieta cetogénica, es un plan alimentario que garantiza un apropiado aporte de proteínas mientras incrementa el consumo de grasas y disminuye la ingesta de hidratos de carbono. Entre los efectos se incluyen la reducción del colesterol total; colesterol LDL y triglicéridos, así como la disminución de los niveles de glucosa sérica y de la presión arterial sistólica y diastólica; sin embargo, puede producir un aumento en la inflamación hepática y el riesgo de esteatosis hepática no alcohólica (Pérez Kast et al., 2021). Los alimentos ricos en lípidos y grasas, como aceites comestibles, mantequilla, manteca, coco, aguacate, mayonesa, tocino y ciertos tipos de queso son parte de esta dieta. La distribución de porcentajes en una dieta cetogénica varía, dado que no existe un modelo estandarizado (Tabla 1) (Dowis & Banga, 2021; Masood et al., 2023; Mohorko et al., 2019).

Descripción	Proporción	Porcentaje
Dieta cetogénica restringida	4:1	90% Lípidos 8% Proteína 2% CHO
Dieta cetogénica estándar, hiperproteica	3:1	75% Lípidos 20% Proteína 5% CHO
Recomendado para personas con resistencia a la insulina	4:1	80% Lípidos 15% Proteína 5% CHO
Dieta americana estándar, hiperproteica	2:1	55% Lípidos 30% Proteína 15% CHO
Dieta cetogénica terapéutica	4:1	90% Lípidos 5% Proteína 5% CHO

Tabla 1 Tipos de dieta cetogénica y distribución de macronutrientos (Elaboración propia).

La Fisiología de la Dieta Cetogénica

Los hidratos de carbono metabolizados en glucosa constituyen la principal fuente de energía en los tejidos corporales. En una dieta cetogénica, el cuerpo se priva de esta fuente al reducir la ingesta a menos de 50 g por día. Como resultado, la secreción de insulina disminuye, reduciendo el estímulo para el almacenamiento de grasa y glucosa. Esto lleva al cuerpo a entrar en un estado catabólico. Las reservas de glucógeno disminuyen, lo que obliga al cuerpo a adaptarse a otras vías metabólicas para producir energía. Cuando hay poca disponibilidad de hidratos de carbono, entran en acción dos procesos metabólicos: la gluconeogénesis (producción de glucosa a partir de sustratos como ácido láctico, glicerol o aminoácidos como alanina y glutamina) y la cetogénesis (formación de cuerpos cetónicos) (Martin-McGill et al., 2019).

La cetogénesis ofrece una fuente alternativa de energía para tejidos como el corazón, el tejido muscular, los riñones y el cerebro, a través de cuerpos cetónicos o cetonas (acetoacetato, beta-hidroxibutirato y acetona). Estos se convierten en la principal fuente de energía y se sintetizan en el hígado (se presenta un mapa metabólico en la Figura 1) (Leonard, 2020). Estos cuerpos cetónicos se acumulan en el cuerpo, generando un estado metabólico conocido como cetosis. Este estado se considera seguro, ya que no produce cambios significativos en el pH de la sangre, manteniendo niveles de cetonas superiores a 2 mmol/L (Klement et al., 2020). Los cuerpos cetónicos generan más trifosfato de adenosina (ATP) que la glucosa. Esto permite al cuerpo mantener una producción eficiente de combustible incluso en un déficit calórico. Además, los cuerpos cetónicos reducen el daño causado por los radicales libres y mejoran la capacidad antioxidante (Rojas-Morales et al., 2020).

Se ha observado que la cetogénesis tiene lugar en el hígado, donde la producción de ácidos grasos se estimula mediante la liberación de adrenalina y glucagón. Estos ácidos grasos ingresan a las células

hepáticas y, en las mitocondrias, se forma acetil-CoA a través de la beta-oxidación (-oxidación) de los ácidos grasos. Cuando el acetil-CoA se metaboliza con oxaloacetato (obtenido del piruvato mediante la glucólisis), se pone en marcha el ciclo del ácido cítrico, que tiene la capacidad de generar glucosa a través de la gluconeogénesis. Si falta oxaloacetato (debido a la escasez de glucosa), el acetil-CoA da origen a los cuerpos cetónicos. Estos circulan en la sangre como una alternativa de combustible a través de la cetólisis (la descomposición de los cuerpos cetónicos) (Leonard, 2020). Los niveles normales de cuerpos cetónicos en circulación son inferiores a 0.5 mmol/L, y la cetosis abarca rangos séricos elevados de cetonas, que se pueden presentar en dos etapas: A) Hiperketonemia o cetosis, una respuesta fisiológica al ayuno prolongado, el ejercicio intenso o una dieta cetogénica, y B) Cetoacidosis, una condición patológica y potencialmente peligrosa causada por la diabetes mellitus, la deficiencia de cortisol, la deficiencia de hormona del crecimiento, la intoxicación por alcohol o salicilatos (Bashir et al., 2021).

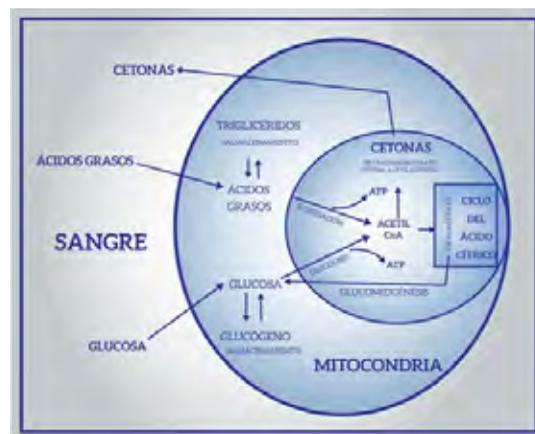


Figura 2. Esquema del metabolismo de los cuerpos cetónicos y su interacción con la glucosa (Elaboración propia).

Utilización de la Dieta Cetogénica como Terapia Nutricional para el Glioblastoma Multiforme

En circunstancias normales, en el cuerpo humano, los hidratos de carbono se convierten en glucosa. Esta glucosa estimula las células del páncreas para liberar insulina, permitiendo que el sustrato ingrese a las células y brinde energía. Un alto consumo de hidratos de carbono provoca un aumento en los niveles de glucosa en sangre. Como respuesta, se secreta más insulina, lo que promueve la interacción de los receptores de la hormona de crecimiento y dichas hormonas. Además, se activa la transcripción del factor 1 alfa inducible por hipoxia (HIF-1), el cual impulsa la producción del factor de crecimiento similar a la insulina 1 (IGF-1) en el hígado (Tan-Shalaby, 2017). Este proceso favorece el crecimiento y la proliferación celular, tanto en células normales como en células cancerosas.

Cuando el cuerpo deja de recibir glucosa como sustrato, necesita obtener energía de otra fuente: los lípidos. Estos lípidos son suministrados por una dieta cetogénica (DC), y el hígado es el órgano principal encargado de este metabolismo. En el hígado se generan cetonas y ácidos grasos, que actúan como una fuente alternativa de energía para las células normales. Sin embargo, no alimentan a las células cancerosas del GBM, ya que estas células presentan mitocondrias con defectos en la cadena de transporte de electrones. Esto limita su producción de ATP y justifica la adopción de un régimen cetogénico. El propósito de esta estrategia es intervenir en el metabolismo de las células cancerosas de rápida proliferación en el GBM, ralentizando su actividad (Strickland & Stoll, 2017).

La Proporción de Nutrientes en la Dieta Cetogénica

La distribución óptima de nutrientes en una dieta equilibrada y convencional suele constar de alrededor del 50 al 60% de hidratos de carbono, un 20 a 30% de lípidos y un 15 a 20% de proteínas. En el contexto de la DC, que ha demostrado su capacidad para alterar el metabolismo de las células cancerosas y frenar su propagación, surge una encrucijada clave: la selección de la proporción adecuada de macronutrientes (hidratos de carbono, lípidos y proteínas). Esta decisión crucial se basa en varios factores, como la adherencia de los pacientes a la dieta, sus preferencias personales, estado nutricional actual, condiciones médicas subyacentes, influencia cultural, variedad de la alimentación disponible, accesibilidad y seguridad alimentaria. Todos estos elementos se consideran al elaborar un plan dietético individualizado (Huq et al., 2021). Siguiendo estos parámetros, se sugiere la adopción de una variante modificada de la DC para

garantizar una mayor adhesión. Esta versión implica la limitación de los hidratos de carbono a menos del 15% del valor calórico total, un enfoque en fuentes ricas en grasas que constituyan más del 60% de las calorías totales, y una ingesta de proteínas ajustada con relación a la masa corporal, normalmente de 1.5 a 2 gramos por kilogramo de peso. Este enfoque nutricional optimizado permite alcanzar una cetosis estable y fisiológica sin desencadenar efectos secundarios adversos (Weber et al., 2018). En términos del cálculo dietético, este dependerá de factores como la edad, el género, la composición corporal, el estilo de vida y la posible presencia de estrés metabólico. Estos aspectos influirán en la recomendación precisa para cada paciente, especialmente cuando se trata de hospitalizaciones. En esta situación, se sugiere considerar herramientas como la fórmula de Mifflin o la de Penn State (Teigen et al., 2018).

Seguimiento Del Paciente

A Través De Los Análisis De Laboratorio

La supervisión de los parámetros bioquímicos adquiere una relevancia crucial en la evaluación y seguimiento de los pacientes (Lee et al., 2019). Entre estos indicadores, la medición de la glucosa sérica se destaca al proporcionar una evaluación directa de los niveles de glucosa en la sangre (Ibarretxe & Masana, 2021). Su valor clínico resulta esencial para evaluar la evolución de los pacientes diabéticos que siguen una dieta controlada como la DC (Montemurro et al., 2020). Algunos estudios han corroborado la eficacia de la DC en el control glucémico (Rieger et al., 2014). Asimismo, se exploran los cambios en el metabolismo lipídico,

donde se muestra que no se presentaron anomalías potencialmente peligrosas en una DC supervisada por nutriólogos clínicos y médicos (Batch et al., 2020). Otros estudios apuntan que seguir una DC durante un periodo de 4 días hasta 2 años conduce a perfiles lipídicos mejorados en pacientes diabéticos, incluyendo niveles más bajos de triglicéridos y concentraciones más altas de lipoproteína de alta densidad (HDL), aunque en pacientes no diabéticos se relaciona con un incremento en los niveles de colesterol total y lipoproteína de baja densidad (LDL)(Dowis & Banga, 2021) (Tabla 2).

Distribución dietética	Descripción	Período de estudio	Resultado
Distribución dietética Dieta cetogénica estricta (4:1) 42 g lípidos total 32 g proteína total 10 g carbohidratos 600 kcal/día	2010 Muestra: 1 Reporte de caso	14 días con DC 2 meses de seguimiento	Respuesta antiinflamatoria favorable. Sin tumor perceptible. Cetosis estable. Disminución de glucosa sérica. Recurrencia de tumor sin DC.
Dieta cetogénica estricta (4:1) 60 g carbohidratos Comer hasta saciedad	2014 Estudio piloto Muestra: 20 Alemania	2 - 86 semanas	Cetosis estable. Reducción de GBM.
Tipo de DC sin especificar 30 a 50 g de carbohidratos	2014 Estudio retrospectivo Muestra: 53 Estados Unidos	3 - 12 semanas	Cetosis estable. Disminución de glucosa sérica. Respuesta tumoral. Sin progresión del tumor durante 12 meses.
Dieta cetogénica estándar (3:1) 0.6 prot*kg/día 20-25 kcal*kg/día	2015 Reportes de caso Muestra: 2 Uso de protocolo ERKD	12 semanas	Control y disminución de progresión de GBM

Dieta cetogénica modificada (2:1) 50% lípidos 1.5 g*kg proteínas 25% de carbohidratos Fibra 20-30 g/día 25 kcal*kg/día	2017 Estudio clínico Muestra: 32 Brasil	12 semanas	Cetosis estable. Reducción de tamaño tumoral, visualización en resonancia magnética. Reducción de edema peritumoral.
Dieta cetogénica estándar (4:1)	2017 Ensayo clínico Muestra: 4	4 - 25 meses	Cetosis estable. Cuerpos cetónicos en tejido cerebral.

Tabla 2 Tipos de dieta cetogénica y distribución de macronutrientos (Elaboración propia).

Es esencial considerar la monitorización de otros parámetros, tales como el colesterol, las lipoproteínas y los triglicéridos, ya que resultan valiosos para detectar riesgos de defectos cardíacos congénitos y sospechas de trastornos metabólicos lipídicos (Salas Noain et al., 2020). La utilización de cetonas como fuente de energía podría potencialmente retrasar la progresión de la enfermedad renal crónica, reducir la hiperfosfatemia y favorecer el control de la presión arterial, sin comprometer el estado nutricional del paciente (Li et al., 2019). Por otra parte, se ha mostrado que el aumento en la ingesta de proteínas en el contexto de una DC, conlleva una carga adicional para los riñones al promover la hiperfiltración glomerular (Ko et al., 2020). Este hecho subraya la importancia de supervisar la función renal, incluyendo parámetros como el nitrógeno no ureico en sangre, el ácido úrico sérico y los niveles de potasio sérico. Este último desempeña un papel fundamental en la función cardíaca (Jiang et al., 2016), lo que se vuelve particularmente significativo dado que la DC está contraindicada en pacientes con afecciones cardíacas (Watanabe et al., 2020). En resumen, el seguimiento atento y preciso de estos parámetros bioquímicos proporciona las bases esenciales para comprender y gestionar

eficazmente la evolución de los pacientes en diversas condiciones médicas, brindando un fundamento sólido para la toma de decisiones clínicas informadas.

al promover la hiperfiltración glomerular (Ko et al., 2020). Este hecho subraya la importancia de supervisar la función renal, incluyendo parámetros como el nitrógeno no ureico en sangre, el ácido úrico sérico y los niveles de potasio sérico. Este último desempeña un papel fundamental en la función cardíaca (Jiang et al., 2016), lo que se vuelve particularmente significativo dado que la DC está contraindicada en pacientes con afecciones cardíacas (Watanabe et al., 2020). En resumen, el seguimiento atento y preciso de estos parámetros bioquímicos proporciona las bases esenciales para comprender y gestionar eficazmente la evolución de los pacientes en diversas condiciones médicas, brindando un fundamento sólido para la toma de decisiones clínicas informadas.

Como se mencionó previamente, el hígado no utiliza las cetonas como una fuente alterna de energía. En su lugar, obtiene energía a partir de otros sustratos almacenados, como el glucógeno. Sin embargo, es esencial evaluar la función hepática debido al alto consumo de

grasas que caracteriza a la DC (Dhillon & Gupta, 2023). Esta evaluación puede proporcionar información valiosa sobre la salud general del paciente y el estado del órgano. Para ello, es importante vigilar una serie de elementos, como los niveles de bilirrubina, proteínas, alanina aminotransferasa (ALT), aspartato aminotransferasa (AST) y deshidrogenasa láctica (LDH) (Schutz et al., 2021). Además de la función hepática, es recomendable analizar un examen general de orina (EGO) que incluya aspectos como el olor, el pH y la presencia de cetonas. Aunque estas últimas están presentes en todas las personas que siguen una DC sin anomalías sistémicas, su control puede ser informativo (Schutz et al., 2021). En 2019, Kenig publicó un estudio que involucró a 35 adultos que siguieron una DC durante 12 semanas (Kenig et al., 2019). Los resultados indicaron una disminución en los niveles de vitaminas liposolubles y miembros del complejo B.

Además, se observó una disminución en los niveles de vitamina A y D debido al consumo estricto de vegetales y, en algunos casos, la omisión de frutas (Sampaio, 2016). En relación con minerales como el hierro, el fósforo y el potasio, sus valores séricos se mantuvieron dentro de los rangos normales. Sin embargo, el nivel de calcio experimentó una reducción significativa, atribuida a la exclusión de grupos de alimentos como las legumbres y los lácteos en la DC. Otros minerales, como el magnesio y el selenio, también disminuyeron en concentración en suero. Estos datos revisten importancia al evaluar el estado nutricional de los pacientes bajo un régimen cetogénico. En resumen, la evaluación constante y precisa de estos parámetros bioquímicos permite un entendimiento más profundo de la evolución del paciente y respalda la toma de decisiones clínicas fundamentadas.

Evaluación Y Pronóstico A Través De Cribajes Nutricionales

La etiología del cáncer es diversa y las causas específicas detrás de la aparición de un GBM no están completamente definidas. No obstante, el pronóstico nutricional, particularmente en relación con el cáncer de SNC, guarda una relación íntima con su tratamiento, el cual puede involucrar quimioterapia, radioterapia, cirugía y cuidados paliativos (Weber et al., 2020). A raíz de esto y debido a la naturaleza misma de la enfermedad, surge un riesgo potencial de desnutrición. Dicho riesgo está asociado con un pronóstico adverso que impacta directamente en la calidad de vida del paciente. Para establecer un enfoque nutricional efectivo, es esencial llevar a cabo un proceso de cribado nutricional o tamizaje,

seguido de una evaluación exhaustiva del estado nutricional. Por esta razón, se han desarrollado herramientas específicas dirigidas a la población oncológica que son: A) Valoración Global Subjetiva generada por el Paciente (VGS-GP): Utilizada tanto en pacientes hospitalizados como ambulatorios, este método de tamizaje se destaca por su alta especificidad en contextos oncológicos. Además, funciona como punto de referencia para la evaluación proactiva del riesgo nutricional y desempeña un papel en la clasificación y seguimiento de intervenciones (Carrico et al., 2021; Jager-Wittenaar & Ottery, 2017), B) Malnutrition Screening Tool for Cancer Patients (MSTC): Conocida

por su acrónimo en inglés, esta herramienta está diseñada para detectar desnutrición en pacientes hospitalizados (Thompson et al., 2017), C) Malnutrition Universal Screening Tool (MUST): Ofrece una detección universal de la malnutrición, y es aplicable tanto en entornos hospitalarios como ambulatorios (Kadokia et al., 2022), D) Common Toxicity Criteria for Adverse Events (CTCAE): Utilizado en terapias oncológicas, este criterio compara las toxicidades agudas relacionadas con el tratamiento del cáncer (Basch et al., 2021), E) Karnofsky Performance Scale (KPS): Se trata de un índice de puntuación que varía de 0 a 100 y que vincula el estado funcional del paciente con su condición médica y supervivencia (Gunawan et al., 2020) y F) Prognostic Nutritional Index (PNI): Calculado a partir de la concentración sérica de albúmina y el recuento de linfocitos, este índice refleja el estado de inmunonutrición. Las revisiones exhaustivas de la literatura han enfatizado la relevancia del Índice PNI en la capacidad de anticipar la evolución de los pacientes con GBM, tanto en las fases preoperatorias como posoperatorias (Ding et al., 2018).

Aunque ya se hizo alusión a esto anteriormente, los GBM dependen de la glucosa derivada de los hidratos de carbono de la dieta para la biosíntesis de nucleótidos y para alimentar el crecimiento tumoral, mientras que se suprime el metabolismo oxidativo (Nguyen et al., 2021). La desnutrición surge como una problemática que puede afectar a un porcentaje considerable, oscilando entre el 20% y el 70%, de los pacientes oncológicos. Esto se debe a una ingesta calórica insuficiente, una disminución en la actividad física, inflamación sistémica y las alteraciones metabólicas provocadas tanto por el tumor como por los tratamientos

correspondientes (Rigamonti et al., 2019). Consecuentemente, se postula que el estado nutricional desempeña un papel determinante en el pronóstico de supervivencia en los casos de GBM.

Además, se han documentado antecedentes de resultados prometedores en la esfera científica en relación con el uso de la DC para optimizar las perspectivas de los pacientes que padecen GBM. En la Tabla 1 se presenta una síntesis abarcadora de distintos informes de casos (Artzi et al., 2017; Champ et al., 2014; Elsakka et al., 2018; Santos et al., 2018; Schwartz et al., 2015; Zuccoli et al., 2010), a su vez en esta tabla se detalla minuciosamente el tipo de dieta adoptada en cada reporte, así como los aportes específicos de macronutrientes, detalles generales de la intervención y los resultados obtenidos. Esta recopilación se construyó mediante un riguroso análisis bibliográfico de ocho artículos publicados entre 2010 y 2018, recopilados de fuentes como PubMed, Elsevier, entre otras. Los ocho reportes de caso comparten un denominador común: la utilización terapéutica de la DC en pacientes que enfrentan un cáncer en el sistema nervioso central. Aunque se valen de diferentes enfoques de DC, todos estos están respaldados por un fundamento científico anclado en la fisiología de la dieta y en su interacción con la fisiopatología del cáncer en el SNC, aspecto que fue previamente mencionado en esta revisión.

Descripción	Proporción	Porcentaje
Dieta cetogénica restringida	4:1	90% Lípidos 8% Proteína 2% CHO
Dieta cetogénica estándar, hiperproteica	3:1	75% Lípidos 20% Proteína 5% CHO
Recomendado para personas con resistencia a la insulina	4:1	80% Lípidos 15% Proteína 5% CHO
Dieta americana estándar, hiperproteica	2:1	55% Lípidos 30% Proteína 15% CHO
Dieta cetogénica terapéutica	4:1	90% Lípidos 5% Proteína 5% CHO

Tabla 1 Tipos de dieta cetogénica y distribución de macronutrientos (Elaboración propia).

Conclusiones

En conclusión, la dieta cetogénica y su enfoque en la manipulación metabólica ofrece una perspectiva única y complementaria a las terapias convencionales para tratar el GBM. Sin embargo, se necesita una investigación continua y rigurosa para comprender completamente su alcance, eficacia y limitaciones. La colaboración entre investigadores, médicos y nutricionistas es esencial para descubrir cómo integrar de manera óptima la dieta cetogénica en el régimen terapéutico del cáncer de SNC. En última instancia, es a través de la comprensión profunda y la innovación audaz que podremos avanzar en la lucha contra esta enfermedad devastadora y ofrecer nuevas esperanzas a aquellos afectados por ella.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia. Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

REFERENCIAS

- Alexander, B. M., & Cloughesy, T. F. (2017). Adult Glioblastoma. *J Clin Oncol*, 35(21), 2402-2409. <https://doi.org/10.1200/JCO.2017.73.0119>
- Artzi, M., Liberman, G., Vaisman, N., Bokstein, F., Vitinshtein, F., Aizenstein, O., & Ben Bashat, D. (2017). Changes in cerebral metabolism during ketogenic diet in patients with primary brain tumors: (1)H-MRS study. *J Neurooncol*, 132(2), 267-275. <https://doi.org/10.1007/s11060-016-2364-x>
- Banelli, B., Forlani, A., Allemanni, G., Morabito, A., Pistillo, M. P., & Romani, M. (2017). MicroRNA in Glioblastoma: An Overview. *Int J Genomics*, 2017, 7639084. <https://doi.org/10.1155/2017/7639084>
- Basch, E., Becker, C., Rogak, L. J., Schrag, D., Reeve, B. B., Spears, P., Smith, M. L., Gounder, M. M., Mahoney, M. R., Schwartz, G. K., Bennett, A. V., Mendoza, T. R., Cleeland, C. S., Sloan, J. A., Bruner, D. W., Schwab, G., Atkinson, T. M., Thanarajasingam, G., Bertagnolli, M. M., & Dueck, A. C. (2021). Composite grading algorithm for the National Cancer Institute's Patient-Reported Outcomes version of the Common Terminology Criteria for Adverse Events (PRO-CTCAE). *Clin Trials*, 18(1), 104-114. <https://doi.org/10.1177/1740774520975120>
- Bashir, B., Fahmy, A. A., Raza, F., & Banerjee, M. (2021). Non-diabetic ketoacidosis: a case series and literature review. *Postgrad Med J*, 97(1152), 667-671. <https://doi.org/10.1136/postgradmedj-2020-138513>
- Batch, J. T., Lamsal, S. P., Adkins, M., Sultan, S., & Ramirez, M. N. (2020). Advantages and Disadvantages of the Ketogenic Diet: A Review Article. *Cureus*, 12(8), e9639. <https://doi.org/10.7759/cureus.9639>
- Bray, F., & Piñeros, M. (2016). Cancer patterns, trends and projections in Latin America and the Caribbean: a global context. *Salud Pública de México*, 58(2), 104-117. <https://saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/7779>
- Carrico, M., Guerreiro, C. S., & Parreira, A. (2021). The validity of the Patient-Generated Subjective Global Assessment Short-form(c) in cancer patients undergoing chemotherapy. *Clin Nutr ESPEN*, 43, 296-301. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2021.03.037>
- Champ, C. E., Palmer, J. D., Volek, J. S., Werner-Wasik, M., Andrews, D. W., Evans, J. J., Glass, J., Kim, L., & Shi, W. (2014). Targeting metabolism with a ketogenic diet during the treatment of glioblastoma multiforme. *J Neurooncol*, 117(1), 125-131. <https://doi.org/10.1007/s11060-014-1362-0>
- Dhillon, K. K., & Gupta, S. (2023). Biochemistry, Ketogenesis. In *StatPearls*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/296320231>
- Ding, J. D., Yao, K., Wang, P. F., & Yan, C. X. (2018). Clinical significance of prognostic nutritional index in patients with glioblastomas. *Medicine (Baltimore)*, 97(48), e13218. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000013218>
- Dowis, K., & Banga, S. (2021). The Potential Health Benefits of the Ketogenic Diet: A Narrative Review. *Nutrients*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/nu13051654>
- Elsakka, A. M. A., Bary, M. A., Abdelzaher, E., Elnaggar, M., Kalamian, M., Mukherjee, P., & Seyfried, T. N. (2018). Management of Glioblastoma Multiforme in a Patient Treated With Ketogenic Metabolic Therapy and Modified Standard of Care: A 24-Month Follow-Up. *Front Nutr*, 5, 20. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00020>
- Faraz, S., Pannullo, S., Rosenblum, M., Smith, A., & Wernicke, A. G. (2016). Long-term survival in a patient with glioblastoma on antipsychotic therapy for schizophrenia: a case report and literature review. *Ther Adv Med Oncol*, 8(6), 421-428. <https://doi.org/10.1177/1758834016659791>
- García-Espinosa, P. G., Botello-Hernández, E., Pérez-García, L., Guerra-Maldonado, P., & Fabela-Rodríguez, J. H. (2022). Tumores primarios de alto grado del sistema nervioso central: análisis clínico y epidemiológico de la experiencia de un centro. *Gaceta Mexicana de Oncología*, 21, 47-53. https://www.gamo-smeo.com/frame_eng.php?id=280

- Gunawan, P. Y., Islam, A. A., July, J., Patellongi, I., Nasrum, M., & Aninditha, T. (2020). Karnofsky Performance Scale and Neurological Assessment of Neuro-Oncology Scale as Early Predictor in Glioma. *Asian Pac J Cancer Prev*, 21(11), 3387-3392. <https://doi.org/10.31557/APJCP.2020.21.11.3387>
- Hohn, S., Dozieres-Puyravel, B., & Auvin, S. (2019). History of dietary treatment from Wilder's hypothesis to the first open studies in the 1920s. *Epilepsy Behav*, 101(Pt A), 106588. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2019.106588>
- Huq, S., Khalafallah, A. M., Botros, D., Oliveira, L. A. P., White, T., Dux, H., Jimenez, A. E., & Mukherjee, D. (2021). The Prognostic Impact of Nutritional Status on Postoperative Outcomes in Glioblastoma. *World Neurosurg*, 146, e865-e875. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2020.11.033>
- Ibarretxe, D., & Masana, L. (2021). Metabolismo de los triglicéridos y clasificación de las hipertrigliceridemias. *Clínica e Investigación en Arteriosclerosis*, 33, 1-6. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arteri.2021.02.004>
- Jager-Wittenaar, H., & Ottery, F. D. (2017). Assessing nutritional status in cancer: role of the Patient-Generated Subjective Global Assessment. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*, 20(5), 322-329. <https://doi.org/10.1097/MCO.0000000000000389>
- Jiang, Z., Zhang, X., Yang, L., Li, Z., & Qin, W. (2016). Effect of restricted protein diet supplemented with keto analogues in chronic kidney disease: a systematic review and meta-analysis. *Int Urol Nephrol*, 48(3), 409-418. <https://doi.org/10.1007/s11255-015-1170-2>
- Kadakia, K. C., Symanowski, J. T., Aktas, A., Szafranski, M. L., Salo, J. C., Meadors, P. L., & Walsh, D. (2022). Malnutrition risk at solid tumor diagnosis: the malnutrition screening tool in a large US cancer institute. *Support Care Cancer*, 30(3), 2237-2244. <https://doi.org/10.1007/s00520-021-06612-z>
- Kenig, S., Petelin, A., Poklar Vatovec, T., Mohorko, N., & Jenko-Praznikar, Z. (2019). Assessment of micronutrients in a 12-wk ketogenic diet in obese adults. *Nutrition*, 67-68, 110522. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2019.06.003>
- Klement, R. J., Champ, C. E., Kammerer, U., Koebrunner, P. S., Krage, K., Schafer, G., Weigel, M., & Sweeney, R. A. (2020). Impact of a ketogenic diet intervention during radiotherapy on body composition: III-final results of the KETOCOMP study for breast cancer patients. *Breast Cancer Res*, 22(1), 94. <https://doi.org/10.1186/s13058-020-01331-5>
- Ko, G. J., Rhee, C. M., Kalantar-Zadeh, K., & Joshi, S. (2020). The Effects of High-Protein Diets on Kidney Health and Longevity. *J Am Soc Nephrol*, 31(8), 1667-1679. <https://doi.org/10.1681/ASN.2020010028>
- Lakomy, R., Kazda, T., Selingerova, I., Poprach, A., Pospisil, P., Belanova, R., Fadrus, P., Vybihal, V., Smrcka, M., Jancalek, R., Hynkova, L., Muckova, K., Hendrych, M., Sana, J., Slaby, O., & Slampa, P. (2020). Real-World Evidence in Glioblastoma: Stupp's Regimen After a Decade. *Front Oncol*, 10, 840. <https://doi.org/10.3389/fonc.2020.00840>
- Lee, H., Lee, S. Y., Mtengezo, J. T., Makin, M., Park, J. H., & Thompson, L. (2019). Cancer Screening and Diagnostic Tests in Global Contexts: Case Study and Concept Analysis. *Asia Pac J Oncol Nurs*, 6(1), 86-93. https://doi.org/10.4103/apjon.apjon_59_18
- Leonard, T. (2020). The physiology of ketosis and the ketogenic diet. *Southern African Journal of Anaesthesia and Analgesia*.
- Li, A., Lee, H. Y., & Lin, Y. C. (2019). The Effect of Ketoanalogues on Chronic Kidney Disease Deterioration: A Meta-Analysis. *Nutrients*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/nu11050957>
- Louis, D. N., Perry, A., Reifemberger, G., von Deimling, A., Figarella-Branger, D., Cavenee, W. K., Ohgaki, H., Wiestler, O. D., Kleihues, P., & Ellison, D. W. (2016). The 2016 World Health Organization Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary. *Acta Neuropathol*, 131(6), 803-820. <https://doi.org/10.1007/s00401-016-1545-1>
- Martin-McGill, K. J., Lambert, B., Whiteley, V. J., Wood, S., Neal, E. G., Simpson, Z. R., Schoeler, N. E., & Ketogenic Dietitians Research, N. (2019). Understanding the core principles of a 'modified ketogenic diet': a UK and Ireland perspective. *J Hum Nutr Diet*, 32(3), 385-390. <https://doi.org/10.1111/jhn.12637>

- Masood, W., Annamaraju, P., & Uppaluri, K. R. (2023). Ketogenic Diet. In StatPearls. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29763005>
- Mohorko, N., Cernelic-Bizjak, M., Poklar-Vatovec, T., Grom, G., Kenig, S., Petelin, A., & Jenko-Praznikar, Z. (2019). Weight loss, improved physical performance, cognitive function, eating behavior, and metabolic profile in a 12-week ketogenic diet in obese adults. *Nutr Res*, 62, 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2018.11.007>
- Montemurro, N., Perrini, P., & Rapone, B. (2020). Clinical Risk and Overall Survival in Patients with Diabetes Mellitus, Hyperglycemia and Glioblastoma Multiforme. A Review of the Current Literature. *Int J Environ Res Public Health*, 17(22). <https://doi.org/10.3390/ijerph17228501>
- Nguyen, T. T. T., Shang, E., Shu, C., Kim, S., Mela, A., Humala, N., Mahajan, A., Yang, H. W., Akman, H. O., Quinzii, C. M., Zhang, G., Westhoff, M.-A., Karpel-Massler, G., Bruce, J. N., Canoll, P., & Siegelin, M. D. (2021). Aurora kinase A inhibition reverses the Warburg effect and elicits unique metabolic vulnerabilities in glioblastoma. *Nature Communications*, 12(1), 5203. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25501-x>
- Olympios, N., Gilard, V., Marguet, F., Clatot, F., Di Fiore, F., & Fontanilles, M. (2021). TERT Promoter Alterations in Glioblastoma: A Systematic Review. *Cancers (Basel)*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/cancers13051147>
- Pascale, R. M., Calvisi, D. F., Simile, M. M., Feo, C. F., & Feo, F. (2020). The Warburg Effect 97 Years after Its Discovery. *Cancers (Basel)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/cancers12102819>
- Pérez Kast, R. C., Castro Cortez, H. D., Lozano Tavares, A., Arreguín Coronado, A., Urías Orona, V., & Castro García, H. (2021). Dieta cetogénica como alternativa en el tratamiento de la obesidad. *RESPYN Revista Salud Pública y Nutrición*, 20(3), 46-57. <https://doi.org/10.29105/respyn20.3-6>
- Rieger, J., Bahr, O., Maurer, G. D., Hattingen, E., Franz, K., Brucker, D., Walenta, S., Kammerer, U., Coy, J. F., Weller, M., & Steinbach, J. P. (2014). ERGO: a pilot study of ketogenic diet in recurrent glioblastoma. *Int J Oncol*, 44(6), 1843-1852. <https://doi.org/10.3892/ijo.2014.2382>
- Rigamonti, A., Imbesi, F., Silvani, A., Lamperti, E., Agostoni, E., Porcu, L., De Simone, I., Torri, V., Ciusani, E., Bonato, C., & Salmaggi, A. (2019). Prognostic nutritional index as a prognostic marker in glioblastoma: Data from a cohort of 282 Italian patients. *J Neurol Sci*, 400, 175-179. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2019.04.002>
- Rivas, B. A., Toledo, L. M., García Herrera, J. G., Medina Guillen, L. F., & Izaguirre González, A. I. (2021). Glioblastoma de células gigantes: informe de un caso. *Revista Médica Hondureña*, 89(Supl.1), 18-22. <https://doi.org/10.5377/rmh.v89iSupl.1.11893>
- Rojas-Morales, P., Pedraza-Chaverri, J., & Tapia, E. (2020). Ketone bodies, stress response, and redox homeostasis. *Redox Biol*, 29, 101395. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2019.101395>
- Salas Noain, J., Minupuri, A., Kulkarni, A., & Zheng, S. (2020). Significant Impact of the Ketogenic Diet on Low-Density Lipoprotein Cholesterol Levels. *Cureus*, 12(7), e9418. <https://doi.org/10.7759/cureus.9418>
- Sampaio, L. P. (2016). Ketogenic diet for epilepsy treatment. *Arq Neuropsiquiatr*, 74(10), 842-848. <https://doi.org/10.1590/0004-282X20160116>
- Santos, J. G., Da Cruz, W. M. S., Schonthal, A. H., Salazar, M. D., Fontes, C. A. P., Quirico-Santos, T., & Da Fonseca, C. O. (2018). Efficacy of a ketogenic diet with concomitant intranasal perillyl alcohol as a novel strategy for the therapy of recurrent glioblastoma. *Oncol Lett*, 15(1), 1263-1270. <https://doi.org/10.3892/ol.2017.7362>
- Schutz, Y., Montani, J. P., & Dulloo, A. G. (2021). Low-carbohydrate ketogenic diets in body weight control: A recurrent plaguing issue of fad diets? *Obes Rev*, 22 Suppl 2, e13195. <https://doi.org/10.1111/obr.13195>
- Schwartz, K., Chang, H. T., Nikolai, M., Pernicone, J., Rhee, S., Olson, K., Kurniali, P. C., Hord, N. G., & Noel, M. (2015). Treatment of glioma patients with ketogenic diets: report of two cases treated with an IRB-approved energy-restricted ketogenic diet protocol and review of the literature. *Cancer Metab*, 3, 3. <https://doi.org/10.1186/s40170-015-0129-1>

- Senhaji, N., Squalli Houssaini, A., Lamrabet, S., Louati, S., & Bennis, S. (2022). Molecular and Circulating Biomarkers in Patients with Glioblastoma. *Int J Mol Sci*, 23(13). <https://doi.org/10.3390/ijms23137474>
- Smith, K. A., Hendricks, B. K., DiDomenico, J. D., Conway, B. N., Smith, T. L., Azadi, A., & Fonkem, E. (2022). Ketogenic Metabolic Therapy for Glioma. *Cureus*, 14(6), e26457. <https://doi.org/10.7759/cureus.26457>
- Strickland, M., & Stoll, E. A. (2017). Metabolic Reprogramming in Glioma. *Front Cell Dev Biol*, 5, 43. <https://doi.org/10.3389/fcell.2017.00043>
- Tahreem, A., Rakha, A., Rabail, R., Nazir, A., Socol, C. T., Maerescu, C. M., & Aadil, R. M. (2022). Fad Diets: Facts and Fiction. *Front Nutr*, 9, 960922. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.960922>
- Tan-Shalaby, J. (2017). Ketogenic Diets and Cancer: Emerging Evidence. *Fed Pract*, 34(Suppl 1), 37S-42S. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30766299>
- Teigen, L. M., DiCecco, S. R., Vock, D. M., Vierow, K. L., Andrews, L., Hammel, K. D., Sfeir, J. G., Miles, J. M., & Hurley, D. L. (2018). Use of both quantitative and qualitative methods to improve assessment of resting energy expenditure equation performance in hospitalized adults. *Clin Nutr ESPEN*, 24, 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2018.01.001>
- Thompson, K. L., Elliott, L., Fuchs-Tarlovsky, V., Levin, R. M., Voss, A. C., & Piemonte, T. (2017). Oncology Evidence-Based Nutrition Practice Guideline for Adults. *J Acad Nutr Diet*, 17(2), 297-310 e247. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2016.05.010>
- Vaupel, P., & Multhoff, G. (2021). Revisiting the Warburg effect: historical dogma versus current understanding. *J Physiol*, 599(6), 1745-1757. <https://doi.org/10.1113/jp278810>
- Vaupel, P., Schmidberger, H., & Mayer, A. (2019). The Warburg effect: essential part of metabolic reprogramming and central contributor to cancer progression. *Int J Radiat Biol*, 95(7), 912-919. <https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1589653>
- Watanabe, M., Tuccinardi, D., Ernesti, I., Basciani, S., Mariani, S., Genco, A., Manfrini, S., Lubrano, C., & Gnessi, L. (2020). Scientific evidence underlying contraindications to the ketogenic diet: An update. *Obes Rev*, 21(10), e13053. <https://doi.org/10.1111/obr.13053>
- Weber, D. D., Aminazdeh-Gohari, S., & Kofler, B. (2018). Ketogenic diet in cancer therapy. *Aging (Albany NY)*, 10(2), 164-165. <https://doi.org/10.18632/aging.101382>
- Weber, D. D., Aminzadeh-Gohari, S., Tulipan, J., Catalano, L., Feichtinger, R. G., & Kofler, B. (2020). Ketogenic diet in the treatment of cancer - Where do we stand? *Mol Metab*, 33, 102-121. <https://doi.org/10.1016/j.molmet.2019.06.026>
- Zuccoli, G., Marcello, N., Pisanello, A., Servadei, F., Vaccaro, S., Mukherjee, P., & Seyfried, T. N. (2010). Metabolic management of glioblastoma multiforme using standard therapy together with a restricted ketogenic diet: Case Report. *Nutr Metab (Lond)*, 7, 33. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-7-33>

EL ESTRÉS Y SU RELACIÓN CON ALGUNAS PATOLOGÍAS ASOCIADAS A LA REPRODUCCIÓN FEMENINA

STRESS AND ITS RELATIONSHIP WITH SOME
PATHOLOGIES ASSOCIATED WITH FEMALE
REPRODUCTION

María Esmeralda Rivera Castro(1)
Juan Manuel Bravo Benítez (1)
César Feliciano Pastelín Rojas (2)
Carolina Morán Raya (1)

<https://orcid.org/0000-0003-4468-8858>
<https://orcid.org/0000-0003-2396-7890>
<https://orcid.org/0000-0002-9501-2017>
<https://orcid.org/0000-0002-2023-2242>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP

Recibido: 20/diciembre/ 2023

Aprobado: 26/febrero/ 2024

Publicado: 7/marzo/ 2024

(1)Laboratorio de Aplicaciones Biomédicas, Centro de Investigación en Físicoquímica de Materiales, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. Av. San Claudio 1814, Jardines de San Manuel, 72570, Puebla, Pue.

(2)Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. Tecamachalco - Cañada Morelos Km. 7.5, El Salado, 75460 Tecamachalco, Pue.
esmeriverac@gmail.com

juan.bravob@correo.buap.mx

cesar.pastelin@correo.buap.mx

carolina.moran@correo.buap.mx

RESUMEN

El estrés es uno de los factores debilitantes más comunes en la actualidad. Es conocido que el sistema de respuesta al estrés causa modificaciones bioquímicas en la homeostasis del organismo, alterando la comunicación de distintas áreas del sistema nervioso central, como el hipotálamo, con el sistema nervioso periférico. El estrés promueve agotamiento, fatiga, tensión laboral, desequilibrio emocional y condiciones psicosociales adversas, pudiendo desencadenar patologías que incluyen cambios en el metabolismo como depresión, obesidad, modificaciones en la comunicación nerviosa. Así como variaciones en las concentraciones de distintas hormonas como la GnRH, FSH, LH y hormonas esteroides, las cuales están directamente relacionadas con el funcionamiento de los ovarios y la reproducción. Las fluctuaciones fisiológicas causadas por el estrés provocan cambios en el sistema reproductor femenino, causando alteraciones sobre los ciclos reproductivos, la síntesis de hormonas esteroides y la liberación de ovocitos, así como en la gestación y en el desarrollo del embrión.

Palabras claves: Estrés, ovario, reproducción, cortisol, desórdenes reproductivos

INTRODUCCIÓN

El estrés es un factor que ha ayudado al desarrollo del ser humano como especie, ya que biológicamente se ha desarrollado como un sistema de defensa que permite actuar en situaciones que ponen en peligro la vida; sin embargo, en los últimos años se ha incrementado esta condición de forma crónica en la mayoría de las personas, debido a diversos factores como la presión social, laboral, económica y las condiciones medioambientales. Su importancia como tema de salud pública radica en que los efectos negativos que promueve en situaciones prolongadas o crónicas causan daños a la salud de las personas que lo sufren.

ABSTRACT

Stress is one of the most common debilitating factors today. It is known that the stress response system causes biochemical modifications in the organism's homeostasis, altering communication between different areas of the central nervous system, such as the hypothalamus, and the peripheral nervous system. Stress promotes exhaustion, fatigue, job strain, emotional imbalance, and adverse psychosocial conditions, potentially triggering pathologies that include changes in metabolism such as depression, obesity, modifications in nervous communication. As well as variations in the concentrations of various hormones such as GnRH, FSH, LH, and steroid hormones, which are directly related to the functioning of the ovaries and reproduction. Physiological fluctuations caused by stress induce changes in the female reproductive system, affecting reproductive cycles, synthesis of steroid hormones, release of ova, as well as in gestation and embryo development.

Keywords: Stress, ovary, reproduction, cortisol, reproductive disorders

Para comprender la relación entre el estrés y la reproducción, así como las condiciones adversas que este factor puede provocar, se hizo un análisis buscando en diversas fuentes científicas como PubMed, Scopus, Google Scholar, SciELO y Redalyc. Donde se encontró un gran número de evidencias que mencionan esta relación fisiológica que describen la relación que existe entre el estrés, los ovarios, la fertilidad, y las patologías o enfermedades relacionadas con el estrés y la salud reproductiva.



El estrés en las mujeres se origina por diversas causas entre las que se encuentran factores emocionales, familiares, laborales o medioambientales, muchas mujeres padecen estos efectos negativos de forma crónica, los cuales repercuten en su salud. Imagen tomada de: https://dentalwellnessgroup.com/wp-content/uploads/2017/03/tmj-dizziness_tmj-disorder-causes-dizziness.jpg

Características del estrés y su relación clínica

En la medicina actual, el concepto “estrés” no se define como una enfermedad clínica, sino como una serie de condiciones que afectan al individuo y que pueden provocar que el cuerpo reaccione a los factores estresantes de diversas maneras, incluyendo anomalías cardíacas, depresión, sentimientos de angustia, entre otros (Järvelin-Pasanen et al., 2018; Vitaliano et al., 1987; Yang et al., 2015).

De manera general para el estrés se ha clasificado en tres categorías distintas: la primera son factores estresantes y se refiere a eventos y condiciones negativas que puede sufrir un individuo; la segunda es el estrés percibido, el cual consiste en la experiencia subjetiva individual y finalmente los síntomas de estrés, que son las reacciones fisiológicas y mentales.

Como respuesta a estas situaciones, existen una serie de eventos que movilizan los sistemas hormonales activando respuestas adaptativas que son fundamentales para la vida, en 1950 se describió el sistema de adaptación general relacionado con el estrés, el cual consta de tres etapas: la primera es la de reacción de alarma, la segunda es la de resistencia y tercera consiste en la etapa de agotamiento (Selye, 1950).

Se puede resumir que el estrés es un estado de desarmonía en el organismo, donde se altera la homeostasis debido a estímulos internos o externos llamados estresores. Esta condición coordina respuestas adaptativas del organismo frente a los factores estresantes de cualquier tipo, con el objetivo de restaurar la homeostasis y activar en el organismo

diversas respuestas endocrinas, nerviosas y del sistema inmune, lo cual se conoce como respuesta al estrés (Carrasco & Van de Kar, 2003).

El grado de respuesta al estrés depende del tipo de estresores y de diversos factores adicionales como el tiempo de duración, la

predisposición genética, la personalidad, la experiencia previa, la condición social e incluso la forma de afrontar las circunstancias estresantes. De esta manera, la coordinación del estrés es influenciada por funciones fisiológicas centrales y periféricas para la adaptación y sobrevivencia (Chrousos & Gold, 1992; Valsamakis et al., 2019).

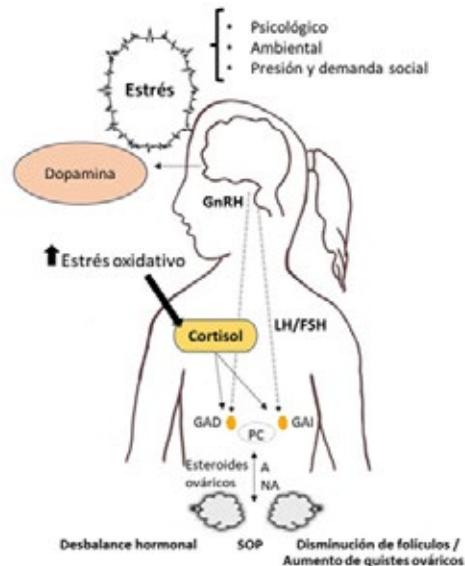
Factores causales del estrés

Existen factores que causan mayor riesgo de condiciones estresantes que provocan la liberación de las hormonas asociadas al estrés, que son la adrenalina y el cortisol. Dentro de estos, se encuentran principalmente el estrés psicológico o emocional, el uso de drogas o alcohol, la exposición ambiental a sustancias peligrosas o nocivas para el organismo y una de las causas que se suman con mayor incidencia en las últimas décadas es el estrés laboral u ocupacional (Sharma et al., 2013). Este genera circunstancias desfavorables para la salud y repercute en el organismo, provocando malestares que tienen efectos negativos en la fisiología, incluido el agotamiento o fatiga constante y tensión general, sumado a un desequilibrio emocional en el sistema de recompensas (Bültmann et al., 2013; Head et al., 2007).

El sistema de recompensas o sistema mesolímbico es un proceso natural durante el cual el cerebro asocia diversos estímulos (sustancias, situaciones, eventos o actividades) con un resultado positivo o deseable, lo que provoca incluso cambios en el comportamiento de un individuo y que de forma regular, las personas buscarán obtener ese estímulo positivo placentero (Robbins & Everitt, 1996).

En este sistema, la dopamina es el neurotransmisor con mayor participación, por ello, ante acontecimientos estresantes, se suele incluir aversión o evitación como respuesta a la situación que provoca estrés, y esto puede regular negativamente a la

neurotransmisión dopaminérgica, provocando conductas negativas del individuo (Baik, 2020; Beninger & Miller, 1998).



El estrés incrementa la liberación de hormonas como cortisol, adrenalina y noradrenalina que afectan a los ovarios por el incremento de los pulsos de GnRH, que modifica la liberación de dopamina y de las hormonas LH y FSH, provocando una modificación sobre los esteroides ováricos. GnRH hormona liberadora de gonadotropinas, LH hormona luteinizante, FSH hormona folículo estimulante, GAD, glándula adrenal derecha, GAI glándula adrenal izquierda, PC plexo celiaco, A adrenalina, NA noradrenalina, SOP síndrome de ovario poliquístico. Imagen modificada de Pandey et al., 2018.

El estrés tiene dimorfismo sexual

La respuesta al estrés es distinta en hombres y mujeres debido a causas genéticas y hormonales (Bale & Epperson, 2015; Matud, 2004). Para el caso de las mujeres, el estrés puede ocasionar reacciones más severas (como fatiga, dolor de cabeza, cansancio excesivo, problemas en el ciclo menstrual) en comparación con los hombres (Thorsen et al., 2019), probablemente causados por factores de vulnerabilidad debido a factores biológicos y bioquímicos (Arenas & Puigcerver, 2009). Además, el estrés puede ser un desencadenante de la depresión mayor, donde se observa la activación del principal sistema hormonal del estrés, el eje hipotalámico-hipófisis-adrenal (HPA) que es sexualmente dimórfico (Kendler et al., 1995).

Factores neurales involucrados en la respuesta al estrés

Cuando se presentan situaciones estresantes, el eje HPA ocasiona una respuesta de lucha/huida, la cual se debe a la secreción de las hormonas suprarrenales (cortisol, adrenalina, noradrenalina) y al sistema simpático y parasimpático (Carrasco & Van de Kar, 2003). La respuesta endocrina se origina en el sistema nervioso central y órganos periféricos a través de la vía noradrenérgica del sistema nervioso autónomo (SNA) (Chrousos & Gold, 1992). Adicionalmente, participan otros componentes como la hormona liberadora de corticotropina parvocelular (CRH), las neuronas de arginina y vasopresina del núcleo paraventricular del hipotálamo (PVN) así como las neuronas CRH de los núcleos paragigantocelular y parabranquial de la médula así como grupos de neuronas catecolaminérgicas de la médula, la protuberancia y la amígdala (Berridge & Waterhouse, 2003), (Davis, 1993). Uno de los centros con mayor regulación de la CRH es la amígdala, que envía señales nerviosas al tronco encefálico para que libere catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) (Tsigos & Chrousos, 2002) y al hipotálamo donde se libera la hormona adrenocorticotropa (ACTH), que estimula la liberación de cortisol en la corteza suprarrenal (Jankord & Herman, 2008).

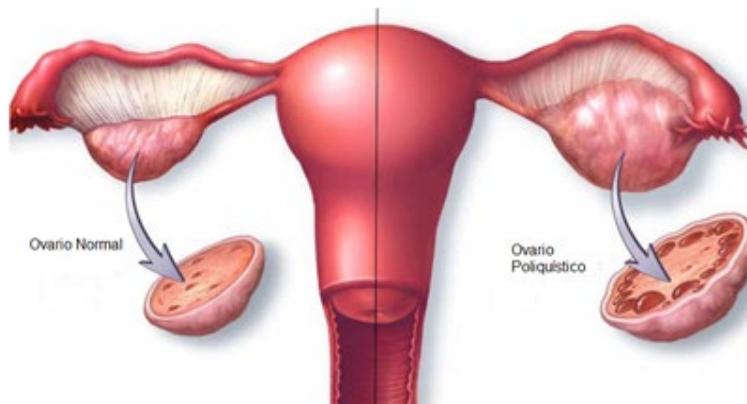
Al distribuirse a través de los vasos sanguíneos, las catecolaminas incrementan la frecuencia cardiaca, la presión arterial y la respiración, además existen otros cambios fisiológicos como el incremento en la sudoración y dilatación de las pupilas (Vinik et al., 2011). También participan los neurotransmisores simpáticos (acetilcolina y noradrenalina), los cuales regulan la respuesta inicial en condiciones de estrés agudo (el cual se caracteriza por ser una afección que ocurre después de un evento traumático y es de corta duración) (Sorrells et al., 2009). Ante situaciones estresantes, las modificaciones en el sistema nervioso central (SNC) y el sistema nervioso periférico (SNP) tendrán un impacto bioquímico en las gónadas por la liberación de los neurotransmisores involucrados, teniendo como consecuencia una síntesis y liberación alterada de enzimas

y hormonas ováricas involucrando al eje hipotálamo- hipófisis- ovario (HPO); donde participan esteroides sexuales (andrógenos, estrógenos y progesterona), glucocorticoides y mineralocorticoides que tienen como principal efecto modular diversas funciones reproductivas y se sintetizan principalmente en las glándulas suprarrenales, las gónadas, la placenta y el SNC (Gómez-Chang et al., 2012).

Los factores estresantes continuos pueden conducir al desarrollo de depresión mayor, cuya fisiopatología está relacionada con alteraciones en la síntesis y neurotransmisión de la serotonina y por consiguiente, se desarrollan una serie de patologías asociadas con la regulación hormonal (Mahar et al., 2014). Como consecuencia de la liberación de las hormonas del estrés (cortisol, cortisona, adrenalina y noradrenalina) en conjunto con las citocinas proinflamatorias, alteran el metabolismo (Dell'Osso et al., 2016), además de la liberación excesiva de glucocorticoides (Lupien et al., 2009).

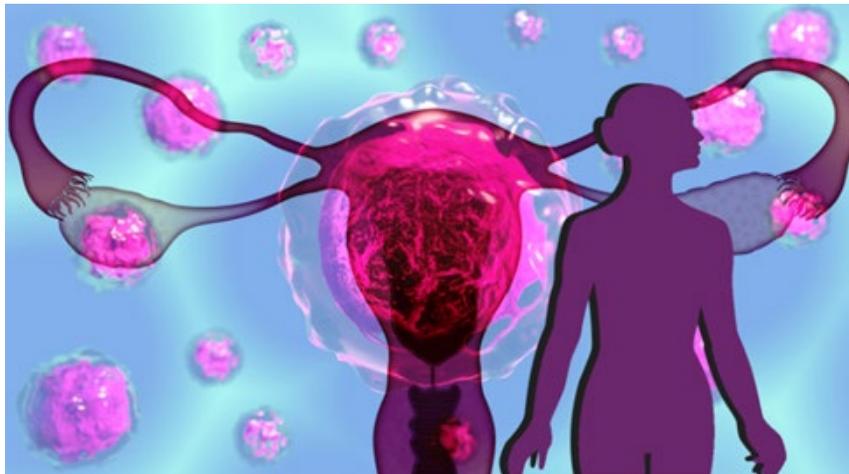
El estrés como factor causal de enfermedades y alteraciones fisiológicas

La relación entre los problemas metabólicos y reproductivos con patologías psicológicas y factores ambientales como el estrés no se ha definido completamente. Las hormonas liberadas ante sucesos estresantes afectan el estado físico y mental de una persona sana modificando el metabolismo y la homeostasis. En las mujeres, se han evaluado los efectos del estrés asociados con patologías que afectan la salud reproductiva y otras patologías como depresión, el síndrome de ovario poliquístico (SOP), endometriosis, problemas de fertilidad y otros padecimientos, los cuales provocan irregularidades menstruales, dolor pélvico crónico, dismenorrea, dispareunia e infertilidad (Laganà et al., 2017).



Se muestra la diferencia entre un ovario normal y uno con múltiples quistes, característico del síndrome de ovario poliquístico (SOP) Imagen modificada de: <https://neucradhealth.in/language/en/stress-and-polycystic-ovarian-syndrome-pcos/>

El SOP es un trastorno endocrino heterogéneo que afecta aproximadamente a una de cada 15 mujeres en todo el mundo. La principal alteración endocrina es la secreción y actividad excesiva de andrógenos. En una gran proporción de mujeres con este trastorno, también se presenta actividad anormal de la insulina. Entre las patologías más asociadas a este síndrome se encuentran la disfunción menstrual, infertilidad, hirsutismo, acné, obesidad y síndrome metabólico (Norman et al., 2007). En las mujeres que presentan alteraciones metabólicas, se desencadena una liberación incrementada de la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH), producto de la alta concentración de las catecolaminas sobre el organismo, provocando un desequilibrio hormonal heterogéneo.



La alteración del eje endocrino en conjunto con el sistema nervioso central y periférico puede provocar diversos cambios en los ovarios, entre ellos el desarrollo de quistes que pueden dar origen a algún tipo de cáncer en el sistema reproductor femenino. Imagen tomada de: https://researchmatters.in/sites/researchmatters.in/files/ovarian_cancer.png

La alteración del eje neuroendocrino HPO, provoca que las mujeres tengan disfunción ovárica, problemas emocionales, ansiedad, cambios de humor repentinos, entre otros padecimientos como obesidad y desbalance en la liberación de hormonas, características que están estrechamente asociadas con las mujeres diagnosticadas con SOP (Angelino de Blanco et al., 2007; Ilie, 2020; Liao et al., 2021; Pandey et al., 2018) (Fig.1). Sumado a ello, ante la exposición de experiencias estresantes y en tratamientos como la ovariectomía, se ha observado una privación prolongada de hormonas ováricas que puede representar un factor de riesgo para el desarrollo de síntomas depresivos y de ansiedad (Lagunas et al., 2010).

ESTRÉS Y FERTILIDAD

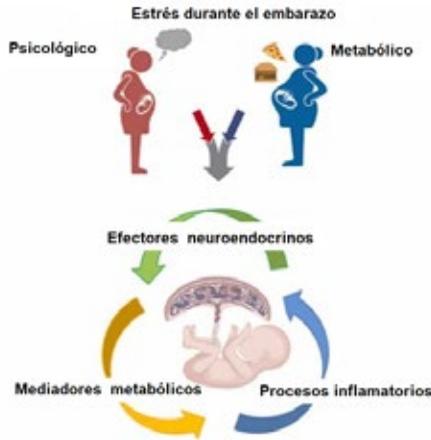
El estrés agudo frecuentemente conduce a estrés psicológico crónico (que es por un periodo prolongado, en comparación con el agudo, tiene mayor probabilidad de afectar el sistema cardiaco, diabetes, obesidad, y otras enfermedades crónicas). Se ha visto que el estrés origina deficiencia en la fertilización del ovocito en estudios de fecundación in vitro, lo que sugiere que el factor estresante tiene impacto negativo sobre los ovarios o sobre los ovocitos directamente (Demyttenaere et al., 1992; Lakatos et al., 2015). En el eje HPO, los factores estresantes afectan e interfieren con el curso temporal de la liberación de hormonas reproductivas. En modelos animales, se ha observado un comportamiento sexual alterado, un incremento en los niveles de prolactina, progesterona, corticosterona y ACTH en el plasma sanguíneo (Dobson et al., 2012; Wagenmaker & Moenter, 2017), así como la biosíntesis de GnRH y su receptor (GnRHR), lo que modifica la secreción de LH. Si hay disminución de GnRH y LH, se limita la disponibilidad de gonadotropina al folículo ovárico, reduciendo la producción de estradiol (Dobson & Smith, 2000). Además, el estrés agudo o crónico se relaciona con el bloqueo, inhibición o retraso del pico preovulatorio de LH, lo que interrumpe el ciclo menstrual en el caso de las mujeres o ciclo estral en otros mamíferos (Mahesh & Brann, 1998).

Al analizar el origen de los abortos espontáneos en mujeres de diversas edades, se observó que la mayoría estuvieron relacionados con condiciones estresantes y con el estrés percibido, de tipo emocional o psicológico. Desafortunadamente, no existen registros médicos a través de los cuales se pueda analizar la condición fisiológica antes del aborto para conocer la situación neuroendocrinológica de esas mujeres con abortos.

Sin embargo, en un estudio donde se analizaron a mujeres en el período previo a la concepción las cuales presentaron niveles altos de alfa-amilasa salival (sAA) que es un biomarcador de estrés, se encontró que dichas mujeres experimentaron una disminución del 29% en la fecundidad, o bien, un aumento en el tiempo para lograr el embarazo, en comparación con las mujeres con niveles más bajos de sAA (Lynch et al., 2018).

Por ejemplo, las mujeres diagnosticadas con la enfermedad de Cushing (hiperplasia de la hipófisis) tienen dificultades para mantener un embarazo por los altos niveles de cortisol que tiene su organismo (Lindsay y Nieman, 2005). Esta sobreexpresión de cortisol, también se ha relacionado con disfunción placentaria comprometida y con resultados adversos en el embarazo (Seckl y Holmes, 2007).

El incremento en las concentraciones de cortisol asociado al estrés en mujeres embarazadas implica mayor concentración de adrenalina circulante, que en conjunto pueden originar un embarazo complejo e incluso en enfermedades cardiovasculares (ECV). Sumado a ello, el aumento de andrógenos en mujeres con síndrome de ovario poliquístico (SOP), puede originar un mayor riesgo para el desarrollo de síndrome metabólico (Greiner et al., 2005). Estas condiciones metabólicas alteradas persisten en mujeres con SOP incluso en la etapa postmenopáusica temprana (Markopoulos et al., 2011).



Los factores estresantes en la mujer embarazada pueden provocar modificaciones en el metabolismo del embrión, causando riesgo de aborto o bien, embriones con riesgo de alteraciones en su genoma que pueden alterar la integridad estructural y funcional del cerebro en desarrollo. Imagen modificada de Musillo et al., 2022.

ESTRÉS DURANTE EL DESARROLLO EMBRIONARIO

En relación con la condición epigenética, se sugiere que las condiciones estresantes o no estresantes que se tengan durante el desarrollo temprano en los humanos (periodos de vida embrionaria, fetal y posnatal) interactúan con el genoma y pueden alterar la integridad estructural y funcional del cerebro en desarrollo y de los sistemas periféricos (Shalev et al., 2013); esta condición se observa en longitud de los telómeros cromosómicos y la actividad de la enzima telomerasa, la cual, durante el desarrollo del embrión está influenciado por las condiciones intrauterinas, incluyendo estímulos estresantes que pueden estar implicados en la programación de este sistema biológico (Entringer et al., 2012).

Sumado a ello, se sabe que los embriones en desarrollo son más vulnerables al estrés durante los períodos de implantación y placentación (Hjöllund et al., 2000; Nepomnaschy et al., 2007); lo cual puede deberse a que el estrés disminuye la fase lútea en las mujeres, originando niveles bajos de progesterona que no permiten la implantación del embrión (Hatch et al., 1999).

CONCLUSIÓN

El sistema reproductor femenino y los órganos que lo conforman están vinculados a distintos procesos neurales y endocrinos. La homeostasis del organismo permite que se originen condiciones idóneas para permitir la maduración folicular y tener un ovocito maduro listo para originar un

nuevo organismo. Las alteraciones en alguno de los procesos metabólicos originan que esta función no se realice correctamente o bien que se desencadenen diversas patologías asociadas a los ejes neuroendocrinos vinculados con los ovarios como el HPA y HPO.

El estrés, en conjunto con las hormonas esteroides y neuropéptidos asociados, se ha convertido en un factor importante para explicar problemas relacionados con la fertilidad, enfermedades gastrointestinales y cardiovasculares. Estas alteraciones pueden ser tratadas con terapias psicológicas y en caso de diagnóstico clínico con ayuda farmacológica (Mulder et al., 2002; Nepomnaschy et al., 2007).

Las mujeres, en comparación con los hombres, presentan con mayor intensidad los síntomas adversos causados por el estrés, por lo que es necesario un diagnóstico y tratamiento apropiado para promover prácticas laborales y sociales que incluyan un mejor desarrollo para este grupo poblacional. Sumado a ello, es recomendable disminuir los factores estresantes en las mujeres embarazadas, ya que como se enfatiza en diversos estudios, estos cambios fisiológicos pueden provocar que el embrión sufra alteraciones genómicas relacionadas con la epigenética, producto de la exposición a las hormonas como el cortisol y adrenalina.

El estrés es un factor que influye sobre los individuos y afecta negativamente diferentes aspectos, incluyendo los sociales, conductuales, fisiológicos y reproductivos. En las mujeres la afectación es mayor debido a la participación de diferentes hormonas y neurotransmisores como el cortisol y las catecolaminas, ocasionando diversas enfermedades que influyen en su calidad de vida y en su salud integral.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

REFERENCIAS

- Angelino de Blanco, M. C., Febres Balestrini, F., Molina Vilchez, R., & Francis Santos, M. L. (2007). Etiopatogenia del síndrome de ovario poliquístico. *Revista Venezolana de Endocrinología y Metabolismo*, 5(3), 9-15.
- Arenas, M. C., & Puigcerver, A. (2009). Diferencias entre hombres y mujeres en los trastornos de ansiedad: Una aproximación psicobiológica. *Escritos de Psicología (Internet)*, 3(1), 20-29.
- Baik, J.-H. (2020). Stress and the dopaminergic reward system. *Experimental & Molecular Medicine*, 52(12), Article 12. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-00532-4>
- Bale, T. L., & Epperson, C. N. (2015). Sex differences and stress across the lifespan. *Nature Neuroscience*, 18(10), 1413-1420. <https://doi.org/10.1038/nn.4112>
- Beninger, R. J., & Miller, R. (1998). Dopamine D1-like receptors and reward-related incentive learning. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 22(2), 335-345. [https://doi.org/10.1016/s0149-7634\(97\)00019-5](https://doi.org/10.1016/s0149-7634(97)00019-5)
- Berridge, C. W., & Waterhouse, B. D. (2003). The locus coeruleus–noradrenergic system: Modulation of behavioral state and state-dependent cognitive processes. *Brain Research Reviews*, 42(1), 33-84. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(03\)00143-7](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(03)00143-7)
- Biomarkers of preconception stress and the incidence of pregnancy loss | *Human Reproduction* | Oxford Academic. (s. f.). Recuperado 4 de noviembre de 2022
- Bültmann, U., Nielsen, M. B. D., Madsen, I. E. H., Burr, H., & Rugulies, R. (2013). Sleep disturbances and fatigue: Independent predictors of sickness absence? A prospective study among 6538 employees. *European Journal of Public Health*, 23(1), 123-128. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckr207>
- Carrasco, G. A., & Van de Kar, L. D. (2003). Neuroendocrine pharmacology of stress. *European Journal of Pharmacology*, 463(1-3), 235-272. [https://doi.org/10.1016/s0014-2999\(03\)01285-8](https://doi.org/10.1016/s0014-2999(03)01285-8)
- Chrousos, G. P., & Gold, P. W. (1992). The concepts of stress and stress system disorders. Overview of physical and behavioral homeostasis. *JAMA*, 267(9), 1244-1252.
- Davis, C. A. (1993). A simple model for the formation of compressive stress in thin films by ion bombardment. *Thin Solid Films*, 226(1), 30-34. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90201-Y](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90201-Y)
- Dell'Osso, L., Abelli, M., Carpita, B., Pini, S., Castellini, G., Carmassi, C., & Ricca, V. (2016). Historical evolution of the concept of anorexia nervosa and relationships with orthorexia nervosa, autism, and obsessive–compulsive spectrum. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 12. <https://doi.org/10.2147/NDT.S108912>
- Demyttenaere, K., Nijs, P., Evers-Kiebooms, G., & Koninckx, P. R. (1992). Coping and the ineffectiveness of coping influence the outcome of in vitro fertilization through stress responses. *Psychoneuroendocrinology*, 17(6), 655-665. [https://doi.org/10.1016/0306-4530\(92\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0306-4530(92)90024-2)
- Dobson, H., Fergani, C., Routly, J. E., & Smith, R. F. (2012). Effects of stress on reproduction in ewes. *Animal Reproduction Science*, 130(3-4), 135-140. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2012.01.006>
- Dobson, H., & Smith, R. F. (2000). What is stress, and how does it affect reproduction? *Animal Reproduction Science*, 60-61, 743-752. [https://doi.org/10.1016/s0378-4320\(00\)00080-4](https://doi.org/10.1016/s0378-4320(00)00080-4)
- Entringer, S., Buss, C., & Wadhwa, P. D. (2012). Prenatal stress, telomere biology, and fetal programming of health and disease risk. *Science Signaling*, 5(248), pt12. <https://doi.org/10.1126/scisignal.2003580>
- Gómez-Chang, E., Larrea, F., & Martínez-Montes, F. (2012). Vías de señalización asociadas a la esteroidogénesis. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 15(1), 24-36.
- Greiner, M., Paredes, A., Araya, V., & Lara, H. E. (2005). Role of stress and sympathetic innervation in the development of polycystic ovary syndrome. *Endocrine*, 28(3), 319-324. <https://doi.org/10.1385/ENDO:28:3:319>
- Hatch, M. C., Figa-Talamanca, I., & Salerno, S. (1999). Work stress and menstrual patterns among American and Italian nurses. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 25(2), 144-150. <https://doi.org/10.5271/sjweh.417>

- Head, J., Kivimäki, M., Siegrist, J., Ferrie, J. E., Vahtera, J., Shipley, M. J., & Marmot, M. G. (2007). Effort-reward imbalance and relational injustice at work predict sickness absence: The Whitehall II study. *Journal of Psychosomatic Research*, 63(4), 433-440. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2007.06.021>
- Hjöllund, N. H., Jensen, T. K., Bonde, J. P., Henriksen, T. B., Andersson, A. M., Kolstad, H. A., Ernst, E., Giwercman, A. J., Skakkebaek, N. E., & Olsen, J. (2000). [Stress and fertility. A follow-up study among couples planning the first pregnancy]. *Ugeskrift for Laeger*, 162(38), 5081-5086.
- Ilie, I. R. (2020). Neurotransmitter, neuropeptide and gut peptide profile in PCOS-pathways contributing to the pathophysiology, food intake and psychiatric manifestations of PCOS. *Advances in Clinical Chemistry*, 96, 85-135. <https://doi.org/10.1016/bs.acc.2019.11.004>
- Jankord, R., & Herman, J. P. (2008). Limbic regulation of hypothalamo-pituitary-adrenocortical function during acute and chronic stress. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1148, 64-73. <https://doi.org/10.1196/annals.1410.012>
- Järvelin-Pasanen, S., Sinikallio, S., & Tarvainen, M. P. (2018). Heart rate variability and occupational stress-systematic review. *Industrial Health*, 56(6), 500-511. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2017-0190>
- Kendler, K. S., Kessler, R. C., Walters, E. E., Maclean, C., Neale, M. C., Heath, A. C., & Eaves, L. J. (1995). Stressful life events, genetic liability, and onset of an episode of major depression in women. *The American Journal of Psychiatry*, 152(6), 833-842. <https://doi.org/10.1176/ajp.152.6.833>
- Laganà, A. S., La Rosa, V. L., Rapisarda, A. M. C., Valenti, G., Sapia, F., Chiofalo, B., Rossetti, D., Ban Frangež, H., Vrtačnik Bokal, E., & Vitale, S. G. (2017). Anxiety and depression in patients with endometriosis: Impact and management challenges. *International Journal of Women's Health*, 9, 323-330. <https://doi.org/10.2147/IJWH.S119729>
- Lagunas, N., Calmarza-Font, I., Diz-Chaves, Y., & Garcia-Segura, L. M. (2010). Long-term ovariectomy enhances anxiety and depressive-like behaviors in mice submitted to chronic unpredictable stress. *Hormones and Behavior*, 58(5), 786-791. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2010.07.014>
- Lakatos, E., Szabó, G., F Szigeti, J., & Balog, P. (2015). [Relationships between psychological well-being, lifestyle factors and fertility]. *Orvosi Hetilap*, 156(12), 483-492. <https://doi.org/10.1556/OH.2015.30104>
- Liao, B., Qiao, J., & Pang, Y. (2021). Central Regulation of PCOS: Abnormal Neuronal-Reproductive-Metabolic Circuits in PCOS Pathophysiology. *Frontiers in Endocrinology*, 12. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fendo.2021.667422>
- Lindsay, J. R., & Nieman, L. K. (2005). The hypothalamic-pituitary-adrenal axis in pregnancy: Challenges in disease detection and treatment. *Endocrine Reviews*, 26(6), 775-799. <https://doi.org/10.1210/er.2004-0025>
- Lynch CD, Sundaram R, Buck Louis GM. Biomarkers of preconception stress and the incidence of pregnancy loss. *Hum Reprod*. 2018 Apr 1;33(4):728-735. doi: 10.1093/humrep/dey030. PMID: 29490045; PMCID: PMC6065502
- Lupien, S. J., McEwen, B. S., Gunnar, M. R., & Heim, C. (2009). Effects of stress throughout the lifespan on the brain, behaviour and cognition. *Nature Reviews. Neuroscience*, 10(6), 434-445. <https://doi.org/10.1038/nrn2639>
- Mahar, I., Bambico, F. R., Mechawar, N., & Norega, J. N. (2014). Stress, serotonin, and hippocampal neurogenesis in relation to depression and antidepressant effects. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 38, 173-192. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.11.009>
- Mahesh, V. B., & Brann, D. W. (1998). Regulation of the preovulatory gonadotropin surge by endogenous steroids. *Steroids*, 63(12), 616-629. [https://doi.org/10.1016/s0039-128x\(98\)00075-0](https://doi.org/10.1016/s0039-128x(98)00075-0)
- Markopoulos, M. C., Rizos, D., Valsamakis, G., Deligeoroglou, E., Grigoriou, O., Chrousos, G. P., Creatsas, G., & Mastorakos, G. (2011). Hyperandrogenism in women with polycystic ovary syndrome persists after menopause. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 96(3), 623-631. <https://doi.org/10.1210/jc.2010-0130>
- Matud, M. P. (2004). Gender differences in stress and coping styles. *Personality and Individual Differences*, 37, 1401-1415. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2004.01.010>

- Mulder, E. J. H., Robles de Medina, P. G., Huizink, A. C., Van den Bergh, B. R. H., Buitelaar, J. K., & Visser, G. H. A. (2002). Prenatal maternal stress: Effects on pregnancy and the (unborn) child. *Early Human Development*, 70(1-2), 3-14. [https://doi.org/10.1016/s0378-3782\(02\)00075-0](https://doi.org/10.1016/s0378-3782(02)00075-0)
- Musillo, C., Berry, A. & Cirulli, F. (2022). Prenatal psychological or metabolic stress increases the risk for psychiatric disorders: the "funnel effect" model. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, Volume 136,104624, ISSN 0149-7634, <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104624>.
- Nepomnaschy, P. A., Sheiner, E., Mastorakos, G., & Arck, P. C. (2007). Stress, immune function, and women's reproduction. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1113, 350-364. <https://doi.org/10.1196/annals.1391.028>
- Norman, R. J., Dewailly, D., Legro, R. S., & Hickey, T. E. (2007). Polycystic ovary syndrome. *Lancet (London, England)*, 370(9588), 685-697. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61345-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61345-2)
- Pandey, A. K., Gupta, A., Tiwari, M., Prasad, S., Pandey, A. N., Yadav, P. K., Sharma, A., Sahu, K., Asrafuzzaman, S., Vengayil, D. T., Shrivastav, T. G., & Chaube, S. K. (2018). Impact of stress on female reproductive health disorders: Possible beneficial effects of shatavari (*Asparagus racemosus*). *Biomedicine & Pharmacotherapy = Biomedicine & Pharmacotherapie*, 103, 46-49. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.04.003>
- Robbins, T. W., & Everitt, B. J. (1996). Neurobehavioural mechanisms of reward and motivation. *Current Opinion in Neurobiology*, 6(2), 228-236. [https://doi.org/10.1016/s0959-4388\(96\)80077-8](https://doi.org/10.1016/s0959-4388(96)80077-8)
- Seckl, J. R., & Holmes, M. C. (2007). Mechanisms of disease: Glucocorticoids, their placental metabolism and fetal «programming» of adult pathophysiology. *Nature Clinical Practice. Endocrinology & Metabolism*, 3(6), 479-488. <https://doi.org/10.1038/ncpendmet0515>
- Selye, H. (1950). Stress and the General Adaptation Syndrome. *British Medical Journal*, 1(4667), 1383-1392.
- Shalev, I., Entringer, S., Wadhwa, P. D., Wolkowitz, O. M., Puterman, E., Lin, J., & Epel, E. S. (2013). Stress and telomere biology: A lifespan perspective. *Psychoneuroendocrinology*, 38(9), 1835-1842. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2013.03.010>
- Sharma, V. K., Trakroo, M., Subramaniam, V., Rajajeyakumar, M., Bhavanani, A. B., & Sahai, A. (2013). Effect of fast and slow pranayama on perceived stress and cardiovascular parameters in young health-care students. *International Journal of Yoga*, 6(2), 104-110. <https://doi.org/10.4103/0973-6131.113400>
- Sorrells, S. F., Caso, J. R., Munhoz, C. D., & Sapolsky, R. M. (2009). The stressed CNS: When glucocorticoids aggravate inflammation. *Neuron*, 64(1), 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.09.032>
- Thorsen, S. V., Pedersen, J., Flyvholm, M.-A., Kristiansen, J., Rugulies, R., & Bültmann, U. (2019). Perceived stress and sickness absence: A prospective study of 17,795 employees in Denmark. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 92(6), 821-828. <https://doi.org/10.1007/s00420-019-01420-9>
- Tsigos, C., & Chrousos, G. P. (2002). Hypothalamic-pituitary-adrenal axis, neuroendocrine factors and stress. *Journal of Psychosomatic Research*, 53(4), 865-871. [https://doi.org/10.1016/s0022-3999\(02\)00429-4](https://doi.org/10.1016/s0022-3999(02)00429-4)
- Valsamakis, G., Chrousos, G., & Mastorakos, G. (2019). Stress, female reproduction and pregnancy. *Psychoneuroendocrinology*, 100, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2018.09.031>
- Vinik, A. I., Maser, R. E., & Ziegler, D. (2011). Autonomic imbalance: Prophet of doom or scope for hope? *Diabetic Medicine*, 28(6), 643-651. <https://doi.org/10.1111/j.1464-5491.2010.03184.x>
- Vitaliano, P. P., Russo, J., & Maiuro, R. D. (1987). Locus of control, type of stressor, and appraisal within a cognitive-phenomenological model of stress. *Journal of Research in Personality*, 21(2), 224-237. [https://doi.org/10.1016/0092-6566\(87\)90009-2](https://doi.org/10.1016/0092-6566(87)90009-2)
- Wagenmaker, E. R., & Moenter, S. M. (2017). Exposure to Acute Psychosocial Stress Disrupts the Luteinizing Hormone Surge Independent of Estrous Cycle Alterations in Female Mice. *Endocrinology*, 158(8), 2593-2602. <https://doi.org/10.1210/en.2017-00341>
- Yang, L., Zhao, Y., Wang, Y., Liu, L., Zhang, X., Li, B., & Cui, R. (2015). The Effects of Psychological Stress on Depression. *Current Neuropharmacology*, 13(4), 494-504. <https://doi.org/10.2174/1570159X1304150831150507>

UN RECORRIDO AL PEQUEÑO MUNDO DE LAS BACTERIAS

A JOURNEY INTO THE SMALL
WORLD OF BACTERIA

Margarita Ma. De la Paz Arenas Hernández
Edwin Barrios Villa
Judith Zullim Ortega Enriquez

<https://orcid.org/0000-0002-2413-6004>
<https://orcid.org/0000-0002-7864-1292>
<https://orcid.org/0000-0002-1483-0510>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP.

Recibido: 20/diciembre/ 2023

Aprobado: 26/febrero/ 2024

Publicado: 7/marzo/ 2024

Laboratorio de Biología Molecular y Genómica, Departamento de Ciencias Químico Biológicas
y Agropecuarias, Universidad de Sonora, Campus Caborca. Av. Universidad e Irigoyen S/N, CP.
83621, H. Caborca Sonora, México.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
judithzullim1802@gmail.com
edwin.barrios@unison.mx
margarita.arenas@correo.buap.mx

RESUMEN

Las bacterias son organismos unicelulares procariotas que se encuentran en todos los ambientes del planeta, siendo comensales en diferentes huéspedes (humanos y animales) y a comparación de los organismos eucariotas poseen una estructura sencilla, pese a que, contienen al menos dos elementos que les ayudan a sobrevivir como la “cápsula” y los “flagelos”, estos últimos les permiten desplazarse de un lado a otro. Además de que, las bacterias pueden convertirse en “patógenas”, es decir, son capaces de causar enfermedades, usualmente gracias a los plásmidos, que al ser elementos móviles pueden transferir fácilmente genes de virulencia implicados en la patogenicidad de las bacterias como la producción de ciertas toxinas, del mismo modo genes de resistencia a determinados antibióticos, mediante el proceso de conjugación, mecanismo importante de la transferencia genética horizontal, que ocurre de bacteria donadora a una receptora, este fenómeno de resistencia representa actualmente un problema de salud pública.

Palabras clave: Bacteria, plásmidos, conjugación, resistencia.

ABSTRACT

Bacteria are small unicellular prokaryotic organisms that are found in all environments of the planet being commensals in different hosts (humans and animals) that compared to eukaryotic organisms have a simple structure; however, there are at least two elements that help them to survive, the “capsule” and “flagella”, the latter allow them to move from one side to another. In addition, bacteria may become “pathogenic” (able to cause diseases) usually through plasmids, which are mobile elements that may easily transfer virulence genes involved in the pathogenesis of bacteria such as the production of some toxins, as well as genes of resistance to antibiotics. This horizontal transfer is mediated through a process known as conjugation (important mechanism of horizontal gene transfer which occurs from donor bacteria to a recipient). The phenomenon of resistance currently represents a public health problem.

Keywords: Bacteria, plasmid, conjugation, resistance.

INTRODUCCIÓN

Las bacterias son los microorganismos más abundantes del planeta, pertenecen al reino procariota, son unicelulares y se encuentran en cualquier ambiente de la tierra, agua, suelo y tierra. Su tamaño oscila entre 0.5-3 μm (micrómetros) y presentan distintas formas, incluyendo cocos, bacilos y espirilos (figura 1), muchas de ellas son consideradas bacterias comensales porque conviven con el huésped sin causar daño, principalmente se encuentran en el tracto gastrointestinal, la piel y la boca. Sin embargo, también existen bacterias que causan enfermedades y son consideradas patógenas (Marcano, 2008; De Lucas et al., 2018).

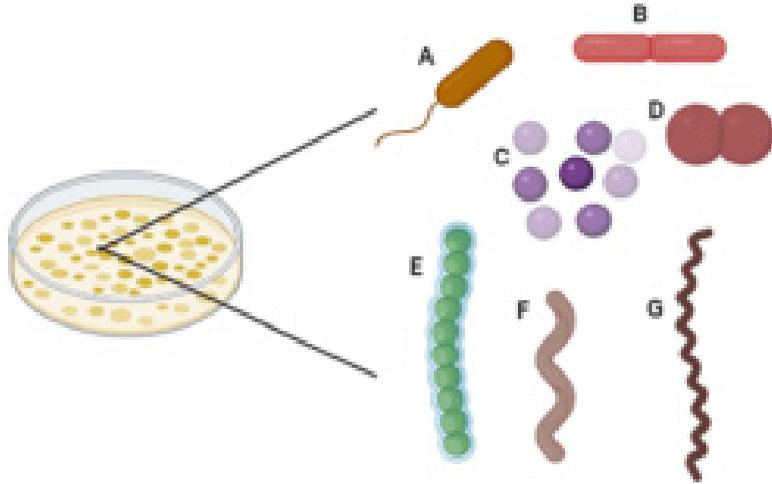


Figura 1. Morfología bacteriana. A) Bacilos. B) Diplobacilos. C) Cocos. D) Diplococo. E) Estreptococos. F) Espirilo. G) Espiroqueta. Elaboración propia en BioRender.com

Estructura de las bacterias

A pesar de ser microorganismos poseen una estructura compleja, que les permite cumplir diferentes funciones (figura 2). Dentro de los componentes más esenciales descritos para las bacterias se encuentra el núcleo, que consiste en una estructura donde se ubica el ADN, debido a que las bacterias, al ser células procariotas, no poseen un núcleo verdadero. A diferencia de las eucariotas, su material genético está constituido por una molécula de ADN (ácido desoxirribonucleico) circular enrollada sobre sí mismo (Chávez Castillo et al., 2017).

Una gran parte de las bacterias se clasifican con base en las propiedades de su pared celular, que consiste de una capa compuesta por peptidogucanos, un polímero complejo de moléculas alternadas de N-acetilglucosamina y de ácido N-acetilmurámico. De acuerdo con la composición de su pared celular, las bacterias se clasifican en dos grupos: Gram positivas (retienen complejos de cristal violeta) o Gram negativas (se tiñen con safranina, colorante de color rojo) esto con base en su respuesta al procedimiento de tinción de Gram. (Brooks et al., 2011).

Sin embargo, esto no influye en que un grupo de bacterias sea más patógeno que otro, tanto las Gram positivas como negativas causan un amplio espectro de enfermedades tales como infecciones urinarias, infecciones de transmisión sexual, enfermedades de transmisión alimentaria, neumonía y sepsis. Por otro lado, diversos estudios hacen énfasis en ciertas particularidades en la pared bacteriana (modificación de la permeabilidad), así como también bombas de expulsión que pueden

impedir la acción de los antibióticos para ejercer su función, de esta manera se puede incrementar la resistencia a los fármacos (Troncoso et al., 2017).

Un componente externo de importancia es la cápsula, que está conformada por cadenas de azúcares y proteínas que se encuentran unidas fuertemente a la bacteria, teniendo como función proteger a las bacterias de la desecación, así como también contribuir a la capacidad de invasión de la bacteria patógena y evadir la respuesta inmune. Sin embargo, no es una estructura vital para la célula, pues su pérdida no se relaciona con la pérdida de viabilidad celular (Brooks et al., 2011). Por otro lado las pilosidades o fimbrias son estructuras filamentosas cortas y finas que se componen de varias copias de una subunidad proteica llamada "pilina"; esta estructura no cumple funciones de movilidad, más bien su participación se encuentra en la adherencia a receptores específicos y superficiales, jugando un papel importante en la colonización de ciertos epitelios. Así también, existen otros componentes llamados pilis conjugativos, estos son más largos, se encuentran en poca cantidad (2 o 3 por célula) y tienen como función intervenir en el intercambio genético entre bacterias (Pérez et al., 2006).

Otras estructuras de importancia son los flagelos, pero estos no se encuentran en todas las bacterias, solo en aquellas que son capaces de desplazarse por sí mismas, como las que pertenecen a los géneros *Escherichia* y *Salmonella*, miembros importantes de la familia Enterobacteriales y que normalmente son comensales en el tracto gastrointestinal. Los flagelos se componen de subunidades proteicas llamadas "flagelinas" y pueden encontrarse en diferente lugar y número en el exterior de la bacteria. Si existe un solo flagelo, la bacteria se denomina monotrica; si hay un flagelo en los extremos de la bacteria, se le llama anfotrica; los grupos de flagelos presentes en uno o en los dos extremos de la bacteria se denominan lofotricos; cuando

los flagelos están distribuidos sobre toda la superficie de la célula se denominan peritricos (Chávez Castillo et al., 2017).

Por otro lado, otros componentes implicados en varios procesos vitales para las bacterias son los plásmidos (que alberga genes bacterianos que no se encuentran agrupados en el nucleóide). Estos son elementos extracromosómicos, que se pueden clasificar en no móviles, móviles y conjugativos. Los plásmidos son generalmente circulares, aunque en ciertas bacterias se pueden encontrar de forma lineal, cuentan con un ADN de doble cadena y pueden replicarse de manera autónoma, es decir, independientemente del cromosoma bacteriano.

En una célula pueden estar presentes varios tipos de plásmidos o varias copias del mismo plásmido. Muchos plásmidos tienen la capacidad de producir su propia transferencia de una célula a otra por medio de los productos de un grupo de genes que codifican las estructuras y enzimas requeridas. Tales plásmidos son considerados conjugativos y aquellos que carecen de estos genes pueden ser movilizables (mediante los elementos de un plásmido conjugativo) o no conjugativos. Su importancia radica en que muchos de ellos están implicados en la patogenicidad de la bacteria y al mismo tiempo poseen genes de resistencia a los antibióticos o de virulencia (Castro, 2014; Ray y Ryan, 2010).

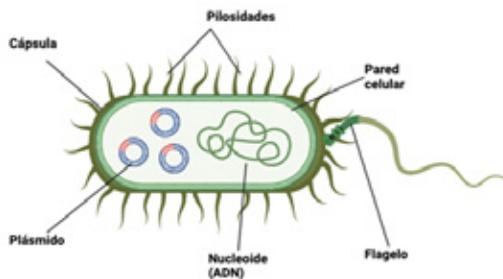


Figura 2. Representación de la estructura de una bacteria. Elaboración propia en BioRender.com

Tipos de plásmidos

De resistencia: Albergan genes de resistencia a antibióticos, por ejemplo los genes que confieren resistencia a los antibióticos de la familia de las quinolonas qnrA, qnrB y qnrS (que codifican para las proteínas Qnr), además de ciertas bombas de expulsión que se encuentran en la membrana de la bacteria, como el complejo oqxAB (Mosquito et al., 2011). Si bien los genes que confieren resistencia a antibióticos betalactámicos pueden localizarse en el cromosoma bacteriano, también son capaces de movilizarse e integrarse a plásmidos, que confieren resistencia principalmente a la cefotaxima, antibiótico perteneciente a la familia de las cefalosporinas (López-Velandia et al., 2016).

De virulencia: Como su nombre lo indica, este tipo de plásmido posee factores de virulencia que causan que una bacteria sea más virulenta, es decir, que tenga mayor capacidad para provocar una enfermedad. Dentro de estos factores se incluye la producción de ciertas toxinas, como la toxina tetánica de la bacteria *Clostridium tetani* (Cárdenas-Perea et al., 2014).

Degradativos: Este tipo de plásmidos le permiten a la bacteria digerir sustancias inusuales de su entorno. Por ejemplo, el tolueno o el ácido salicílico, estos plásmidos contienen genes de enzimas que tienen la función principal de descomponer compuestos específicos (Romero, 2018).

Plásmidos col: Contienen genes responsables de la producción de bacteriocinas, también denominadas colicinas, proteínas que pueden defender a la bacteria huésped matando a otras bacterias (Santos López, 2016).

De fertilidad: Son aquellos que poseen genes de transferencia capaces de conjugarse (Romero, 2018). Este proceso de transferencia se describe a continuación.

Transferencia Genética Horizontal (TGH)

Las bacterias pueden transferir su material genético mediante 4 diferentes mecanismos, transformación, transducción, vesiducción y conjugación. Este último consiste en la transferencia plasmídica de una célula bacteriana donadora a una receptora en un proceso que requiere un contacto estrecho. De esta forma, se establece un puente citoplasmático entre ellas para la transferencia de una parte o de todo el genoma donador a la célula receptora. La capacidad de donación está determinada por plásmidos conjugativos llamados plásmidos fértiles o plásmidos sexuales, en este proceso pueden ser transferidos genes de resistencia a antibióticos o factores de virulencia (figura 3) (Ray y Ryan 2010, Castro, 2014).

MECANISMO DE CONJUGACIÓN

Dentro de los plásmidos fértiles se encuentran los genes tra, cuya expresión es necesaria para que se inicie de la conjugación; estas proteínas son útiles para que el plásmido se propague desde una célula donadora a una receptora (Frankel et al., 2023). Los plásmidos conjugativos suelen ser grandes, con un número de copias bajo y para ser considerados de esta manera deben de codificar cuatro elementos (figura 4): un origen de transferencia (oriT), una relaxasa (R), una proteína de acoplamiento de tipo IV (T4CP) y una sistema de secreción tipo IV (T4SS). En cambio, los plásmidos movilizables transportan sólo los componentes relaxosomales oriT, un gen de la relaxasa y una o más proteínas auxiliares, por lo que son pequeños y tienen un número de copias alto (Smillie et al., 2010).

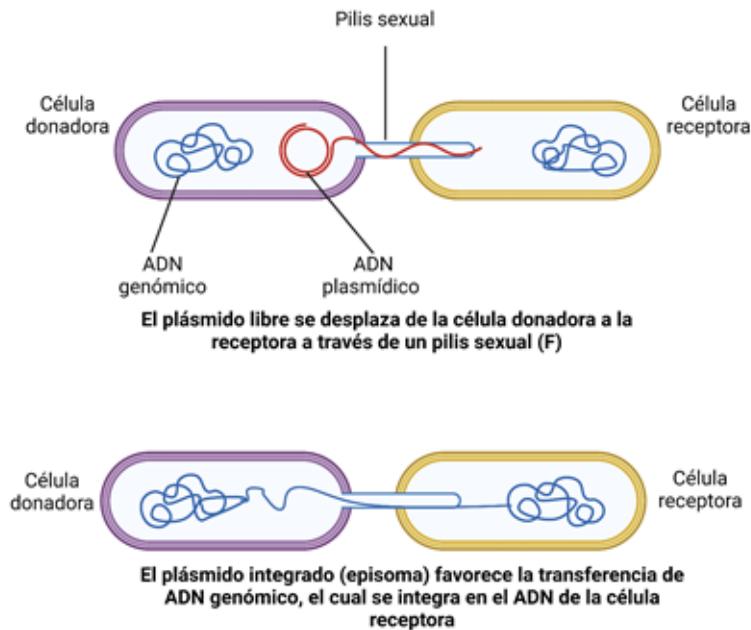


Figura 3. Esquema del mecanismo de conjugación. Elaboración propia en BioRender.com

La proteína multidominio relaxasa (MOB) término acuñado para designar a las proteínas involucradas en la movilidad de plásmidos donde la relaxasa se clasifica en 6 familias: MOB-F, MOB-P, MOB-Q, MOB-H, MOB-C y MOB-V, de las cuales existen reportes que se han encontrado tanto en plásmidos conjugativos como movilizables, por lo tanto, es el componente en común que poseen los plásmidos (Alvarado et al., 2012; Rozwandowicz et al., 2018).

El proceso de conjugación inicia cuando la relaxasa se une al *oriT*, puesto que corta la molécula de DNA que será transferida uniéndose de forma covalente a una sola hebra. Del mismo modo, este corte inicia una replicación del plásmido en la célula donadora presentándose al T4SS mediante la proteína T4CP, que también funciona como fuente de energía del proceso, y se transfiere el material genético a una célula receptora donde se forma en círculo (Garcillán-Barcia et al., 2009).

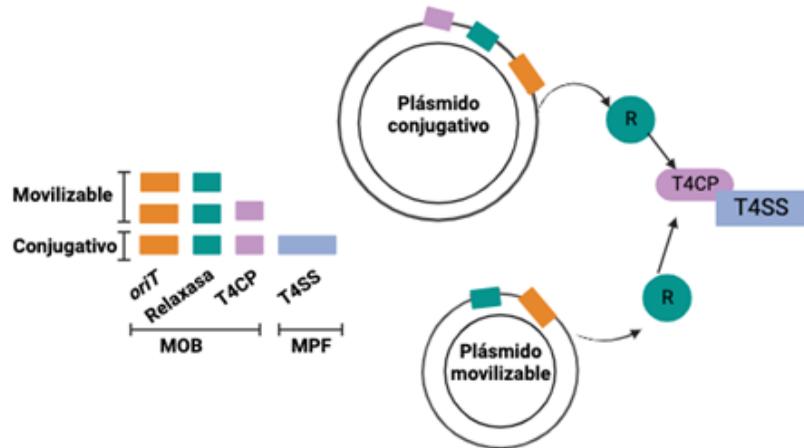


Figura 4. Componentes de los plásmidos conjugativos y movilizables. MOB: Movilizable, MPF: Formación de Pares de Apareamiento, *oriT*: Origen de Transferencia, R: Relaxasa, T4CP: Proteína de acoplamiento tipo 4 y T4SS: Sistema de Secreción Tipo 4. Modificado de Smillie et al., 2010. Elaborado en BioRender.com

Si bien el proceso de conjugación en las bacterias representa una ventaja para ellas, no lo es para los hospederos (seres humanos y animales), dado que se destacan diversos estudios donde, mediante este mecanismo de TGH, las bacterias patógenas han donado su material genético, que consiste generalmente en genes implicados en la virulencia y resistencia a los antibióticos incrementando así la patogenicidad a cepas comensales que normalmente se encuentran en diversas partes del cuerpo humano sin causar daño. En este sentido, una de las bacterias más estudiadas es *Escherichia coli* (*E. coli*), bacteria que es mayormente comensal en el intestino de los mamíferos, sin embargo, también es causante de infecciones diarreicas y de vías urinarias; las investigaciones realizadas en los últimos años se enfocan en el hecho de que esta bacteria transfiere genes de virulencia, como los involucrados en la producción de ciertas toxinas capaces de provocar daño al intestino, causando enfermedad a los huéspedes, así como también genes de resistencia a antibióticos principalmente a betalactámicos y quinolonas, lo cual representa un problema de salud pública según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020), ya que cada vez es más frecuente el mal uso de estos fármacos y el intercambio de genes entre las bacterias (De Toro et al., 2014; Ayala Velasteguí, 2022; Zhang et al., 2022)

Conclusiones

Muchas bacterias son consideradas parte de la microbiota humana y animal; a pesar de que son microorganismos que solo pueden visualizarse bajo un microscopio, resulta complejo entender su estructura celular y cómo pueden convertirse en patógenos gracias a diversos componentes, al igual que los diferentes procesos en los que participan, tales como la conjugación, que se ha descrito como uno de los principales procesos de intercambio genético entre estos microorganismos y en donde los plásmidos que portan información de virulencia y resistencia juegan un papel importante, ya que al ser móviles pueden transferirse muy fácilmente entre las células, provocando que bacterias comensales se vuelvan virulentas, incrementándose de esta manera ciertos problemas de salud pública como la resistencia a los antibióticos.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen en primer lugar a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP), al Posgrado en Microbiología y al Instituto de Ciencias (ICUAP) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por el espacio brindado para esta publicación, así como también al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT). Del mismo modo, agradecemos a la M.C Isabel Montserrat Cortez de la Puente por su asistencia y apoyo en la realización de este escrito.

REFERENCIAS

- Alvarado, A., Garcillán-Barcia, M. P., & de la Cruz, F. (2012). A degenerate primer MOB typing (DPMT) method to classify gamma-proteobacterial plasmids in clinical and environmental settings. *PLoS one*, 7(7), e40438. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040438>
- Ayala Velasteguí, C. D. (2022). Identificación y caracterización de plásmidos conjugativos en *Escherichia coli* resistente a fosfomicina y cefalosporinas de tercera generación aisladas de infecciones en humanos y de la industria avícola (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- Brooks, G. F., Morse, S. A., Carroll, K. C., & Timothy A. Mietzner & Janet S. Butel. (2011). MICROBIOLOGÍA MÉDICA. MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.
- Cárdenas-Perea, M. E., Cruzy López, O. R., Gándara-Ramírez, J. L., & Pérez-Hernández, M. A. (2014). Factores de virulencia bacteriana: la "inteligencia" de las bacterias. *Elementos*, 94, 35-43.
- Castro, Ana Marfía. (2014). Bacteriología médica basada en problemas. Editorial EL Manual Moderno.
- Chávez Castillo, A., Arreguín Espinosa, R., Cifuentes Blanco, J., & Rodríguez Bustamante, E. (2017). ¿Cómo funcionan los microbios? *Ciencia-Academia Mexicana de Ciencias*, 68(2), 26-35.
- De Lucas, E. H., Fuciños, L. C., Martín, M. A., & Giménez, N. C. (2018). Interacciones entre el huésped y la microbiota. *Medicine-Programa de Formación Médica Continuada Acreditado*, 12(52), 3059-3065.
- De Toro, M., Garcillán-Barcia, M. P., & De La Cruz, F. (2014). Plasmid Diversity and Adaptation Analyzed by Massive Sequencing of *Escherichia coli* Plasmids. *Microbiology spectrum*, 2(6), 10.1128/microbiolspec.PLAS-0031-2014. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.PLAS-0031-2014>
- Frankel, G., David, S., Low, W. W., Seddon, C., Wong, J. L., & Beis, K. (2023). Plasmids pick a bacterial partner before committing to conjugation. *Nucleic Acids Research*, 51(17), 8925-8933.
- Garcillán-Barcia, M. P., Francia, M. V., & de la Cruz, F. (2009). The diversity of conjugative relaxases and its application in plasmid classification. *FEMS microbiology reviews*, 33(3), 657-687. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2009.00168.x>
- López-Velandia, D. P., Torres-Caycedo, M. I., & Prada-Quiroga, C. F. (2016). Genes de resistencia en bacilos Gram negativos: Impacto en la salud pública en Colombia. *Universidad y salud*, 18(1), 190-202.
- Marcano, Daniel. (2008). El lado positivo de las bacterias. *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, 39 (2), 63-65.
- Mosquito, S., Ruiz, J., Bauer, J. L., & Ochoa, T. J. (2011). Mecanismos moleculares de resistencia antibiótica en *Escherichia coli* asociadas a diarrea. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, 28, 648-656.
- Organización Mundial de la Salud (2020, 31 de Julio). Resistencia a los antibióticos. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/antibiotic-resistance>
- Pérez, M., & Mota, M. (2006). Morfología y estructura bacteriana. *Temas de bacteriología y virología médica*, 23-42.

- Ray, C. G., & Ryan, K. J. (2010). *Sherris medical microbiology* (Vol. 6). McGraw-Hill.
- Romero, J. A. L. (2018). *Síntesis, caracterización y aplicaciones de nanotransportadores formados por tensioactivos derivados de [Ru (bpy) 3] 2* (Doctoral dissertation, Universidad de Sevilla).
- Rozwandowicz, M., Brouwer, M. S. M., Fischer, J., Wagenaar, J. A., Gonzalez-Zorn, B., Guerra, B., Mevius, D. J., & Hordijk, J. (2018). Plasmids carrying antimicrobial resistance genes in Enterobacteriaceae. *The Journal of antimicrobial chemotherapy*, 73(5), 1121–1137. <https://doi.org/10.1093/jac/dkx488>.
- Santos López, A. (2016). *Importancia de los plásmidos cole1 en la resistencia a antibióticos* (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid).
- Smillie, C., Garcillán-Barcia, M. P., Francia, M. V., Rocha, E. P., & de la Cruz, F. (2010). Mobility of plasmids. *Microbiology and molecular biology reviews: MMBR*, 74(3), 434–452. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00020-10>.
- Troncoso, C., Pavez, M., Santos, A., Salazar, R., & Barrientos, L. (2017). Implicancias estructurales y fisiológicas de la célula bacteriana en los mecanismos de resistencia antibiótica. *International Journal of Morphology*, 35(4), 1214-1223.
- Zhang, X., Chen, L., Zhang, X., Wang, Q., Quan, J., He, J., ... & Li, X. (2022). Emergence of coexistence of a novel blaNDM-5-harboring Inc11-I plasmid and an mcr-1.1-harboring IncHI2 plasmid in a clinical Escherichia coli isolate in China. *Journal of Infection and Public Health*, 15(12), 1363-1369.

INVASIÓN DE SARGAZO EN PLAYAS DEL CARIBE, UNA OPORTUNIDAD PARA EL DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES

INVASION OF SARGASSUM ON THE CARIBBEAN BEACHES: AN OPPORTUNITY FOR THE DEVELOPMENT OF NEW MATERIALS

Claudia Antonio Hernandez^{1*}
Edith Osorio de la Rosa²
Mirna Valdez Hernández³
Abraham Pacio Castillo⁴
Mauricio Pacio Castillo¹

<https://orcid.org/0000-0001-6592-0834>
<https://orcid.org/0000-0003-4976-4928>
<https://orcid.org/0000-0002-6636-5032>
<https://orcid.org/0000-0001-7771-398X>
<https://orcid.org/0000-0002-4053-9962>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

¹Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 14 sur y Av. San Claudio, Col. San Manuel, 72570, Puebla, Puebla, México.

²CONAHCYT- Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Departamento de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Chetumal, México.

³El Colegio de la Frontera Sur, Herbario Chetumal, México.

⁴Área de Ciencia de Materiales, Departamento de Materiales, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México.

*col537330@colaborador.buap.mx
eosorio@conahcyt.mx
mavaldez@ecosur.mx
pacio1904@gmail.com
mauricio.pacio@correo.buap.mx

RESUMEN

El calentamiento global afecta diversos aspectos climáticos, ambientales y biológicos, incluyendo la intensificación de fenómenos naturales como huracanes, sequías extremas y la alteración de los ecosistemas marinos. Dentro de este contexto, la arribazón masiva de sargazo en las costas del Caribe mexicano emerge como una problemática ambiental de creciente preocupación. Este fenómeno ha mostrado un incremento notable en la última década, no solo representa un desafío para la conservación de la biodiversidad marina, sino que también impacta negativamente en el sector turístico debido a la acumulación de algas en las playas y el desprendimiento de olores desagradables por su descomposición. Investigaciones recientes sugieren que el calentamiento global podría estar exacerbando este fenómeno a través del aumento de la temperatura del mar y cambios en las corrientes oceánicas, favoreciendo la proliferación y el desplazamiento del sargazo hacia las costas caribeñas. En el presente trabajo se muestra un breve recorrido sobre las problemáticas ambientales y de ecosistema originadas a partir de la llegada de miles de toneladas de sargazo a las costas del Caribe mexicano. Inicialmente, se presenta el contexto ecológico y su importancia histórica desde sus primeros avistamientos. Posteriormente, se analiza su composición química y se exploran posibles aplicaciones para el desarrollo de nuevos materiales para hacer uso y aprovechamiento de la biomasa que recala y hasta ahora se ha desperdiciado.

Palabras claves: Sargazo, mar de los sargazos, carbón activado, supercapacitor, electrodos.

ABSTRACT

Global warming affects various climatic, environmental and biological aspects, including the intensification of natural phenomena such as hurricanes, extreme droughts and the alteration of marine ecosystems. Within this context, the massive arrival of sargassum on the coasts of the Mexican Caribbean emerges as an environmental problem of growing concern. This phenomenon, which has seen a notable increase in the last decade, not only represents a challenge for the conservation of marine biodiversity, but also negatively impacts the tourism sector due to the accumulation of algae on beaches and the release of odors unpleasant due to their decomposition. Recent research suggests that global warming could be exacerbating this phenomenon through increased sea temperatures and changes in ocean currents, favoring the proliferation and movement of sargassum towards the Caribbean coasts. This work shows a brief overview of the problems caused by the arrival of thousands of tons of sargassum to the coasts of the Mexican Caribbean. Initially, the ecological context and its historical importance from its first sightings are presented. Subsequently, its chemical composition is analyzed and possible applications are explored for the development of new materials to make use of and take advantage of the biomass that lands and until now has been wasted.

Keywords: Sargassum, sargasso sea, activated carbon, supercapacitors, electrode.

INTRODUCCIÓN

A partir del 2011 en las costas del mar caribe, se ha visto una creciente población de algas marinas conocidas como Sargazo, las cuales no son nuevas en nuestro territorio, ya que sus primeros avistamientos fueron reportados a finales del siglo XV por Cristóbal Colón durante sus viajes al nuevo Mundo, de donde se deriva el nombre del “mar de los sargazos”. Este mar se extiende sobre el corazón del Océano Atlántico Norte, delimitado por el flujo de las principales corrientes oceánicas en el sentido de las agujas del reloj, donde, al oeste se encuentra la Corriente del Golfo, al este la corriente de Canarias, y las Corrientes Ecuatoriales y al sur la corriente de las Antillas (Feigl, 2016). Como estas corrientes no son fijas y varían de acuerdo a los vientos los límites precisos del Mar de los Sargazos también lo hacen, así que, en 2011 se delimitó un mapa plasmado en el reporte la protección y gestión del mar de los Sargazos (The Protection and Management of the Sargasso Sea) considerando las dimensiones de dicho mar y variaciones de las corrientes debido a los vientos, como se muestra en la figura 1 (De redacción, 2022; Laffoley et al, 2011).

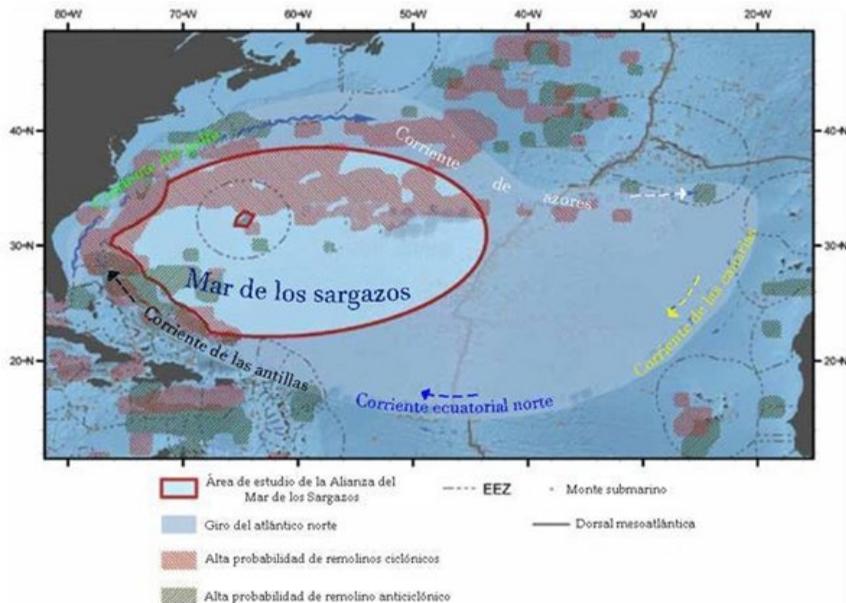


Figura 1. Límites y ubicación del Mar de los sargazos extraído del reporte la protección y gestión del mar de Los Sargazos (Laffoley et al, 2011, <https://eprints.soton.ac.uk/358065/>).

El sargazo también conocido como lenteja marina, no siempre se ha considerado una amenaza, al contrario se le intentó dar un uso. En 1772 fue utilizada como alimento para los marineros de la época manteniendo a las tripulaciones sanas y robustas, además se le atribuyeron propiedades diuréticas y antiescorbúticas de acuerdo a lo reportado por el Dr. Vicente de Lardizábal Dubois en su libro Consuelo de Navegantes; El sargazo como

antiescorbútico. Sin embargo en 1794 el médico cirujano de la Armada Antonio Corbella publicó una Disertación médico-chirúrgica que incluía a esa enfermedad aún con el consumo del sargazo por la deficiencia de vitamina C, retirando la recomendación de comer dichas algas. Por otra parte, se ha intentado darles una aplicación en la medicina alternativa y en la industria alimentaria de ganado, lo cual se sigue haciendo en la actualidad (Feigl, 2016; ; Vicente de Lardizábal Dubois, s. f.).

En este sentido, para promover la importancia del sargazo, se creó la Alianza del mar de los Sargazos bajo el liderazgo del Gobierno de las Bermudas en 2010, mostrando sus propiedades, así como el valor de su ecosistema en mar abierto, el papel que presenta en el sistema terrestre y oceánico, además del estudio científico, todo esto a escala mundial.

Por ello, el 11 de marzo de 2014 se firmó la declaración de Hamilton sobre la conservación del mar de los sargazos por los gobiernos de Bermudas, Azores, Mónaco, el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, Estados Unidos de América y las Islas Vírgenes, destacando el desarrollo de planes de trabajo para el cuidado, divulgación, estudio científico y cooperación de los gobiernos con el objetivo de preservarlo (Laffoley et al, 2011; Declaración de Hamilton sobre la colaboración para la conservación del mar de los sargazos, 2014).

En este trabajo se presenta el estudio del tipo de sargazo que con mayor frecuencia llega a las costas caribeñas conocida como Sargazo natans (*S. natans*) y Sargazo fluitans (*S. fluitans*), la importancia que presenta para la vida marina, el ecosistema que contiene, las problemáticas que ha presentado en territorio Mexicano para el sector ambiental y económico, además de algunas aplicaciones potenciales que se encuentran en estudio con la finalidad de mitigar los daños que causan los arribos.

¿Qué es el sargazo?

El sargazo es una macroalga pelágica parda (Phaeophyceae) originalmente ubicada en el mar de los sargazos, su registro fósil posiblemente sea del mar de Tetis en la era mesozoica (De Redacción, 2022; Godínez-Ortega, 2021). Puede alcanzar talos (tallos) de hasta 60 m formando grandes bosques sumergidos manteniéndose a flote gracias a sus pequeñas vejigas de aire en forma de uva (llamados neumatóforos o aerocistos) logrando así grandes islas entrelazadas. El nombre pelágico se deriva a partir de su ciclo de vida el cual es flotando, su reproducción es de manera asexual, es decir, por fragmentación del talo. El botánico español Hipólito Ruiz López fue uno de los primeros en publicar imágenes y características de esta alga en 1798 nombrándola *Fucus natan* encontrada en el océano Atlántico, en la Figura 2 se muestra una de las primeras imágenes registradas para la clase *S. natans* I, caracterizada por sus hojas largas y delgadas. Como se observa, las algas no tienen raíces sino que tienen anclajes que las pueden retener en el fondo del mar o del océano. La estructura del talo o estípite puede ser dura, llena de gas, blanda o flexible, corta o larga

y en algunos casos, puede estar completamente ausente según el tipo de alga, presenta estructuras equivalentes a hojas llamadas láminas, en ellas se realiza la fotosíntesis, algunas especies de algas tienen una sola lámina, mientras que otras tienen muchas (Barsanti et al., 2014; Ruiz, 1798; Ortigón-Aznar et al., 2020).

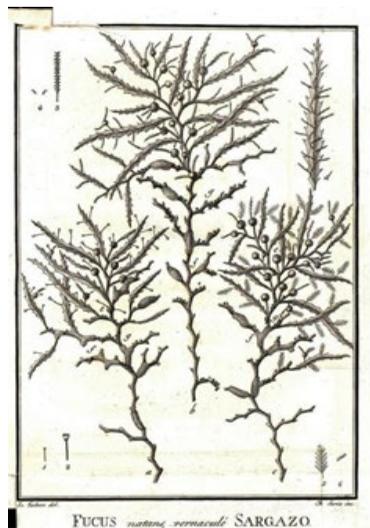


Figura 2. Imagen del sargazo *Fucus natans* I extraída de la descripción taxonómica de Hipólito Ruiz (1798, <https://bibdigital.rjb.csic.es/idurl/1/12722>).

El sargazo pelágico es un género muy diversificado con casi 361 especies, de acuerdo con su taxonomía se han clasificado en tres grupos: las algas verdes (Chlorophyta), las algas cafés o pardas (Phaeophyta) y las algas rojas (Rhodophyta). Las especies de macroalgas dominantes registradas en los arribazones de las costas caribeñas en México son del tipo Phaeophyta y se subdividen en *Sargassum fluitans* III, *Sargassum natans* I y *S. natans* VIII (Figura 3a). Cada especie presenta características específicas en su forma física, por ejemplo el *S. fluitans* tiene espinas en sus talos a diferencia del *S. natans* cuyos tallos se encuentran lisos (Figura 3b), los aerocistos del *natans* I son los más pequeños comparados con las otras dos especies alcanzando diámetros de 2.1–3.6 mm aproximadamente, esféricos y frecuentemente presentan una espina distal como se observa en la Figura 3c, sus hojas son lineales con 1–40 mm de largo y 1–3 mm de ancho de acuerdo a la escala es decir son delgadas (Figura. 3c). El *S. fluitans* presenta aerocistos de 2 hasta 5 mm de diámetro y no son totalmente esféricos sino más bien oblongas, sus hojas van de 1 a 50 mm de largo por 1 a 4 mm de ancho casi similares a las del *S. natans* VIII por lo que algunas veces tienden a confundirlas, solo que la cantidad de hojas es mayor en el *S. fluitans*, para *S. natans* VIII el tallo es liso, las hojas son anchas de hasta 7.3 mm, las vejigas no tienen espinas y son esféricas (Figura 3d). Una característica que comparten las tres especies es que

las hojas tienen ápices en formas puntiagudas y que pueden entrelazarse para formar grandes islas (Ortegón-Aznar et al., 2020; Godínez-Ortega et al., 2021; Schell, 2015).



Figura 3. Tipos y características principales del Sargazo de acuerdo con lo publicado por Schell, J. (2015, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2015.70>).

La gran cantidad de sargazo pelágico en el Caribe se ha atribuido principalmente al alto contenido de nutrientes en el agua como nitrógeno y fósforo, posiblemente generados por la eutrofización de aguas costeras caribeñas, que no es otra cosa más que el exceso de nutrientes orgánicos provenientes principalmente de las actividades humanas. En aguas enriquecidas con nutrientes, tanto *S. natans* como *S. uigans* duplican su biomasa en un promedio de 10 días, en comparación con los 50 días aproximados en aguas oceánicas del Mar de los Sargazos teniendo una floración 5 veces más, lo que se refleja en arribos con mayor frecuencia por año, además del cambio en las temperatura de la superficie del mar, así como de la fuerza de los vientos (Barsanti et al., 2014; Rodríguez-Martínez, 2016).

Importancia del sargazo en la vida marina

El mar de los sargazos es considerado un bosque tropical dorado flotante de acuerdo con la alianza del mar de los sargazos, ya que contiene una gran variedad de vida marina que se ha adaptado a él. Se sabe de al menos 10 especies endémicas (Figura 4) como son: el cangrejo del sargazo, camarón del sargazo, pez aguja, anémona del sargazo, babosa del sargazo, caracol del sargazo, crustáceos, gusanos y la especie más representativa de este hábitat, el pez del sargazo. La mayoría de estas especies suelen camuflarse de alguna forma, siendo el pez del sargazo el más relevante, ya que sus aletas están modificadas y gracias a ello pueden arrastrarse alrededor de todo el sargazo (Laffoley, 2011; Luis et al., 2021).



Figura 4. Especies endémicas del mar de los sargazos; a) cangrejo del sargazo, b) camarón del sargazo, c) pez aguja, d) anémona del sargazo, e) babosa del sargazo y f) pez del sargazo las imágenes fueron extraídas de la web. <https://inaturalist.ca/>, <https://ocean.si.edu/ocean-life> y Laffoley (2011, <https://eprints.soton.ac.uk/358065/>).

Conforme dicho bosque tropical se desplaza, acumula “pasajeros” aumentando la diversidad de invertebrados que se posan sobre él; esta biodiversidad cambia conforme las estaciones. Por ejemplo, el tiburón peregrino (*Cetorhinus maximus*) hace movimientos estacionales regulares hacia el mar de los Sargazos durante los meses de invierno a profundidades de 200 a 1000 m. Además, proporciona hábitat a más de 127 especies de peces, por lo que es un refugio de vida a cielo abierto dentro del océano con un ecosistema superficial característico basado en sargazo, albergando sus propias comunidades únicas, actuando al mismo tiempo como zona de cría y fuente de alimentación para peces como; delfines, atunes, peces espada y marlines. Otras especies migran a través del mar de los Sargazos, incluidos tiburones ballena, tiburones tigre, mantarrayas, etc. Las tortugas marinas pasan sus primeros años de vida en él, los cuales son conocidos como los “años perdidos” utilizando el sargazo como refugio seguro dentro del cual crecer. Por todo esto, organismos internacionales como la Comisión del Mar de los Sargazos y la Comisión Internacional para la Conservación del Atún del Atlántico (CICTA o ICCAT por sus siglas en inglés) han mostrado que es de vital importancia la preservación de este ecosistema manteniendo acuerdos para su conservación y estudio (Laffoley et al 2011; Mansfield et al 2021).

Problemáticas en las costas caribeñas

A partir del 2011, en las estaciones de la primavera y verano, el Cinturón de Sargazo se desplaza desde la costa de África hasta el Golfo de México de acuerdo al Observatorio de la Tierra de la NASA (NASA Earth Observatory, 2023), generando lo que conocemos como arribazones. Dicho fenómeno inunda las costas caribeñas, repercutiendo en la industria turística y,

por lo tanto, en la economía del país, ya que Quintana Roo contribuye considerablemente al producto interno bruto del país y desde luego a la economía local. En el verano del 2018 se vio una floración de algas de más de 20 millones de toneladas en mar abierto, causando muchos estragos en las costas del Atlántico tropical, el cinturón de algas para dicho año se puede observar en la Figura 5 en comparación con el 2011, donde las áreas rojas y naranjas representan la mayor densidad de sargazo. En el 2020 la recolección del alga en el mar y tierra fue de aproximadamente 19 mil toneladas, para el 2021 se tuvo un total de 44 mil 913 toneladas, para junio del 2022 se recolectaron aproximadamente 19 mil toneladas, de acuerdo a la Secretaría de marina (Infobae, 2022; Wang et al., 2019).

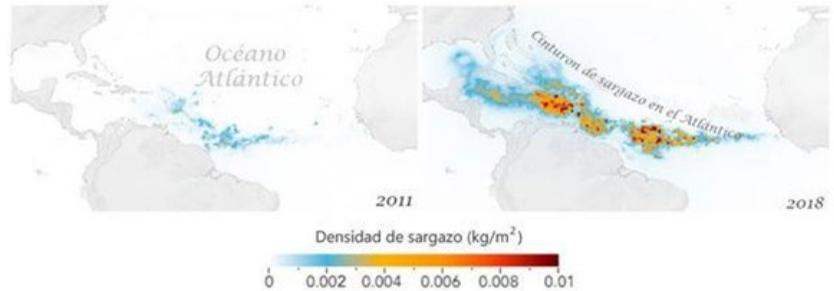


Figura 5. Densidad de sargazo para los años 2011 y 2018, imagen extraída del observatorio de la tierra de la NASA, (2023, <https://earthobservatory.nasa.gov/images/151188/a-massive-seaweed-bloom-in-the-atlantic>).

Al inicio de la primavera del año 2023 se alcanzó aproximadamente un arribo de casi 13 millones de toneladas, lo que se consideró un récord para la temporada. El desplazamiento del cinturón de sargazo para dicho año se puede observar en la Figura 6, donde los puntos rojos son la mayor densidad de sargazo concentrada en las corrientes canarias y ecuatoriales (flecha verde y negra respectivamente), llevándolas hacia las corrientes caribeñas (flecha morada) (NASA Earth Observatory, 2023).

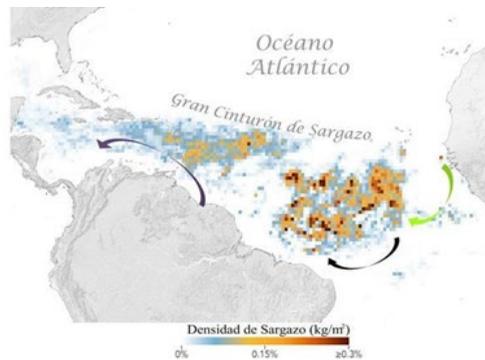


Figura 6. Densidad del sargazo para marzo 2023, imagen extraída del observatorio de la tierra de la NASA (2023, <https://earthobservatory.nasa.gov/images/151188/a-massive-seaweed-bloom-in-the-atlantic>).

Las algas son arrojadas a la playa por las olas y el viento lo que hace que después de un determinado tiempo mueran, creando una masa en descomposición, así cantidades masivas del sargazo acumuladas en zonas costeras producen sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco y otros compuestos orgánicos creando un olor fétido a huevo podrido, provocando graves complicaciones de salud para las personas como; dolores de cabeza, náuseas y problemas respiratorios (Trinanes et al 2021; Rodríguez-Martínez et al., 2016). Para evitar la problemática ambiental y de salud los gobiernos han implementado operativos de limpieza, inicialmente el sargazo se removía de la playa manualmente pero cuando su volumen aumentó se comenzó a utilizar maquinaria, el inconveniente del uso de esta es que resultó en la compactación de arena, la destrucción de nidos y crías de tortugas marinas además de la erosión de playas, ya que cerca de 60% del volumen removido por las máquinas era arena y esta tarda años para recuperarse. Por otro lado, el costo aproximado por limpiar cada kilómetro de esta macroalga es de 1.5 millones de dólares al año, por lo que el impacto socioeconómico es alto tanto para la limpieza de playas como para el ambiente turístico, viéndose reducido este último (Rodríguez-Martínez et. al., 2016; Infobae, 2022).

La acumulación y descomposición de algas en el arribo del 2018 provocó una mortandad de al menos 78 especies de fauna, donde casi el 60% fue de peces, afectando el área de la pesca y esta es la segunda actividad económica de importancia para la Riviera Maya. Además, los arribazones provocan asfixia de organismos costeros asociados con pastos marinos y arrecifes de coral, esto se da en aguas poco profundas tornándolas de color café lo que pone en peligro a sus ecosistemas, en tierra la inutilización de las playas para la anidación de tortugas marinas. Por lo anterior, dicho fenómeno ha causado estragos ecológicos y socioeconómicos no solo para México, sino para todos los países del caribe (Trinanes et al 2021; Rodríguez-Martínez et. al., 2019).

Aplicaciones

Considerando las problemáticas presentadas es importante encontrar algún uso al sargazo, ya que los arribos suelen ser cada vez más frecuentes. Por lo que, una de las aplicaciones que están en estudio es el biogás (metano) como un tipo de energía limpia, debido a que actualmente se tiene un abuso en el consumo de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural, desencadenando una crisis energética, por tanto, se buscan alternativas hacia las energías limpias y renovables.

Para la elaboración de un biogás, es imperativo mantener una temperatura estable que evite la putrefacción de la materia, dado que se encuentra almacenada por aproximadamente 21 días en un biodigestor. En relación con esto, uno de los parámetros fundamentales que deben mantenerse estables es la acidez de la mezcla, que se encuentra almacenada por aproximadamente 21 días en un biodigestor. En relación con esto, uno de los parámetros fundamentales que deben mantenerse estables es la acidez

de la mezcla, que generalmente se encuentra a un pH neutro de alrededor de 6 a 7 grados.. Otro parámetro que se monitorea es un ambiente libre de oxígeno, siendo que la biomasa se debe encontrar en un ambiente inerte para que los microorganismos logren descomponer la materia generando el biogás; a este proceso se le conoce como digestión anaeróbica (Figura 7). Se ha reportado que en la obtención del metano ha dado un mayor rendimiento al tener tamaño de partículas de la materia prima de hasta 1 mm además de realizar un pretratamiento al sargazo, ya sea químico con algún ácido diluido (HCl), en medio básico KOH) o térmico (140 °C por 30 min), seguido por una mezcla con materia orgánica (desechos alimenticios de hasta 2 mm) en una concentración de alrededor 1:3 respectivamente, ya que por sí solo no puede generar el suficiente metano (Thompson et. al., 2021; Orozco-González et al., 2022). Por otra parte, los trabajos de investigación continúan con el sargazo para producir otro tipo de gas como; el bioetanol y biodiésel, actualmente aún no hay ninguna empresa que se dedique al procesamiento de esta alga para aplicaciones en biogás (Orozco-González et al., 2022).

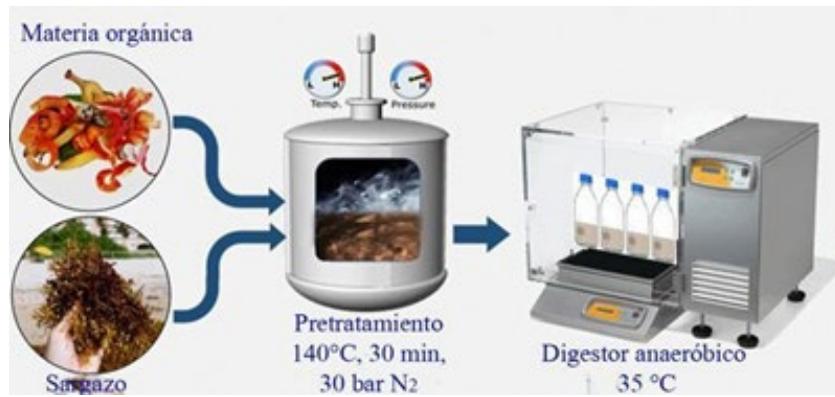


Figura 7. Esquema del proceso de obtención del biogás, reportado por Thompson, et. al., (2021, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130035>).

Otra investigación para la aplicación del sargazo es, la remoción de metales pesados (a través de la biosorción por medio de sus grupos funcionales), siendo la contaminación del agua uno de los tantos problemas que se tienen a nivel mundial, donde los metales pesados (MP) persisten en el medio ambiente al no degradarse y se acumulan a lo largo de la cadena alimentaria, provocando severos problemas de salud, además de la contaminación ambiental. Las últimas investigaciones revelan que el *S. fluitans* es capaz de absorber el cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Níquel (Ni), el *S. natans* absorbe Plomo (Pb) y Ni, esto es posible en algunas algas hay polisacáridos y proteínas en las paredes celulares, lo que sirve como sitios de unión para la captación de iones metálicos. Para mejorar este proceso en el sargazo, se realizan tratamientos físicos o químicos modificando la

estructura celular, haciendo que los iones de metales pesados se adhieran a la superficie como se muestra en la Figura 8, esto es posible debido a: los grupos de unión para iones metálicos, las constantes de afinidad del metal con el grupo funcional, el estado químico de estos sitios, el número de grupos funcionales en la matriz de las algas, el número de coordinación del ion metálico que se va a absorber u otros procesos de intercambio iónico. En los tratamientos físicos es posible realizar métodos de congelamiento, trituración, tamizado y térmicos modificando la composición de la pared celular de las algas y, por tanto, las características de biosorción. Los pretratamientos químicos más usuales que se aplican son; cloruro de calcio (CaCl_2) mejora el intercambio iónico, hidróxido de sodio (NaOH) favorece las interacciones electrostáticas de los cationes de iones metálicos y el ácido clorhídrico (HCl) que aumenta los sitios de unión en la biosorción. De acuerdo a lo mencionado, se tiene que el uso de algas marinas ofrece una solución más confiable, barata y efectiva para eliminar metales pesados en soluciones a base de agua, por lo cual es una investigación con un alto potencial que se encuentra en desarrollo (Foday et. al., 2021; Fernández et. al., 2023; Mehta et al., 2005).



Figura 8. Mecanismo de interacción de iones metálicos con algas, reportado por Foday et. al., (2021, <https://doi.org/10.3390/su132112311>).

Por otra parte, en el área de almacenamiento de energía las investigaciones apuntan al sargazo como material viable para la fabricación de electrodos en los supercapacitores (SC), donde un dispositivo del tipo SC electroquímico está compuesto por una membrana separadora de iones, un electrolito que ayuda en la migración de iones entre electrodos y dos electrodos encargados del almacenamiento de carga. Estos últimos pueden ser de algún carbón activado (CA) poroso capaz de almacenar una densidad de energía, tener una alta superficie, no toxicidad, conductividad eléctrica y de ser posible una porosidad controlable. Para lograr dichas características los materiales de inicio son llevados por procesos físicos y químicos. En el caso específico de la materia

orgánica del sargazo se realiza una limpieza con agua desionizada, carbonización en un rango de temperaturas de 600 a 1000 °C, triturado para obtener tamaños de partículas del orden de μm , activación térmica con temperaturas que pueden variar de 350 a 750°C, decapado químico con KOH o HCl comúnmente y secado de 12 h con temperaturas que varían de 60 a 120 °C. Una vez obtenida la activación del carbón se procede con la fabricación del electrodo, para ello se hace una mezcla del carbón con algún grafito conductor, emulsión de politetrafluoroetileno (PTFE) y etanol, en una relación de 8:1:1 o 7:2:1 dependiendo de la conductividad del CA, después para sostener la mezcla se coloca en una esponja de níquel y alguna base de metal conductor, posteriormente es sometida a un secado con temperatura de aproximadamente 90 °C por 12 h. Por otra parte, los electrolitos más comunes para este tipo de estructura son a base de; H_2SO_4 , Na_2SO_4 o KOH, una vez elegido el electrolito y fabricado los electrodos, se forma la estructura del supercapacitor. En la Figura 9 se muestra un esquema general del proceso antes mencionado para la fabricación de un supercapacitor a base de sargazo (Elaiyappillai et. al., 2022; Roche et. al., 2023; Song et. al., 2014).

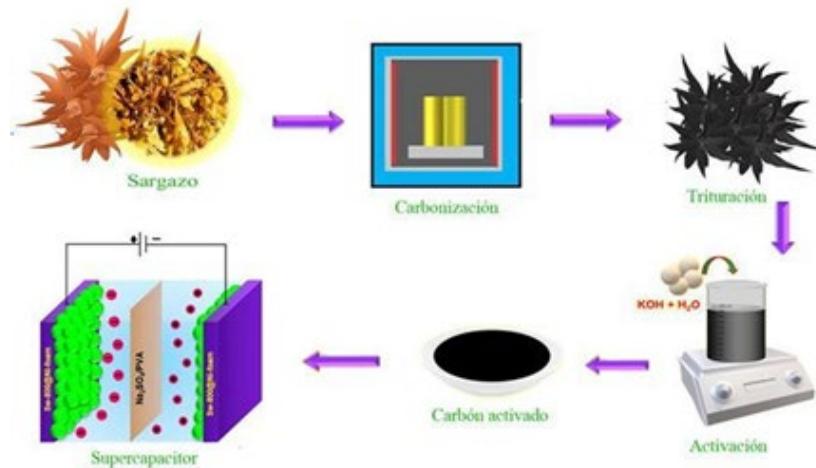


Figura 9. Esquema del proceso de fabricación de un supercapacitor, reportado por Elaiyappillai, (2022, <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116994>).

Actualmente una de las investigaciones que se desarrollan en el posgrado de dispositivos semiconductores perteneciente al instituto de ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) en colaboración con la universidad de Quintana Roo, el Colegio de la Frontera Sur, Herbario, Chetumal, y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), es la aplicación del sargazo natans y fluitans en el área de almacenamiento de energía, el estudio se encuentra en la primera etapa la cual es, el análisis del sargazo. Para ello el alga fue

recolectada en aguas poco profundas, en la playa Xahuaxol, Quintana Roo, evitando su contaminación con otro material de la playa, se lavó con agua desionizada y se secó en un horno a 80° C por 2 h (Figura 11a), la temperatura de carbonización fue de 500 y 800 °C. Se realizaron mediciones de difracción de rayos X (XRD por sus siglas en inglés) del cual se puede saber la composición química y la orientación cristalina del material en los polvos carbonizados, al obtener los resultados o bien los patrones de difracción, se realizó la comparación con los patrones de las bases de datos de referencia, utilizando el software libre de X Pert HighScore Plus y se obtuvo lo siguiente; para la muestra de 500°C (Figura 10a) presenta cristales de Halita (NaCl) conocida generalmente como sal común en un 47% presentando sus picos de difracción característicos en 27.4°, 31.7°, 45.4°, 53.7°, 56.4°, 66.2° y 57.3°. Otro mineral que se encuentra presente es la Calcita de Magnesio (Mg_{0.64}Ca_{0.936}CO₃) en un 26% ubicando sus picos de difracción con mayor intensidad en 23.165°, 29.555°, 36.136°, 39.601°, 43.365°, 47.784°, 48.765°, finalmente se tiene Anhidrita (Ca₁O₄S₁) en un 27% con picos de difracción con mayor intensidad en 25.502°, 25.539°, 31.380°, 40.885°. Para la muestra carbonizada a 800° C (Figura 10b) se tiene Halita en un 72%, Calcita de Magnesio en un 19% y Cerato de Bario (Ba₁Ce₁O₃) en una menor proporción (9%), los picos de difracción de mayor intensidad para el último compuesto se encuentran en 28.487°, 28.536°, 40.761° y 50.479°.

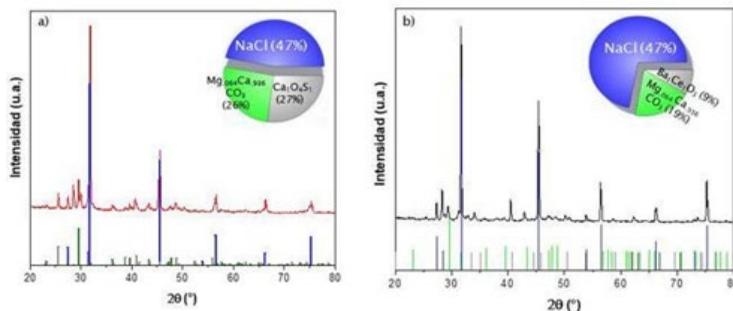


Figura 10. Patrón de difracción de rayos-X del sargazo carbonizado a: a) 500 °C y b) 800°C. Elaboración propia.

El material carbonizado tiene tamaños de hasta centímetros por lo que es necesario realizar la molienda, esta fue llevada a cabo en un molino de doble giro donde cada ciclo fue de 30 min por sentido con un tiempo total de 180 min obteniendo polvos con dimensiones de partículas en el rango de mm hasta μm. Para 500°C se obtuvo un polvo gris oscuro (Figura 11b) mientras que para 800°C el polvo fue de color gris claro (Figura 11c) debido a que no se utilizó ningún gas de arrastre y a 800°C tiende a calcinarse.

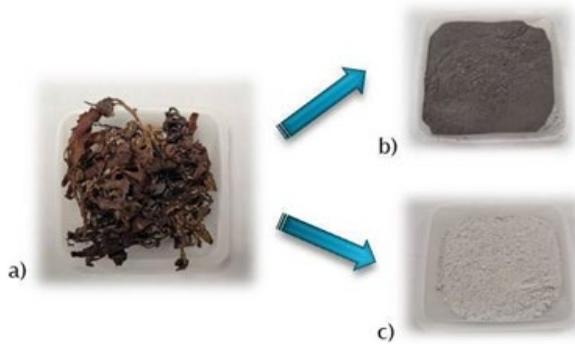


Figura 11. Sargazo; a) Seco, b) carbonizado a 500°C y molido, c) carbonizado a 800°C y molido. Elaboración propia.

El trabajo a futuro es procesarlo por algún método químico (a base de HCl o método Hummers) para activar el carbón y mejorar el área superficial con la finalidad de obtener una mayor área para la acumulación de carga. Se realizarán caracterizaciones; estructurales utilizando la técnica de espectroscopia RAMAN para conocer la cantidad de grafito que se tiene en los polvos de CA y carbón amorfo, morfológica por medio de Microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) dando una vista de la superficie física de las muestras ayudando a identificar si el material es poroso a una escala nanométrica. La mediciones eléctricas se llevarán a cabo por medio de la técnica de 4 puntas dando como resultado la resistividad del material y así calcular el nivel de conductividad, posteriormente se fabricará el electrodo para realizar las pruebas de voltametría cíclica identificando la capacidad que tendrá para almacenar energía y aplicarlo al diseño de supercapacitores.

CONCLUSIÓN

La contaminación de los ecosistemas acuáticos es un problema ambiental que requiere de estrategias inmediatas para el tratamiento eficiente de efluentes residuales y la disminución de su contenido de sustancias tóxicas. Además de la urgente legislación que gestione las descargas domésticas y las características de las aguas residuales que generan los hospitales; los desafíos más apremiantes que deben atenderse en el tratamiento de los contaminantes emergentes son su alta solubilidad, alta estabilidad química, baja biodegradabilidad y las transformaciones químicas que pueden experimentar para evaluar los efectos reales que generan en el ecosistema. En el caso particular de la contaminación del agua por ACBGs, el desarrollo de un procedimiento que permita separar, remover y recuperar gadolinio de la orina de pacientes que han estado expuestos a GBCA es urgente. De esta forma, se evitaría el incremento de gadolinio antropogénico en cuerpos de agua. La investigación que conduzca al desarrollo de materiales específicos adecuados para la implementación de un dispositivo capaz de remover y recuperar Gd^{3+} es

una idea innovadora, pues además de evitar la presencia del ion de tierras raras en efluentes urbanos, el elemento recuperado podría aprovecharse en diversas aplicaciones; como en la preparación de aleaciones metálicas resistentes o materiales electrónicos, por ejemplo.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen el financiamiento recibido para realizar las investigaciones expuestas mediante los proyectos: CONACyT INFRA-01-252847-2015 (México), BMBF-267630-2016 (Alemania) y VIEP-100043144-2019 (México). Edith Alvarez agradece la beca recibida por CONAHCyT (732898) para realizar sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*, Second Edition. <https://openlibrary.org/books/OL28468687M/Algae>
- Declaración de Hamilton sobre la colaboración para la conservación del mar de los sargazos, 11 de Marzo de 2014, disponible en: <https://www.sargassoseacommission.org>
- De Redacción, E. (2022, 27 diciembre). Mar de los Sargazos. *geoenciclopedia.com*. Recuperado 20 de julio de 2023, de <https://www.geoenciclopedia.com/mar-de-los-sargazos-148.html>
- Elaiyappillai, E., Jennifer, S. J., & Wang, S. (2022). Sustainable development of porous activated carbon from sargassum wightii seaweed for electrode material in symmetric supercapacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 927, 116994. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116994>
- Feigl, J. P. (2016). Las algas y los antiguos navegantes españoles (1492-1792). *IEO: Revista del Instituto Español de Oceanografía*, 24, 62-75. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5576318>
- Fernández, L. A. G., Frómeta, A. E. N., Álvarez, C. C., Ramírez, R. F., Flores, P., Ramos, V. C., Sánchez Polo, M., Carrasco-Marín, F., & Castillo, N. A. M. (2023). Valorization of sargassum biomass as potential material for the remediation of Heavy-Metals-Contaminated waters. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2559. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032559>
- Foday, E. H., Bai, B., & Xu, X. (2021). Removal of toxic heavy metals from contaminated aqueous solutions using seaweeds: a review. *Sustainability*, 13(21), 12311. <https://doi.org/10.3390/su132112311>
- Godínez-Ortega, J. L., Cuatlán-Cortés, J. V., Lopez-Bautista, J., & Van Tussenbroek, B. I. (2021). A Natural History of Floating Sargassum Species (Sargasso) from Mexico. En *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97230>
- Infobae. (2022, 1 junio). Marina reconoció que arribo de sargazo en 2022 ha sido superior que otros años: “Nos ha rebasado”. *Infobae*. <https://www.infobae.com/america/mexico/2022/06/01/marina-reconocio-que-arribo-de-sargazo-en-2022-ha-sido-superior-que-otros-anos-nos-ha-rebasado/>
- Laffoley, D.d'A., Roe, H.S.J., Angel, M.V., Ardron, J., Bates, N.R., Boyd, I.L., Brooke, S., Buck, K.N., Carlson, C.A., Causey, B., Conte, M.H., Christiansen, S., Cleary, J., Donnelly, J., Earle, S.A., Edwards, R., Gjerde, K.M., Giovannoni, S.J., Gulick, S., Gollock, M., Hallett, J., ... V. Vats1 (2011). The protection and management of the Sargasso Sea: The golden floating rainforest of the Atlantic Ocean. *Summary Science and Supporting Evidence Case. Sargasso Sea Alliance*, 44 pp. <https://eprints.soton.ac.uk/358065/>
- Mansfield, K., Wynneken, J., & Luo, J. (2021). First Atlantic satellite tracks of 'lost years' green turtles support the importance of the Sargasso Sea as a sea turtle nursery. *Proceedings Of The Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1950). <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0057>
- Mehta, S. K., & Gaur, J. P. (2005). Use of Algae for Removing Heavy Metal Ions From Wastewater: Progress and Prospects. *Critical Reviews In Biotechnology*, 25(3), 113-152. <https://doi.org/10.1080/07388550500248571>
- NASA Earth Observatory. (2023). A massive seaweed bloom in the Atlantic. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/151188/a-massive-seaweed-bloom-in-the-atlantic>

- Orozco-González, J. G., Amador-Castro, F., Gordillo-Sierra, A. R., García Cayuela, T., Alper, H. S., & Carrillo-Nieves, D. (2022). Opportunities surrounding the use of sargassum biomass as precursor of biogas, bioethanol, and biodiesel production. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.791054>
- Ortegón-Aznar I, Ávila-Mosqueda V. 2020. Arribazón de sargazo en la península de Yucatán: ¿Problema local, regional o mundial?. *Bioagrobiencias* 13(2): 28-37. DOI: <http://dx.doi.org/10.56369/BAC.3535>
- Roche, S., Yacou, C., Marius, C., Ranguin, R., Francoeur, M., Taberna, P., Passé-Coutrin, N., & Gaspard, S. (2023). Carbon materials prepared from invading pelagic sargassum for supercapacitors' electrodes. *Molecules*, 28(15), 5882. <https://doi.org/10.3390/molecules28155882>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Medina-Valmaseda, A. E., Blanchon, P., Monroy-Velázquez, L. V., Almazán-Becerril, A., Delgado-Pech, B., Vásquez-Yeomans, L., Francisco, V., & García-Rivas, M. (2019). Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic sargassum. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 201-205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.015>
- Rodríguez-Martínez, Rosa & Tussenbroek, Brigitta & Jordán-Dahlgren, Eric. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014-2015).
- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabañillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., García-Sánchez, M., & Van Tussenbroek, B. I. (2020). Element concentrations in Pelagic Sargassum along the Mexican Caribbean Coast in 2018-2019. *PeerJ*, 8, e8667. <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>
- Ruiz López H. (1798) De vera fuci natantis fructificatione. *Commentarius. Matriti: apud viduam e filium Petri Marin;* 38 p. <https://bibdigital.rjb.csic.es/idurl/1/12722>
- Schell, J.M., D.S. Goodwin, and A.N.S. Siuda. 2015. Recent Sargassum inundation events in the Caribbean: Shipboard observations reveal dominance of a previously rare form. *Oceanography* 28(3):8-10, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2015.70>.
- Song, M. Y., Park, H. Y., Yang, D. S., Bhattacharjya, D., & Yu, J. (2014). Seaweed-Derived Heteroatom-Doped highly porous carbon as an electrocatalyst for the oxygen reduction reaction. *ChemSusChem*, 7(6), 1755-1763. <https://doi.org/10.1002/cssc.201400049>
- Thompson, T. M., Young, B. R., & Baroutian, S. (2021). Enhancing biogas production from Caribbean pelagic sargassum utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste. *Chemosphere*, 275, 130035. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130035>
- Trinanes, J., Putman, N.F., Goni, G., Hu, C. and Wang, M. (2021) Monitoring pelagic Sargassum inundation potential for coastal communities. *J Oper Oceanogr* 1:1-12. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2021.1902682>
- Vicente de Lardizábal Dubois. (s. f.). *Real Academia de la Historia*. <https://dbe.rah.es/biografias/19534/vicente-de-lardizabal-dubois>
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G. T., Lapointe, B. E., & Montoya, J. P. (2019). The Great Atlantic Sargassum belt. *Science*, 365(6448), 83-87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>

TEXTILES FUNCIONALES PARA LA INHIBICIÓN DE BACTERIAS.

FUNCTIONAL TEXTILES TO INHIBITION OF BACTERIAS.

Juan Alberto Alcántara-Cárdenas¹
Miriam Sarai Cruz Leal^{2*}
Oscar Goiz-Amaro³
Gerardo Francisco Pérez-Sánchez^{2*}

<https://orcid.org/0000-0002-2056-2698>
<https://orcid.org/0000-0001-7413-2362>
<https://orcid.org/0000-0002-7116-282X>
<https://orcid.org/0009-0004-4534-6918>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

A1. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, C.P. 07340, México. jalcantarac@ipn.mx

2. Centro de Investigación en Físicoquímica de Materiales, ICUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Eco Campus Valsequillo VAL-3, San Pedro Zacachimalpa, Puebla, C.P. 72960, México

francisco.perezsanchez@correo.buap.mx

3. Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, C.P. 07340, México.

ogoiza@ipn.mx

*Autor de correspondencia: miriamsarai.cruzleal@viep.com.mx

RESUMEN

Los nanomateriales han dado un giro a la industria textil, mejorando las propiedades de los tejidos funcionales, añadiendo distintos materiales para mejorar la durabilidad, repelencia al agua, autolimpieza, antibacteriano, protección UV, entre otros. En particular, las características antibacterianas han sido de interés en textiles para ropa médica y deportiva. Se ha descubierto que la combinación plata-zeolita tiene un efecto biocida, que está relacionado con el estado de oxidación de las especies de plata y el tamaño de las partículas, dichas propiedades biocidas ayudan a la inhibición de *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* (*E. coli*) y *Candida albicans* (*C. albicans*). En este trabajo, se estudió el efecto inhibitorio de la proliferación de *Escherichia coli* (*E. coli*) a diferentes concentraciones de zeolita intercambiadora de plata sobre un sustrato de algodón. La zeolita de intercambio iónico Ag^+ se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX); además, se evaluó la eficiencia antibacteriana en el tejido mediante el Método Kirby-Bauer. De acuerdo con los resultados, se aprecia que el material desarrollado a base de zeolita Ag^+ tiene el efecto antimicrobiano, toda vez que después de 24 horas de cultivo de la bacteria *E. coli* sobre el textil, no se aprecia la presencia de dichas bacterias.

Palabras clave: Nanomateriales, plata, zeolita, *E. coli*, MEB, DRX, Kirby-Bauer.

INTRODUCCIÓN

Los nanomateriales antimicrobianos ofrecen un enfoque nuevo y diferente en el campo del control de infecciones y podrían ser uno de los avances necesarios para abordar este importante desafío. La acción de estos nanomateriales es fundamentalmente diferente al de los antibióticos clásicos y se cree que limita el desarrollo de resistencia, es eficaz contra las súper bacterias, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, las súper bacterias son bacterias multirresistentes que provocan infecciones que no pueden tratarse con medicamentos antimicrobianos (OMS, 2024). Los nanomateriales generalmente pueden resistir condiciones en las que los antibióticos convencionales serían desactivados, y pueden integrarse en diferentes matrices (p. ej., papel, tela, polímeros, etc.), confiriendo actividad antibacteriana también a materiales que no pueden

ABSTRACT

Nanomaterials have turned the textile industry on its head, improving the properties of functional fabrics by adding different materials to improve durability, water repellency, self-cleaning, antibacterial, UV protection, among others. In particular, antibacterial characteristics have been of interest in textiles for medical and sportswear. Silver-zeolite has been found to have a biocidal effect, which is related to the oxidation state of the silver species and the particle size, such biocidal properties help the inhibition of *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* (*E. coli*) and *Candida albicans* (*C. albicans*). In this work, different concentrations of silver exchange zeolite were studied on a cotton substrate and the effect of inhibiting the proliferation of *Escherichia coli* (*E. coli*). The Ag^+ ion exchange zeolite was characterized by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD); furthermore, the antibacterial efficiency on the fabric was evaluated by the Kirby-Bauer Method.

Keywords: Nanomaterials, silver, zeolite, *E. coli*, SEM, XRD, Kirby-Bauer.

soportar temperaturas de esterilización. Además, los nanomateriales pueden adaptarse para convertirse en antibióticos versátiles, con mayor estabilidad (Shrivastava, S. et al 2007) y, por lo tanto, una vida útil prolongada (Shi, L. et al 2008).

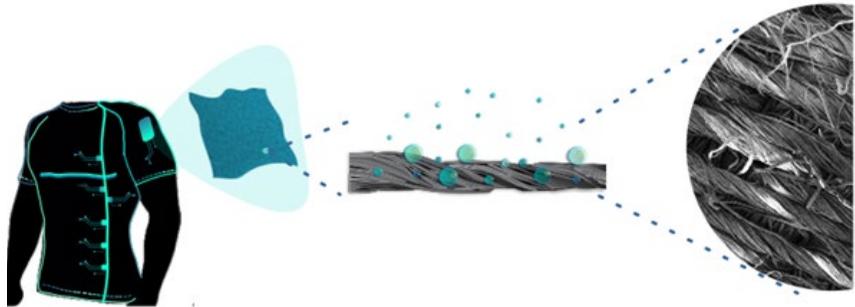


Figura 1. Representación de la aplicación de nanopartículas antibacterianas para textiles, (elaboración propia)

Además, muchos nanomateriales pueden matar o inhibir no sólo las bacterias, sino también los virus y los hongos, lo que muestra una solución nueva y eficiente para la desinfección general de superficies, agua, dispositivos médicos, etc. (Dizaj, SM. et al 2014). Por otro lado, se ha añadido nanomateriales como dióxido de titanio (TiO_2), plata Ag y dióxido de cobre (Cu_2O) para inhibir el crecimiento de bacterias y otros microorganismos en los textiles (Abdul-Reda Hussein, U. et al 2023).

La plata es un biocida natural contra bacterias, hongos y ciertos virus considerados muy poco tóxicos para los humanos, por lo que ha sido ampliamente utilizada en instrumental hospitalario y vendajes médicos (Khatami, M. et al 2018). Otro de los materiales más efectivos son las llamadas zeolitas, las cuales son minerales con estructuras únicas que pueden absorber y liberar líquidos fácilmente. Estos minerales se llaman aluminosilicatos, es decir, están conformados por óxido de aluminio y óxido de silicio. Estos minerales se encuentran en diferentes entornos geológicos, como rocas sedimentarias, rocas volcánicas, basaltos alterados y depósitos de arcilla. Aunque existen muchos tipos de zeolitas en el mundo, la zeolita FAU-Y ha causado un gran interés debido a su potencial aplicación en el tratamiento de heridas (Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2023).

Mecanismos antimicrobianos de nanomateriales.

Los nanomateriales, pueden definirse generalmente como estructuras con al menos una dimensión entre 1 y 100 nm. En comparación con su contraparte a macroescala, los nanomateriales, exhiben diferentes propiedades fisicoquímicas, electrónicas y cristalinidad modificada.

Los nanomateriales, pueden convertirse en agentes antimicrobianos, a menudo, el mismo sistema material puede explotar mecanismos múltiples y concurrentes, aumentando su capacidad antimicrobiana. Implica que tendrían que ocurrir múltiples mutaciones concurrentes para que un microorganismo desarrolle resistencia.

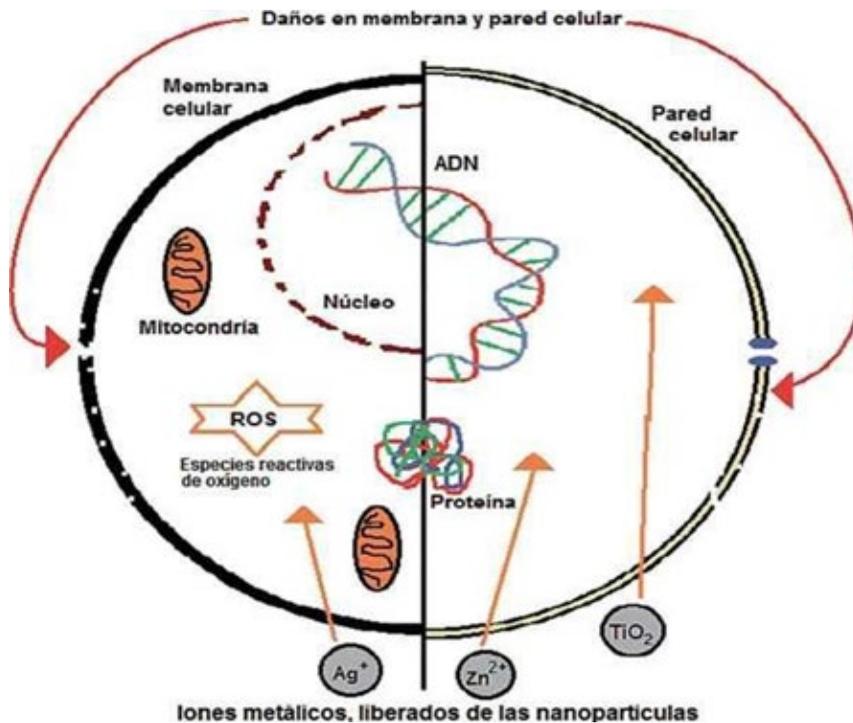


Figura 2. Efectos de las NPs metálicas más comunes: AgNPs, ZnONPs y TiO_2 NPs. Fuente: <https://www.mundonano.unam.mx/ojs/index.php/nano/article/view/48707/62154>

Además, es importante destacar que los nanomateriales presentan la ventaja inherente de tener una razón superficial extremadamente alta, esta propiedad permite un contacto muy íntimo entre el material activo y el microorganismo objetivo, asegurando una acción antimicrobiana eficiente. A continuación, se ofrece una descripción general de los mecanismos antimicrobianos relevantes.

1. Alteración de la membrana celular

Los nanomateriales, pueden interactuar mecánicamente con la pared celular y dañar permanentemente partes de ella. La alteración de la membrana provoca la fuga del citoplasma de la célula y la muerte celular (Pal, S. et al 2015).

2. Daño al ADN

Ciertos nanomateriales pueden penetrar la pared celular y atacar o modificar la morfología (plegamiento) del ADN, impidiendo la duplicación celular y provocando la muerte celular (Feng, QL. et al 2000).

3. Liberación de iones de metales pesados

Los iones de metales pesados desactivan los microorganismos uniéndose a grupos tiol en enzimas/proteínas y comprometiendo su función biológica. La liberación de iones de metales pesados aumenta al reducir el tamaño del material de partida, lo que convierte a los nanomateriales de metales pesados en una excelente fuente de iones biocidas (Feng, QL. et al 2000).

4. Transporte transmembrana interrumpido de electrones/iones

Los nanomateriales pueden interactuar con la pared celular, dificultando el intercambio electrónico e iónico a través de la membrana, interrumpiendo la respiración celular y provocando la muerte celular (Lemire, JA. et al 2013). Sin embargo, el uso de los nanomateriales han sido cuestionados por sus impactos en la salud y el medio ambiente, a continuación se mencionan algunas de las principales desventajas.

Desventajas de los nanomateriales

Aunque los nanomateriales antimicrobianos representan una solución fascinante y prometedora para la prevención y el tratamiento de enfermedades infecciosas, es necesario realizar muchos esfuerzos para implementarlos en el uso clínico del mundo real. Los principales desafíos incluyen no sólo la evaluación exhaustiva de su interacción con las células, tejidos y órganos humanos, sino también el impacto ambiental tras su liberación. Además, un aspecto importante a tener en cuenta es la acumulación de nanomateriales en el interior del cuerpo humano. La exposición a los nanomateriales puede ocurrir a través de tres vías principales: oral, dérmica y por inhalación, siendo esta última considerada la más peligrosa para los humanos (Djurišić, A. B., et al 2015).

De igual forma, por su tamaño, son capaces de penetrar la pared celular y transitar a través de células epiteliales y endoteliales, alcanzando los sistemas de circulación sanguínea y linfática. Se ha observado que las nanopartículas inyectadas por vía intravenosa se acumulan en el colon, los pulmones, la médula ósea, el hígado, el bazo y los vasos linfáticos, y que las nanopartículas inhaladas alcanzan los pulmones, el hígado, el corazón, el bazo y el cerebro (Huh, AJ. et al 2011).

En cuanto a la toxicidad de los nanomateriales, es un tema de investigación importante que ha ganado impulso en los últimos años, por ejemplo, la generación de radicales libres podría provocar estrés oxidativo en las células del hígado y los pulmones, generando así hepatotoxicidad

y toxicidad pulmonar (Huh, A.J. et al 2011). En general, la controversia de la toxicidad potencial de los nanomateriales está abierta, aunque cuestionada por la falta de un procedimiento de prueba estándar común e incluso una definición estandarizada para la dosis de nanomateriales en términos de masa, número, área de superficie y especímenes biológicos objetivos.

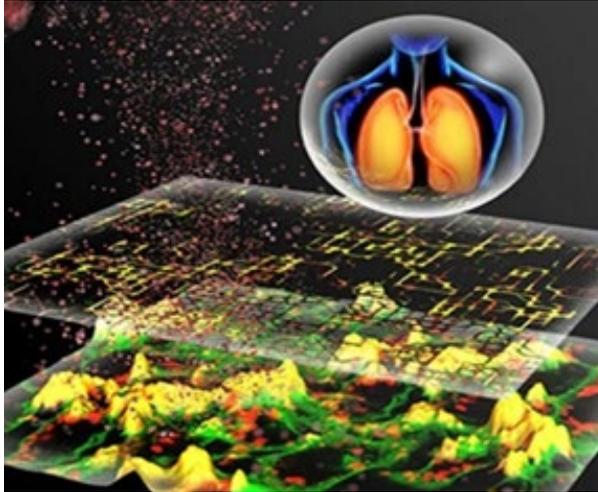


Figura 3. Modelización en silicio de las interacciones entre partículas y células para la predicción de la toxicidad de las nanopartículas respiratorias. Fuente: <https://www.quimica.es/noticias/1168834/el-metodo-sin-animales-predice-la-toxicidad-de-las-nanopartículas-para-materiales-industriales-mas-seguros.html>

La liberación de nanomateriales en el medio ambiente (p. ej., agua y suelo) y su impacto en la población microbiológica beneficiosa es otro aspecto importante que debe considerarse desde el punto de vista de la producción y el uso a gran escala de estas nuevas estructuras. Los microbios que favorecen al ecosistema a través de procesos como la biorremediación, ciclo de elementos y fijación de nitrógeno. Por ejemplo, la toxicidad de las nanopartículas de plata hacia las bacterias responsables de la conversión de amoníaco y nitrito siendo pasos clave del proceso de nitrificación, para el correcto crecimiento de las plantas (Hajipour, MJ. et al 2012).

La importancia de la Plata en los últimos tiempos

Su uso en la salud se remonta al año 1000 a.C, con informes sobre la utilización de plata para la purificación del agua. Más recientemente, para el tratamiento de heridas, la plata fue empleada en el siglo XVIII, y la Administración de Alimentos y Medicinas de EE. UU (FDA, por sus siglas en inglés) . Permitió su uso para manejo de heridas en la década de 1920 (Dutta P, 2019).

La creciente resistencia a los antibióticos ha renovado el interés en la

plata como antimicrobiano de amplio espectro con baja toxicidad (Zhao, G. et al 1998). Las formas de la plata utilizadas incluyen sales de plata, nanopartículas de plata y plata metálica. La plata se utiliza en cosméticos, artículos de limpieza, suplementos dietéticos, industria de la construcción, industria textil, dispositivos electrónicos, juguetes, comida, dispositivos médicos, pinturas, revestimientos y purificadores (Pulit-Prociak, J. et al 2016).

Las concentraciones de plata en el agua potable y en los alimentos están reguladas en muchos países. La Agencia Europea de Seguridad Alimentaria permitió un límite legal de 50 ppb de liberación de iones Ag^+ en los alimentos, mientras que la FDA ha aprobado la zeolita de plata en superficies en contacto con alimentos a niveles de <5% (Dutta P, 2019).

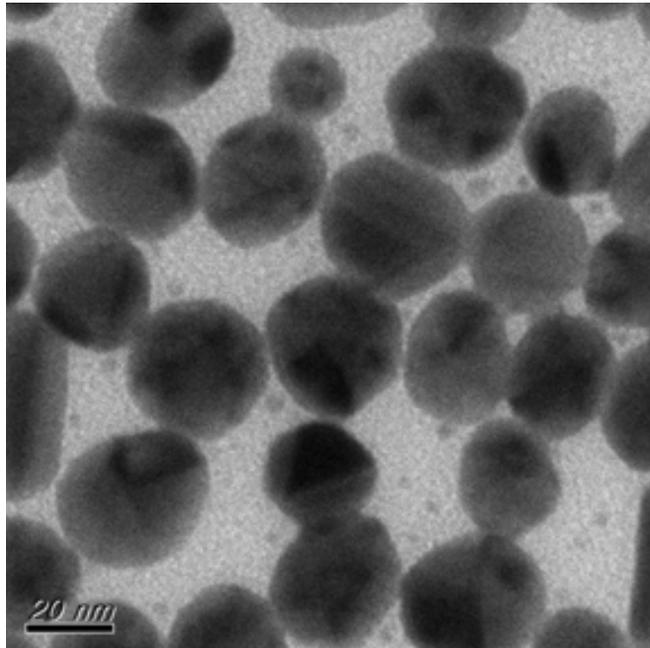


Figura 4. Micrografía de nanopartículas de Plata. Fuente: https://www.tripod-nano.com/products_detail/72

Zeolita

En 1756, el mineralogista sueco Axel Fredrik Cronstedt descubrió la zeolita de origen natural. Desde entonces, se han descubierto alrededor de 40 tipos de zeolitas naturales, la mayoría de las cuales tienen una baja relación silicio y aluminio (Si/Al). Esto es debido a la ausencia de agentes directores de estructura orgánica, necesarios para la formación de zeolitas silíceas. A veces las zeolitas naturales se encuentran como grandes monocristales

en la naturaleza, sin embargo, es muy difícil fabricar cristales tan grandes en el laboratorio. Las zeolitas con alta porosidad como la faujasita (FAU), cuyos ejemplos sintetizados en laboratorio son zeolitas X/Y, son escasas en la naturaleza. Dos zeolitas naturales utilizadas ampliamente en la industria son la mordenita (MOR) y la clinoptilolita (HEU). Estos materiales se han utilizado en agronomía, horticultura y remediación de suelos para mejorar las propiedades químicas y físicas del suelo, tratamiento de efluentes que contienen contaminantes radiactivos u otros metales pesados, o como tamiz molecular para atrapar o separar gases en la agricultura (por ejemplo, amoníaco). Las zeolitas naturales se pueden utilizar como catalizadores, pero su actividad catalítica está limitada por sus impurezas y sus bajas áreas superficiales (Noyen, J.V. et al 2012).



Figura 5. Zeolita mordenita. Fuente: <https://thecrystalcouncil.com/crystals/mordenite>

Las características de las zeolitas y la posibilidad de sintonizar sitios ácidos y básicos o incorporar otros elementos en su estructura, así como la misma modificación de su estructura, abren un amplio campo de aplicaciones de las zeolitas en procesos químicos y ambientales. Las zeolitas pertenecen a la conocida familia de aluminosilicatos cristalinos que muestran una combinación hasta ahora incomparable de propiedades como alta superficie, microporosidad bien definida, alta (hidro) estabilidad térmica y actividad intrínseca, y la capacidad de confinar especies metálicas activas en sus poros. Mientras que la acidez de las zeolitas se ha estudiado ampliamente debido a sus propiedades catalíticas: la mayoría de las reacciones de hidrocarburos, así como muchas transformaciones de compuestos funcionalizados, están catalizadas únicamente por sitios protónicos (Guisnet, M. Zet al 2001).

Aplicación de Zeolitas

Las zeolitas tienen un amplio uso en industrias como la de detergentes, separación de gases, desecantes y catalizadores. Las zeolitas naturales se utilizan principalmente en aplicaciones de minerales a granel debido a su menor costo (Li Y., et al 2017). A continuación se describen las propiedades de la zeolita modificada con plata y su efecto en la bacteria E.coli.

La zeolita modificada con plata posee una amplia actividad antibacteriana debido al ión de plata, Dicho efecto se ha determinado tanto hacia Gram (+) como Gram (-) (Dutta P, 2019). En este sentido, la zeolita es considerada un portador de la plata, la cual puede liberar iones de plata de forma controlada proporcionando un efecto antibacterial de largo plazo (Wattanawong et al 2021). Se ha determinado que este efecto depende de la relación dosis y concentración, así como del tiempo y del tipo de microorganismo (Jiraroj et al., 2014). Los enfoques antibacterianos que utilizan zeolitas naturales se centran principalmente en modificaciones de liberación de plata obtenidas mediante diferentes procedimientos que dan como resultado zeolitas modificadas que contienen iones de plata, nanopartículas de plata metálica o nanocompuestos de plata (Matsamura, 2003).

Por otro lado, Escherichia coli, comúnmente conocida como E. coli, es una bacteria que se encuentra normalmente en el intestino del ser humano y de los animales de sangre caliente. Perteneciente a la familia Enterobacteriaceae y es un bacilo corto Gram negativo. Aunque la mayoría de las cepas de E. coli son inofensivas y desempeñan un papel importante en la digestión, algunas cepas pueden causar enfermedades en los seres humanos. La E. coli puede transmitirse a través del consumo de alimentos o agua contaminados, contacto directo con animales infectados o personas enfermas, o incluso por el contacto con superficies contaminadas. Algunas cepas de E. coli pueden producir toxinas que causan enfermedades gastrointestinales, como diarrea, cólicos abdominales, náuseas y vómitos. En casos más graves, puede provocar infecciones del tracto urinario, infecciones respiratorias, infecciones de la piel y, en casos extremos, síndrome urémico hemolítico. Es importante tener en cuenta las medidas de higiene adecuadas, como lavarse las manos con frecuencia, cocinar los alimentos a temperaturas seguras y evitar el consumo de agua o alimentos contaminados, para prevenir la infección por E. coli. En caso de presentar síntomas de enfermedad gastrointestinal, es recomendable buscar atención médica para un diagnóstico y tratamiento adecuados. Por último, es importante mencionar que es un organismo ampliamente estudiado en el campo de la microbiología y la epidemiología, y su comprensión es fundamental para prevenir y controlar las infecciones asociadas a esta bacteria (Nataro, JP. et al 1998).

Características de la E. coli

(Rodríguez A., 2022)

- Es una bacteria que se encuentra normalmente en el intestino del ser humano y de los animales de sangre caliente.
- Pertenece a la familia Enterobacteriaceae y es un bacilo corto Gram negativo.
- Es móvil y tiene flagelos peritricos que le permiten moverse.
- No forma esporas.
- No utiliza citrato como fuente de carbono.
- Es capaz de fermentar la lactosa.
- Algunas cepas de E. coli pueden ser patógenas y causar enfermedades gastrointestinales en los seres humanos.
- Puede transmitirse a través del consumo de alimentos o agua contaminados, contacto directo con animales infectados o personas enfermas, o incluso por el contacto con superficies contaminadas.
- Algunas cepas de E. coli pueden producir toxinas que causan enfermedades como diarrea, cólicos abdominales, náuseas y vómitos.
- En casos más graves, puede provocar infecciones del tracto urinario, infecciones respiratorias, infecciones de la piel y, en casos extremos, síndrome urémico hemolítico.



Figura 6. Bacteria Escherichia coli. Fuente: <https://www.imperial.ac.uk/news/245517/understanding-colis-evolution-could-lead-treatments/>

Zeolita intercambiadora de Plata sobre un sustrato de algodón para la eliminación de la bacteria *Escherichia coli*

Una de las propuestas que han surgido para el desarrollo de textiles funcionales con efecto antimicrobiano es la utilización de partículas metálicas como la plata. En nuestro grupo de investigación se ha propuesto profundizar en los efectos de diferentes concentraciones de nitrato de plata soportadas en la Zeolita FAU para colocarlas sobre fibras de algodón y conocer el efecto antimicrobial contra la bacteria *E. coli*. Los detalles de la metodología utilizada pueden consultarse en (Cruz-Leal, M. et al 2023), y de forma general se describen a continuación.

Una muestra de algodón fue lavada con Triton™ y NaOH bajo agitación constante a 90 °C durante 1 hora para eliminar los componentes no celulósicos del algodón y las impurezas añadidas, luego se enjuagó con agua desionizada y se secó en una campana de flujo laminar. Por otro lado, las zeolitas se prepararon utilizando un procedimiento convencional de intercambio iónico en solución acuosa de AgNO_3 y agua desionizada, variando la concentración de intercambio Ag^+ de 8 a 100%. Posteriormente, se aplicó la solución al algodón, en la figura 7 se observa una imagen de microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés de scanning electron microscopy) del tejido de algodón con el material antimicrobial.

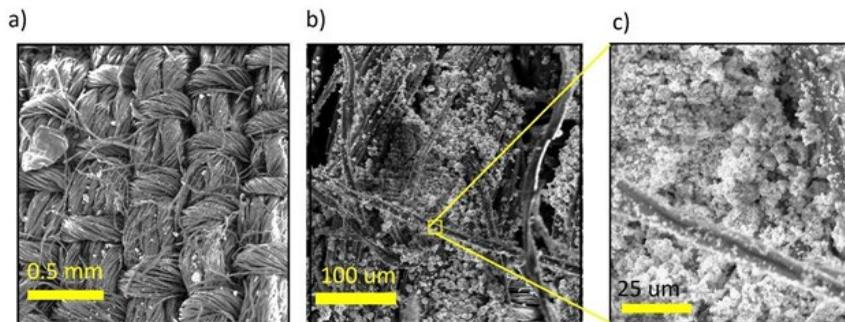


Figura 7. Imagen SEM de la superficie de algodón con el material antimicrobiano, recuperado de (Cruz Leal, et al. 2023)

Posteriormente, se analizó la eficacia antibacteriana del algodón frente a *Escherichia coli* mediante la prueba de Kirby-Bauer, para ello se impregnaron discos de algodón con diferentes concentraciones de Ag y se cultivaron las bacterias (Fig. 8a); para conocer la eficiencia del material antimicrobiano, se midió el halo de inhibición formado (Fig. 8b), es decir; durante el cultivo de la bacteria sobre el textil se mide el crecimiento de las bacterias, y si es el caso de tratarse de un material antimicrobiano, no se observarán bacterias con lo que se formará un halo, el cual es medido para determinar la eficacia del material, en este caso, las muestras mostraron un diámetro de 12 mm de inhibición después de 72 h (Fig. 8c), lo que demuestra su efectividad para la inhibición de *E. coli*.

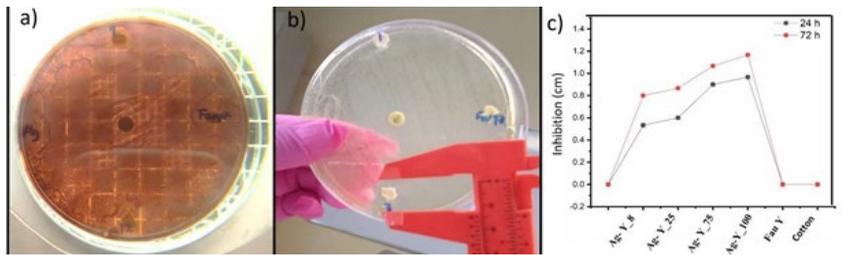


Figura 8. Metodología de la prueba de Kirby-Bauer, (Cruz-Leal, M. et al 2023).

Conclusiones

La nanotecnología ha revolucionado el mundo y está presente en muchos de los materiales que vemos y usamos en nuestra vida cotidiana, desde aplicaciones en medicina, producción de energía, sensores inteligentes, medio ambiente y, por supuesto, en textiles, donde se han reportado avances en la creación de nuevos tejidos funcionales, cuya función busca la autolimpieza de la tela, la regulación térmica, la repelencia a líquidos, o la capacidad antimicrobiana.

En este trabajo, nos hemos concentrado en las propiedades antimicrobianas, mostrando que las nanopartículas de plata soportadas en zeolitas pueden actuar como agentes antimicrobianos, inhibiendo el crecimiento de bacterias y otros microorganismos en los textiles. Esto puede ser especialmente útil en textiles para aplicaciones médicas, como material de curación, o bien, en ropa deportiva que se utiliza en ambientes húmedos y cálidos.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONAHCYT por la beca posdoctoral otorgada a M. Cruz Leal y el invaluable apoyo recibido por parte de la VIEP-BUAP mediante el proyecto ID-00295 y al IPN a través del proyecto SIP-20231327. Agradecemos también el apoyo técnico de Nicolás Morales López y Cristian Javier Domínguez Santos.

REFERENCIAS

- Alexander, J. W. (2009). History of the medical use of silver. *Surgical Infections*, 10(3), 289-292. <https://doi.org/10.1089/sur.2008.9941>
- Cruz-Leal, M., Goiz, O., Niño, T. I. M., Coutino-Gonzalez, E., Albarado-Ibáñez, A., Pérez-Sánchez, G. F., & Chen, J. (2023). Silver cluster supported in zeolite as antimicrobial agent to textiles. *MRS Advances*. <https://doi.org/10.1557/s43580-023-00741-9>
- Dizaj, S. M., Lotfipour, F., Barzegar-Jalali, M., Zarrintan, M. H., & Adibkia, K. (2014). Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles. *Materials Science and Engineering: C*, 44, 278-284. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.08.031>
- Djurišić, A. B., Leung, Y. H., Ng, A. M. C., Xu, X., Lee, P. K. H., Degger, N., & Wu, R. (2015). Toxicity of metal oxide nanoparticles: mechanisms, characterization, and avoiding experimental artefacts. *Small*, 11(1), 26-44. <https://doi.org/10.1002/sml.201303947>
- Dutta, P., Wang, B., (2019), Zeolite-supported silver as antimicrobial agents, *Coordination Chemistry Reviews*, 383, <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.12.014>
- Feng, Qing & Wu, J. & Chen, Guo-Qiang & Cui, Fu-Zhai & Kim, T. & Kim, J.. (2000). A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Journal of Biomedical Materials Research - J BIOMED MATER RES*. 52. 662-668. [https://doi.org/10.1002/1097-4636\(20001215\)52:4%3C662::AID-JBM10%3E3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1097-4636(20001215)52:4%3C662::AID-JBM10%3E3.0.CO;2-3)
- Guisnet, M., Influence of zeolite composition on catalytic activity, from Supported catalysts and their applications; The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2001; p.55. <https://doi.org/10.1039/9781847551962-00055>
- Hajipour, M. J., Fromm, K. M., Ashkarran, A. A., De Aberasturi, D. J., De Larramendi, I. R., Rojo, T., Serpooshan, V., Parak, W. J., & Mahmoudi, M. (2012). Antibacterial properties of nanoparticles. *Trends in Biotechnology*, 30(10), 499-511. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.06.004>
- Huh, A. J., & Kwon, Y. J. (2011). "Nanoantibiotics": A new paradigm for treating infectious diseases using nanomaterials in the antibiotics resistant era. *Journal of Controlled Release*, 156(2), 128-145. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2011.07.002>
- Hussein, U. A., Mahmoud, Z. H., Alaziz, K. M. A., Alid, M. L., Yasin, Y., Ali, F. K., Faisal, A. N., Ahmed, N., & Kianfar, E. (2023). Antimicrobial finishing of textiles using nanomaterials. *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.264947>
- Instituto de Ciencias de la BUAP. (2023,30 de agosto). ¿Qué son las zeolitas y Cómo pueden contribuir a la ciencia? [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=LXCCtbUKzY>
- Jiraroj, Duangkamon & Tungasmita, Sukkaneste & Nuntasri, Duangamol. (2014). Silver ions and silver nanoparticles in zeolite A composites for antibacterial activity. *Powder Technology*. 264. 418-422. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.049>
- Khatami, M., Varma, R. S., Zafarnia, N., Yaghoobi, H., Sarani, M., & Kumar, V. (2018). Applications of green synthesized AG, ZNO and AG/ZNO nanoparticles for making clinical antimicrobial wound-healing bandages. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 10, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.08.001>
- Lemire, J., Harrison, J. J., & Turner, R. J. (2013). Antimicrobial activity of metals: mechanisms, molecular targets and applications. *Nature Reviews Microbiology*, 11(6), 371-384. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3028>

- Li Y., Li L., Yu J., Applications of Zeolites in Sustainable Chemistry, *Chem*, 3(6), pp. 928-949 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.10.009>
- Matsumura, Y., Yoshikata, K., Kunisaki, S. -i., & Tsuchido, T. (2003). Mode of Bactericidal Action of Silver Zeolite and Its Comparison with That of Silver Nitrate. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(7), 4278–4281. <https://journals.asm.org/doi/10.1128/aem.69.7.4278-4281.2003>
- Nataro, J. P., & Kaper, J. B. (1998). Diarrheagenic *Escherichia coli*. *Clinical Microbiology Reviews*, 11(1), 142-201. <https://doi.org/10.1128/cmr.11.1.142>
- Noyen JV, Wilde AD, Schroeven M, et al., Ceramic Processing Techniques for Catalyst Design: Formation, Properties, and Catalytic Example of ZSM-5 on 3-Dimensional Fiber Deposition Support Structures, *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 9: 902–910 (2012). <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2012.02781.x>
- Organización Mundial de la Salud (2024, 26 de febrero) <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>
- Pal, S., Tak, Y. K., & Song, J. M. (2015). Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? A study of the Gram-Negative bacterium *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(6), 1712-1720. <https://doi.org/10.1128/aem.02218-06>
- Pulit-Prociak, J., & Banach, M. (2016). Silver nanoparticles a material of the future? *Open Chemistry*, 14(1), 76-91. <https://doi.org/10.1515/chem-2016-0005>
- Rodríguez-Angeles, G. (2002). Principales características y diagnóstico de los grupos patógenos de *Escherichia coli*. *Salud pública de México*, 44(5), 464-475. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342002000500011
- Shi, L., Zhao, Y., Zhang, X., Su, H., & Tan, T. (2008). Antibacterial and anti-mildew behavior of chitosan/Nano-TiO₂ composite emulsion. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 25(6), 1434-1438. <https://doi.org/10.1007/s11814-008-0235-7>
- Shrivastava, S., Bera, T., Roy, A., Singh, G., Ramachandrarao, P., & Dash, D. (2007). Retracted: Characterization of enhanced antibacterial effects of novel silver nanoparticles. *Nanotechnology*, 18(22), 225103. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/22/225103>
- Zhao, G., Stevens, S.E. (1998). Multiple parameters for the comprehensive evaluation of the susceptibility of *Escherichia coli* to the silver ion. *Biomaterials* 11, 27–32 <https://doi.org/10.1023/A:1009253223055>
- Wattanawong, N., & Aht Ong, D. (2021). Antibacterial activity, thermal behavior, mechanical properties and biodegradability of silver zeolite/poly(butylene succinate) composite films. *Polymer Degradation and Stability*, 183, 109459. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109459>

ENFERMEDADES NO TRANSMISIBLES Y EL SEDENTARISMO

NON-TRANSMISSIBLE DISEASES AND SEDENTARY LIFESTYLE

Daniela Alexandra Bernabé Sánchez (*)
Karla Marisol Teutli Mellado

<https://orcid.org/0000-0003-1679-1612>
<https://orcid.org/0000-0002-4515-7410>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP

Recibido: 20/diciembre/ 2023

Aprobado: 26/febrero/ 2024

Publicado: 7/marzo/ 2024

Doctorado en Investigación y Educación para la Salud. Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Avenida San Claudio s/n, Ciudad Universitaria, La Hacienda, 72592

2235 70680@viep.com.mx;

karla.teutli@viep.com.mx

RESUMEN

Las enfermedades no transmisibles son un problema de salud pública a nivel mundial, estas enfermedades se consideran crónico degenerativas y se caracterizan por generar secuelas discapacitantes a largo plazo. Algunos ejemplos de estas enfermedades son enfermedades del corazón, sobrepeso, diabetes mellitus y dislipidemias. Estas enfermedades crónico degenerativas están altamente relacionadas con malos hábitos alimenticios, así como elevados niveles de sedentarismo, lo que se reconoce como estilos de vida no saludables. Es necesario favorecer los procesos de Educación para la salud para aumentar la cantidad de actividad física que la población infantil y adulta realiza diariamente. Para la población adulta resulta complicado disminuir las conductas o momentos de inactividad, ya que la mayoría de los trabajos mantienen a sus empleados en las mismas posiciones por periodos de tiempo prolongados, lo que aumenta el riesgo de lesiones del aparato locomotor, esto puede minimizarse si se fomenta un programa de actividad física inicialmente moderado y de bajo impacto, que progrese gradualmente hasta alcanzar una mayor intensidad. Sin embargo, existe evidencia de que el aumento en los niveles de actividad física mejora la morbilidad y mortalidad por estas enfermedades.

Palabras clave: enfermedades no transmisibles, sedentarismo, salud, actividad física

ABSTRACT

Non-transmissible diseases are a worldwide public health problem. These diseases are considered chronic-degenerative and are characterized by the generation of long-term disabling consequences. Some examples of the pathologies are cardiovascular disease, overweight, diabetes mellitus, and dyslipidemia. The chronic-degenerative diseases are highly related to bad eating habits, as well as high levels of sedentary lifestyle, which are recognized as unhealthy lifestyles. It's important to promote health education processes to increase the amount of physical activity that children and adults perform daily. For the adult population, it is difficult to reduce sedentary behaviors or moments of inactivity since most jobs keep their employees in the same positions for prolonged periods of time, which increases the risk of injuries in the musculoskeletal system. This can be minimized if it encourages an initially moderate or low-impact physical activity program that gradually progresses to higher intensity. However, there is evidence that increasing physical activity levels improve morbidity and mortality rates from these diseases.

Keywords: non-transmissible diseases, sedentary lifestyle, health, physical activity.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades no transmisibles (ENT) aún no se consideran relevantes en la salud mundial, incluso el presupuesto que se les destina suele ser menor para generar procesos de prevención y/o control. El impacto de estas enfermedades es más grave para la población de bajos recursos, ya que tardan en generar diagnósticos y existen menor cantidad de lugares que favorezcan su salud y recreación, esto implica una menor calidad de vida.

Enfermedades No Transmisibles

Ramos et al., (2014) definen a las ENT como enfermedades de causa no infecciosa que se caracterizan por una larga duración y consecuencias que generan discapacidad a largo plazo. Dentro de los principales factores de riesgo para desencadenar este tipo de enfermedades existen el sobrepeso, el consumo de tabaco y alcohol, mala alimentación, elevadas concentraciones de lípidos en sangre, hiperglucemia y sedentarismo. Muchos de estos factores de riesgo se relacionan con la manera en la que actualmente vivimos, es decir, normalmente tenemos jornadas laborales largas y esto implica que nos alimentemos donde sea posible y que pasemos la mayor parte del

tiempo en las mismas posiciones, como estar sentado o de pie, lo que se reconoce como falta de actividad física.'

La Encuesta Nacional de Salud y Nutrición reporta que desde el año 2018 existen 8.6 millones de personas adultas con Diabetes Mellitus, considerando esto, se menciona que del 2012 al 2018 la cifra ha aumentado por 2 millones de personas, siendo las mujeres las que tienen mayor porcentaje. Respecto a la hipertensión en población adulta, desde el 2018 existen 15.2 millones de mexicanos que la presentan y esto ha aumentado un 40% desde el 2012, dato que seguirá aumentando con el paso de los años.

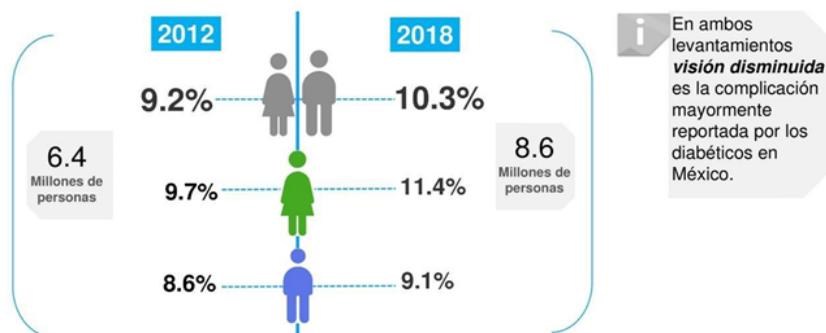


Figura 1. Porcentaje de la población mexicana mayor a 20 años con diagnóstico de diabetes mellitus, separados por sexo (ENSANUT, 2018 realizado por el Instituto Nacional de Salud Pública INSP y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI)
https://ensanut.insp.mx/encuestas/ensanut2018/doctos/informes/ensanut_2018_presentacion_resultados.pdf

El sedentarismo está ampliamente relacionado con diversas enfermedades, actualmente se consideran a las enfermedades cardiovasculares como una de las principales causas de muerte a nivel mundial, y se reconoce que pueden generar secuelas altamente discapacitantes. Por otro lado, México ocupa los primeros lugares en obesidad en personas adultas y en niños, lo que eventualmente está relacionado con desarrollar enfermedades cardiovasculares o metabólicas. Este aumento de enfermedades ha generado un impacto económico en el país, ya que cada vez es mayor el número de personas adultas que tienen ENT y los medicamentos utilizados para combatir estas patologías cada vez son más escasos en el ámbito público y no siempre se cuenta con la posibilidad de pagarlas de manera particular.

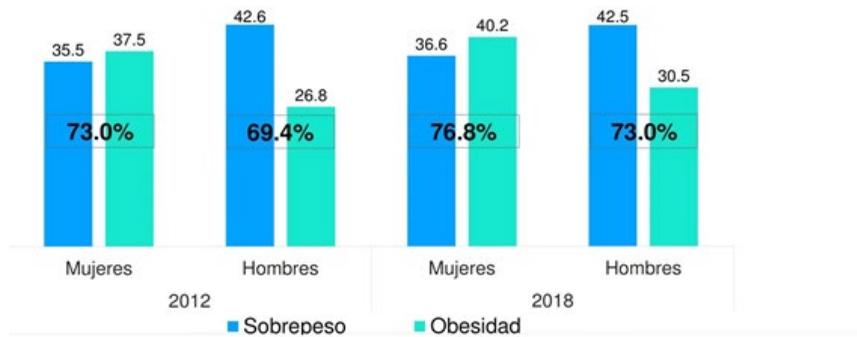


Figura 2. Porcentaje de población mexicana mayor a 20 años con sobrepeso y obesidad (ENSANUT, 2018) Estudios realizados por el Instituto Nacional de Salud Pública INSP y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI) https://ensanut.insp.mx/encuestas/ensanut2018/doctos/informes/ensanut_2018_presentacion_resultados.pdf

Con el paso del tiempo se seguirá incrementando la esperanza de vida y esto modificará los estilos de vida y a su vez se generarán cambios en los patrones de enfermedad. Si sigue la disminución de nacimientos y de mortalidad en todo el continente americano, se provocará un aumento en la población de adultos mayores, lo que favorecerá un incremento en las ENT (Ramos et al., 2014).

Obesidad

Es una de las enfermedades no transmisibles e incluso reconocida como la enfermedad del siglo XXI. La obesidad se define como una enfermedad causada por alteraciones genéticas, ambientales y de la conducta, es propiciada por el desequilibrio entre la ingesta y el gasto de energía representando alta probabilidad de presentar a edades tempranas enfermedades como enfermedades cardiovasculares, diabetes mellitus y enfermedades articulares.

Desde 1996 se utiliza el índice de masa corporal (IMC), como un estándar para clasificar a la obesidad. Actualmente, es el indicador más utilizado para poder identificar el sobrepeso y la obesidad, resultando de la división del peso en kilogramos entre el cuadrado de la talla en metros. El aumento del IMC y el riesgo de presentar cardiopatías, accidentes cerebrovasculares, diabetes y cáncer crecen de manera paralela.

	oIMC (kg/m ²)	Clase de obesidad	Riesgo de enfermedad	
			Hombres <102 cm Mujeres <88 cm	Hombres >102 cm Mujeres >88 cm
Bajo peso	< 18.5		-	-
Normal	18.5-24.9		-	-
Sobrepeso	25.0-29.9		Aumentado	Alto
Obesidad	30.0-34.9	I	Alto	Muy Alto
	35.0-39.9	II	Muy Alto	Muy Alto
Obesidad extrema	> 40	III	Extremadamente alto	Extremadamente alto

Tabla 1. Clasificación de obesidad por índice de masa corporal (IMC) y circunferencia de la cintura. Fuente: (Barba, 2018)

Aumento En La Concentración De Lípidos En Sangre (Dislipidemias)

Al aumento excesivo de colesterol en la sangre se le conoce como hipercolesterolemia y el aumento excesivo de triglicéridos en la sangre se le conoce como hipertrigliceridemia. Ambos términos son enfermedades no transmisibles que pueden generar condiciones a mediano o largo plazo como enfermedades cardiovasculares y/o cerebrovasculares, por lo que se le reconoce una alta relación con el sobrepeso y a su vez con mala alimentación e inactividad física.

Esta concentración excesiva involucra niveles de colesterol mayores a 200 mg/ dL o niveles de triglicéridos por arriba de 150 mg/dL en la sangre. Las dislipidemias pueden tener un origen genético o hereditario o también pueden estar asociadas a otras enfermedades como la obesidad, uso prolongado de anticonceptivos orales, enfermedades hepáticas o hipotiroidismo (Barba,2018).

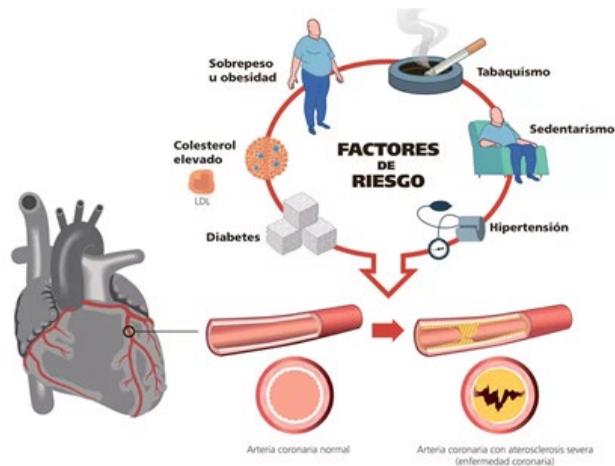


Figura 3. Factores de riesgo para presentar enfermedades cardiovasculares. (Meranini, 2021) <https://www.elperiodico.com/es/bienestar/20210929/dia-mueren-espana-350-personas-12119213>

Actualmente, se manifiesta que las enfermedades crónico-degenerativas, las cuales se consideran no transmisibles, se pueden contagiar socialmente; ya que lo que se contagia son los factores de riesgo más no la enfermedad, y el contagio no implica condiciones físicas. Incrementar la autoconciencia de riesgo desde edades tempranas puede ser una alternativa eficiente para apoyar las campañas educativas a la población joven. Las enfermedades no transmisibles pueden ser de carácter hereditario; sin embargo, el medio ambiente en el que nos desenvolvemos es el único factor que podemos modificar para tratar de prevenir, disminuir o retrasar posibles complicaciones.

Sedentarismo

Hamilton et al. (2007), señalan que el estilo de vida sedentario representa un factor de riesgo importante en el desarrollo de enfermedades cardiovasculares, sobrepeso e incluso en algunos tipos de cáncer. Así mismo, los trabajos de Pate et al., (2008) demuestran que los niveles de actividad física bajos en adultos, se asocian con diversos factores de riesgo cardiovascular, como lo son la obesidad generalizada, dislipidemias (hipertrigliceridemia e hipercolesterolemia), así como obesidad central.

Crespo-Salgado et al. (2014) mencionan que una persona sedentaria es aquella que realiza al menos 30 minutos de actividad física moderada durante 3 o más días de la semana. Desde el punto de vista del gasto energético, se puede definir como sedentario o inactivo a aquella persona que no genera un gasto de al menos 600 Mets-minuto.

Una persona sedentaria no genera en su actividad cotidiana lo mínimo recomendado de ejercicio físico requerido para mantener un estado saludable. La evidencia actual demuestra que la actividad física reduce

la mortalidad total en enfermedades cardiovasculares, entre ellas la cardiopatía isquémica, la hipertensión, así como la diabetes no dependiente de Insulina (Figura 3). A lo largo del tiempo se ha descrito la importancia del movimiento, entendiendo que no necesariamente mejorarán factores como el consumo máximo de oxígeno; sin embargo, la actividad física podría mejorar aspectos metabólicos como la concentración de glucosa o la concentración de lípidos del individuo (López et al., 2019).

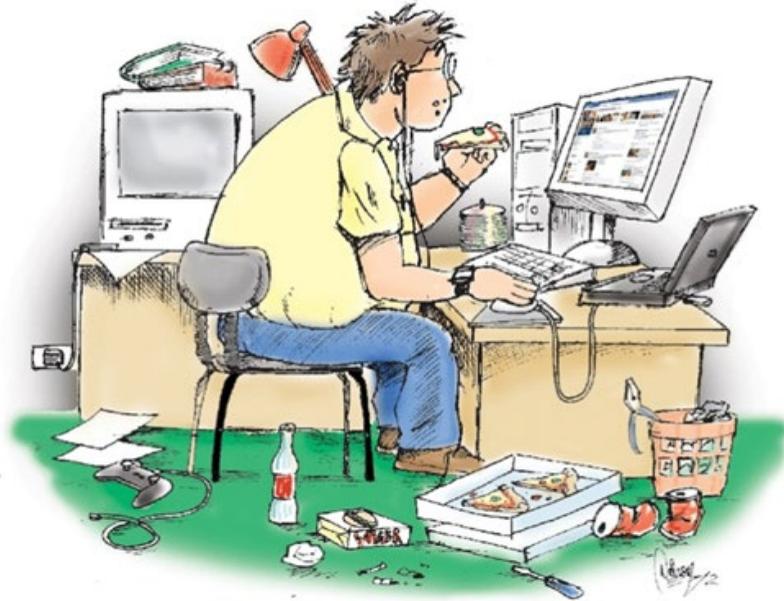


Figura 4. Ejemplo del mexicano promedio con estilo de vida no saludable (Cardozo, 2020)
<https://www.emaze.com/@awlliolz/el-sedentarismo>

La modificación de estilos de vida saludables debería incluir a la educación para la salud, lo que incluye el consejo de actividad física en las consultas de atención primaria. Generando motivación al paciente en cada consulta, con el objetivo de evitar abandonos y aumentar su efectividad, con el objetivo de contrarrestar los hábitos de vida no saludable de un gran parte de la población mexicana (Figura 4)

En general, los beneficios que puede reportar la actividad física son mayores que los posibles riesgos. Para la población adulta resulta complicado disminuir las conductas o momentos de inactividad, ya que la mayoría de los trabajos mantienen a sus empleados en las mismas posiciones por periodos de tiempo prolongados, lo que aumenta el riesgo de lesiones del aparato locomotor.

Las lesiones musculoesqueléticas pueden minimizarse si se fomenta un programa de actividad física inicialmente moderado y de bajo impacto, que progrese gradualmente hasta alcanzar una mayor intensidad y genere la mayor cantidad de beneficios en el individuo (Crespo-Salgado et al., 2014).

Conclusiones

La educación para la salud es un proceso multidisciplinario que utiliza diversas estrategias y herramientas; incluido el proceso de enseñanza-aprendizaje para alcanzar, proteger y mantener o modificar hábitos y conductas personales relacionados con la salud, promoviendo a través de programas enfocados en una toma de decisiones de acuerdo con las necesidades encontradas en un primer diagnóstico, considerando el equilibrio del individuo con el medio ambiente y su calidad de vida.

Dentro del proceso de promoción y prevención a la salud se recomienda practicar al menos 150 minutos de actividad física de manera semanal para disminuir la incidencia de enfermedades como la obesidad, las dislipidemias, la diabetes mellitus, la hipertensión arterial o cáncer. También es importante reconocer que la actividad física es un movimiento del cuerpo producido por músculos y articulaciones para evitar el reposo, mientras que el ejercicio físico es una actividad repetitiva, pero con cierta planeación y estructura.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

AGRADECIMIENTOS

Se extiende el agradecimiento al Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por facilitar espacios de investigación y divulgación para los alumnos de posgrado.

REFERENCIAS

- Cobo-Mejía, E. A., Prieto-Peralta, M., & Cuellar, C. S. (2016). Efectos de la actividad física en la calidad de vida relacionada con la salud en adultos con hipertensión arterial sistémica: revisión sistemática y metaanálisis. *Rehabilitación*, 50(3), 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.rh.2015.12.004>
- Delgado, J. C. S., Fonseca, A. A., & Parra-Patiño, J. (2015). Participación en un programa de acondicionamiento físico y capacidad funcional en sujetos sometidos a angioplastia por síndrome coronario agudo. *Fisioterapia*. <https://doi.org/10.1016/j.ft.2014.08.001>
- Duque-Fernández, L. M., Ornelas-Contreras, M., & Benavides-Pando, E. V. (2019). Actividad física y su relación con el envejecimiento y la capacidad funcional: una revisión de la literatura de investigación. *Psicología y Salud*, 30(1), 45-57. <https://doi.org/10.25009/pys.v30i1.2617>
- García-García, E., De La Llata-Romero, M., Kaufer Horwitz, M., Tusié-Luna, M. T., Calzada León, R., Vázquez Velázquez, V., Barquera-Cervera, S., De Jesús Caballero-Romo, A., Orozco, L., Velásquez-Fernández, D., Rosas Peralta, M., Barriguete-Meléndez, A., Zacarías-Castillo, R., & Sotelo-Morales, J. (2008). La obesidad y el síndrome metabólico como problema de salud pública: una reflexión. *Salud Publica De Mexico*, 50(6), 530-547. <https://doi.org/10.1590/s0036-36342008000600015>
- González Gross, M., & Meléndez, A. (2013). Sedentarism, Active Lifestyle and Sport: Impact on health and obesity Prevention. *PubMed*, 28 Suppl 5, 89-98. <https://doi.org/10.3305/nh.2013.28.sup5.6923>
- Phyo, A. Z. Z., González Chica, D. A., Stocks, N., Woods, R. L., Tran, T., Reid, C., Tonkin, A., Nelson, M., McNeil, J. J., Murray, A. M., Gasevic, D., Freak Poli, R., & Ryan, J. (2022). Trajectories of physical health-related quality of life and the risk of incident cardiovascular disease events and all-cause mortality in older people. *American Heart Journal Plus: Cardiology Research And Practice*, 13, 100117. <https://doi.org/10.1016/j.ahjo.2022.100117>
- Ramos, W., Venegas, D., Honorio, H., Pesantes, J., Arrasco, J., & Yagui, M. (2014). Enfermedades no transmisibles: efecto de las grandes transiciones y los determinantes sociales. *Revista Peruana de Epidemiología*, 18(1), 1-10. <https://www.redalyc.org/pdf/2031/203132677006.pdf>
- Suarez, A. L., González, J. E., Robles, M. B., Alwakil, M., Saucedo, J. M. T., Quirell, A. B., Ramos, M. Á. B., & Palacín, F. F. (2008). Prevalencia de obesidad, diabetes, hipertensión, hipercolesterolemia y síndrome metabólico en adultos mayores de 50 años de Sanlúcar de Barrameda. *Revista Española de Cardiología*, 61(11), 1150-1158. <https://doi.org/10.1157/13127846>

POLÍTICAS INSTITUCIONALES SOBRE CERTIFICACIONES DEL INGLÉS EN EDUCACIÓN PARA LA SALUD EN NIVEL POSGRADO: EL CASO DEL ESTADO DE PUEBLA

INSTITUTIONAL POLICIES ON ENGLISH CERTIFICATIONS IN HEALTH EDUCATION AT POSTGRADUATE LEVEL:
THE CASE OF THE STATE OF PUEBLA

César Augusto Borrromeo García
Jorge Alejandro Fernández Pérez
Marco Antonio Mora Ramírez
Ricardo Pérez Avilés

<https://orcid.org/0000-0001-9279-8870>
<https://orcid.org/0000-0002-5275-3309>
<https://orcid.org/0000-0003-4155-8978>
<https://orcid.org/0000-0003-4616-6615>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

Doctorado en Investigación y Educación para la Salud. Instituto de Ciencias, BUAP
cesar.borrromeogarcia@viep.com.mx; jorge.fernandezperez@viep.com.mx
marco.mora@viep.com.mx; ricardo.perez@viep.com.mx

RESUMEN

El idioma inglés sirve como *lingua franca* para la formación continua y mejoramiento profesional y académico del personal del área de la salud. El inglés es reconocido como un requisito para el ingreso, permanencia y egreso de estudiantes de posgrado. Las instituciones educativas tienen políticas respecto a la competencia lingüística de los candidatos en sus posgrados. El objetivo de este trabajo es explorar el papel de las certificaciones de inglés en programas de salud de posgrado afiliados al Sistema Nacional de Posgrados del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (SNP-CONAHCYT) ubicados en el estado de Puebla, México. Se exploraron los programas de salud existentes en el estado de Puebla en cuanto a requisitos de ingreso, permanencia y egreso para encontrar información sobre las certificaciones de inglés requeridas. Hay 22 programas de posgrado en cuatro instituciones: 12 de los programas de posgrado indicaron explícitamente como requisito una certificación de inglés, dos no lo especificaron, y ocho no mencionaron explícitamente requerir un certificado o competencia lingüística. Las especializaciones y maestrías requieren niveles más bajos, mientras que los doctorados requieren un nivel más alto. Se concluye que la uniformidad en los requisitos de competencia en inglés en el campo de la salud en Puebla aún tiene áreas de oportunidad. Hay una variación en los requisitos de las instituciones, lo que puede significar una formación con áreas de oportunidad para los estudiantes.

Palabras clave: educación para la salud, inglés, posgrados, formación de recursos humanos

ABSTRACT

The English language serves as the *lingua franca* for the ongoing training and continuous improvement of professional and academic personnel in all areas of health. English is recognized as a requirement for the admission, continuation, and graduation of health students, and as such, educational institutions have policies regarding language proficiency for their candidates. This work aims to explore the role of English language certifications in postgraduate health programs affiliated with the National Postgraduate System of the National Council of Humanities, Science, and Technology (SNP-CONAHCYT) in Puebla, Mexico. All existing health programs in Puebla were explored regarding entry, continuation, and graduation requirements to find information about the required English language certifications. It was found that there are 22 postgraduate programs in four institutions; 12 of the postgraduate programs explicitly indicated the requirement for an English certification, two did not specify such a requirement, and eight did not explicitly mention requiring a certificate or language proficiency. Specializations and master's degrees required lower levels (A₂ to B₁), while doctorates required a higher level (B₁₊ to C₁). It is concluded that uniformity in English language proficiency requirements in the health field in Puebla still has areas for improvement. There are no standardized criteria, even within the same institution. The high variation in requirements means that postgraduate students may have academic training in areas of opportunity. The English language serves as the *lingua franca* for the ongoing training and continuous improvement of professional and academic personnel in all areas of health. English is recognized as a requirement for the admission, continuation, and graduation of health students, and as such, educational institutions have policies regarding language proficiency for their candidates. This work aims to explore the role of English

language certifications in postgraduate health programs affiliated with the National Postgraduate System of the National Council of Humanities, Science, and Technology (SNP-CONAHCYT) in Puebla, Mexico. All existing health programs in Puebla were explored regarding entry, continuation, and graduation requirements to find information about the required English language certifications. It was found that there are 22 postgraduate programs in four institutions; 12 of the postgraduate programs explicitly indicated the requirement for an English certification, two did not specify such a requirement, and eight did not explicitly mention requiring a certificate or language proficiency. Specializations and master's degrees required lower levels (A2 to B1), while doctorates required a higher level (B1+ to C1). It is concluded that uniformity in English language proficiency requirements in the health field in Puebla still has areas for improvement. There are no standardized criteria, even within the same institution. The high variation in requirements means that postgraduate students may have academic training in areas of opportunity.

Keywords: health education, English language, postgraduate programs, human resources training

INTRODUCCIÓN

En el mundo, la lengua franca o idioma puente es el inglés. Un idioma puente es aquel que permite a hablantes de diversos idiomas lograr una comunicación usando un idioma específico (Zikmundová, 2016). Durante muchos años, este idioma ha sido el inglés debido a la importancia de naciones de habla inglesa en la economía, sociedad, política y cultura. Antes de la Segunda Guerra Mundial fue el Reino Unido, y después fueron los Estados Unidos de América (Crystal, 2003, p. 10). En cualquier caso, esto ha sido mayormente por prácticas imperialistas de ambos países (Chomsky, 2016).

Hoy en día, casi todos los avances en materia de ciencia y tecnología se publican en inglés

(Saeed, 2023), debido a que este permite a más hablantes de diversos idiomas acercarse a los avances científico-tecnológicos de una manera más cómoda y acceder a información más diversa y con miradas globales. Torres (2017) señala que un 79% de las publicaciones científicas son escritas en inglés, mientras que sólo un 6% son escritas en español. Otros idiomas como el alemán, chino y francés tienen cierta presencia en el mundo científico y académico, pero es muy pequeña su influencia (Liu, 2016). Esto demuestra la gran importancia que tiene el idioma inglés en la ciencia y tecnología, incluidas las disciplinas del área de la salud, ya que las bases de datos más grandes del mundo se han creado en inglés (National Institute of Health, 2024). Los profesionales de la salud deben, por tanto, estar preparados en el dominio de este idioma para obtener información de una manera más adecuada y acceder al intercambio académico y de ideas con colegas de otras nacionalidades, quienes suelen comunicarse en inglés con la finalidad de internacionalizar sus conocimientos.

A pesar de lo anterior, muchos profesionales de la salud carecen del dominio y los conocimientos del idioma inglés para conseguir la información que se publica en dicho idioma (Marín y Hernández, 2022). Asimismo, desde hace más de una década, ha habido poco aprovechamiento de las becas al extranjero en México por la falta del dominio del idioma inglés (El Informador, 2016; UPN, 2016; Sánchez, 2013), lo que sucede tanto en el nivel licenciatura y en todos los niveles de posgrado; de manera que no se tiene acceso a información esencial para su formación y se tienen menos posibilidades de movilidad internacional, así como dificultades para los trámites institucionales requeridos para el egreso.

En este contexto, los posgrados son clave para el mejoramiento de la calidad en la formación de sus estudiantes. Asimismo, estos profesionales requieren ser competentes en el uso del idioma inglés. Los estudiantes de los

posgrados saben que tener dominio del idioma les permite tener acceso a información y a movilidad internacional. No obstante, también saben que no contar con un documento que avale la certificación, muchas veces no los expone a un efecto administrativo adverso, puesto que las Instituciones de Educación Superior (IES) no exigen la presentación de dicho documento para el egreso. Debido a esto, la formación en su especialidad que obtienen puede tener limitaciones al no contar con acceso directo a información de primera mano y en el idioma original.

De tal forma que, este trabajo tiene como objetivo principal describir el estado de la política institucional y facultativa de los diversos programas del área de la salud con respecto a los requisitos de certificación de idioma inglés. Esta descripción incluye los posgrados en universidades públicas y privadas del Estado de Puebla adheridos al Sistema Nacional de Posgrados (SNP) del (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología) CONAHCYT. A continuación, se presentan los objetivos específicos:

- Conocer el estado de la cuestión sobre certificaciones de idioma en posgrados del SNP en el Estado de Puebla
- Exponer a candidatos las necesidades sobre dominio de idioma en ciertos programas

Organismos que regulan los posgrados

En esta sección se analizan 2 escenarios de los organismos que regulan los posgrados. El primero es el Consejo Nacional De Humanidades Ciencia Y Tecnología De México (CONAHCYT), organismo que regula el Sistema Nacional de Posgrados (SNP) y el segundo son las IES propias, que muchas veces optan por seguir la política pública que dicte el primero.

Para el escenario del CONAHCYT, debemos de considerar que existen 2 modalidades de

financiamiento para la formación de capital humano en posgrados. La primera modalidad son las becas nacionales, las cuales brindan apoyo económico para estudiar un posgrado en México. Como forma opcional de formación, se ubican las becas mixtas, apoyos complementarios para realizar movilidad internacional (como modalidad opcional y adicional a la nacional y con la que pueden realizar intercambios internacionales por periodos cortos de tiempo mientras tengan una beca nacional). La segunda modalidad son las becas al extranjero directas en donde el estudiante aplica para una beca para realizar estudios en alguna universidad en el extranjero. Para el primer tipo de financiamiento el CONAHCYT no requiere prueba de dominio de idiomas (CONAHCYT, 2023a), esto significa que sus becas de movilidad internacional no están sujetas a demostrar el dominio del idioma del país destino del estudiante. En el segundo tipo de financiamiento, el candidato requiere certificación del idioma inglés nivel B2, adicional al idioma principal del país destino. Este requisito desapareció en la convocatoria de 2023 (CONAHCYT, 2023b).

Es importante recalcar que el CONAHCYT no realiza pagos de cursos de idiomas ni de certificaciones para los candidatos, por lo que cada uno debe tener los medios para pagar su curso de idioma o su certificación antes de postularse a una beca. Esto es una excepción en ciertos casos, donde organismos del país destino tiene convenios especiales con el CONAHCYT y en cuyas convocatorias se incluyen formación en idiomas gratuitas para los candidatos. No obstante, estas suelen ser convocatorias específicas y limitadas.

En el segundo escenario, el de las IES, es bastante más complejo, ya que estas se dividen en dos sectores: educación pública y privada. En consecuencia, las IES de cada sector tienen diferencias entre sí; por ejemplo, no hay una uniformidad respecto a las reglas de operación y los requisitos de ingreso, permanencia y egreso. Las IES públicas funcionan así: 1) las universidades autónomas

tienen leyes orgánicas, mientras que las no autónomas tienen reglamentos definidos sobre su forma de operación, y en ambos casos son las facultades (comúnmente) las que deciden sobre aspectos de ingreso, permanencia y egreso; 2) en las IES privadas, cada una tiene sus formas de organización y requisitos, especialmente si son privadas no autónomas, aunque suelen ser más organizadas si la institución tiene varias sedes o campus a nivel nacional; 3) las privadas tienen la característica de tener leyes orgánicas y

Ahora se conocen ambos actores involucrados. Por un lado, el CONAHCYT que dicta lo que se debe de requerir para que programas de posgrado puedan ingresar, permanecer o ser removidos del SNP. Por el otro, las IES que tienen los posgrados, los cuales muchas veces se esfuerzan para ir acorde con las políticas del CONAHCYT y así obtener recursos para la institución o sus estudiantes. Por lo tanto, este trabajo busca explorar el papel de las certificaciones de idioma en los programas del SNP en el Estado de Puebla. Para esta investigación, se revisaron los programas relacionados al área de la salud de las IES que se encuentran dentro del SNP al corte del mes de noviembre de 2023. A continuación, se describe la metodología utilizada en esta investigación.

Metodología

El presente trabajo es un estudio cualitativo con enfoque interpretativo, de corte transversal y explicativo. Se implementaron técnicas de investigación y sistematización documental que permitió obtener información para identificar las características principales, y así realizar una interpretación de la información (Reyes y Carmona, 2020). Esta es una forma distinta de ver problemas similares ya explorados desde un modelo cuantitativo exploratorio (Ochoa et al, 2018).

El objeto de estudio son las políticas

institucionales y facultativas de las diferentes IES que cuentan con programas del área de la salud en el Estado de Puebla, México. Existen 100 instituciones en el Estado de Puebla que ofrecen un programa en área de la salud, y estas ofrecen 318 programas y atienden a casi 62,000 estudiantes (Borromeo y Fernández, 2023). Sin embargo, el número de instituciones que cuentan con programas en el área de la salud y que están inscritos en el SNP son 4 y solo 22 programas. Estos fueron los documentos investigados.

A partir de la lista de posgrados del Sistema Nacional de Posgrados de CONAHCYT (CONAHCYT, 2023c) con fecha de corte noviembre de 2023, se filtraron los datos de los posgrados que se ubican en el estado de Puebla y que pertenecen al área de la Salud. Para cada posgrado se realizó una búsqueda con respecto a los requisitos de: certificación del idioma inglés, el nivel mínimo requerido de acuerdo con el Marco Común Europeo de Referencia para las Lenguas (MCER), los certificados válidos aceptados (TOEFL, Cambridge u otros), y el momento de entrega del certificado (ingreso o egreso). Con estos datos se realizó una estadística descriptiva. A continuación, se describen los principios metodológicos para la obtención de los datos.

Principios metodológicos para la obtención de datos

En esta sección se presentan los principios metodológicos utilizados para la obtención de los datos que sustentan esta investigación. El proceso empleado para la revisión documental se fundamenta en el procedimiento llevado a cabo en los estados del conocimiento del Consejo Mexicano de Investigación Educativa (COMIE) de López et al (2013, p. 26). Para la investigación actual se implementaron algunas variaciones ligeras. A continuación, se describe la metodología que se usó, ya incluyendo las adaptaciones que se hicieron:

1. Determinar la especialidad o área de

conocimiento: área de la salud.

2.Determinar la localización geográfica o institución(es) a observar: Estado de Puebla.

3.Determinar otras limitaciones o excluyente: posgrados listados en el SNP-CONAHCYT hasta noviembre de 2023.

4.Realizar la búsqueda siguiendo las directrices establecidas. La búsqueda se debe hacer en bases de datos que permitan filtrar o importar sistemas adecuados para filtrado y mejor manejo de datos: el Sistema Nacional de Posgrado de CONAHCYT tiene filtros integrados, pero se importó la información a Excel para añadir los filtros requeridos y sistematizar la información para la investigación.

5.Recabar la información sistemáticamente, incluyendo datos de institución y cualquier información que se desee obtener y observar. Preferentemente de forma directa de las instituciones: se obtuvo información sobre si se requiere certificación del idioma inglés, y en caso positivo, el nivel mínimo requerido de acuerdo al MCER (los cuales son 6 niveles de dominio, ordenados de menor a mayor: A1, A2, B1, B2, C1, C2), así como los certificados válidos aceptados (TOEFL, Cambridge u otros), y el momento de entrega del certificado (ingreso o egreso).

6.Realizar análisis de información usando los métodos adecuados: se llevó a cabo una estadística descriptiva.

7.Obtener resultados.

8.Analizar información.

9.Escribir y reportar hallazgos.

Resultados

Se localizaron cuatro instituciones que cuentan con 22 posgrados del área de la salud en el SNP. Estas instituciones fueron: 1) como la única pública, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), y 2) tres privadas: la Universidad Iberoamericana de Puebla (Ibero), la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP).

Hay 22 programas de posgrado inscritos en el SNP. De estos 22 programas 6 corresponden a doctorados, 9 a maestrías y 7 a especialidades. La mayoría de los posgrados inscritos en el SNP están en la única IES pública, BUAP con 18 (82 %) de los programas, mientras que la Ibero tiene 2 (9%) y la UDLAP y UPAEP (4.5 % cada una). Figura 1. La BUAP cuenta con cuatro programas de doctorado (mostrado en color azul), ocho de maestría (mostrado en color morado) y seis especialidades (mostrado en color rojo). La Ibero cuenta con un programa de doctorado y uno de maestría. La UDLAP cuenta con un doctorado. Finalmente, la UPAEP cuenta con una especialidad.



Figura 1 Distribución de programas de especialidad (rojo), maestría (morado) y doctorado (azul) por institución inscritos en el SNP. Fuente: elaboración propia.

De los programas mencionados anteriormente se obtuvieron los datos respecto a los requisitos sobre certificaciones del idioma inglés. La Figura 2 muestra la misma organización anterior, pero esta vez mostrando aquellos programas que requieren certificación de idioma inglés con paloma verde. Los que no requieren certificación con una cruz roja, y aquellos que no requieren una certificación con signo de interrogación amarillo.

Aunque para estos programas se menciona que el estudiante egresado debe manejar el idioma de cierta forma (que debe entenderlo de forma adecuada, lo cual es poco definido ni permite entender lo que se desea). Es posible ver que en la BUAP poco más de la mitad (10 casos) requieren algún tipo de certificado de idioma. Esto puede deberse a los distintos tipos de posgrados que existen, como de investigación o profesionalizante, y las necesidades de los propios estudiantes. Mientras tanto, en el sistema privado, conformado en este estudio por la Universidad Iberoamericana Puebla (Ibero), la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), tres de cuatro casos requieren certificación de idioma. En términos porcentuales, es mayor este requisito en el sistema privado, aunque en términos absolutos, se entiende esto pues sólo hay cuatro programas privados. Esto se debe considerar al comparar entre las instituciones públicas y las privadas para evitar generalizaciones o conclusiones no pertinentes.



Figura 2 Programas por institución indicando si requieren o no certificado de inglés. Fuente: elaboración propia.

Cuando se observan las diferencias entre los niveles de idioma requeridos dependiendo del nivel educativo, se puede hablar de una diferencia importante que es el dominio del idioma para obtener más y mejor información, tal como sugieren autores como Thicke (2011) y McKee y Paasche-Orlow (2012). La figura 3 muestra cómo los doctorados requieren niveles más altos de dominio del idioma (B2 y algunos casos C1). Las maestrías en su mayoría tienen requisitos de nivel B1 o B1 avanzado (B1+). Finalmente, las especialidades requieren certificados, pero no se dice qué nivel deben sustentar los candidatos. En algunos casos incluso se menciona que se requiere “un certificado de dominio del idioma inglés”, pero se omite decir qué nivel. No obstante, se puede considerar que un nivel adecuado en este caso sería un B1. Estas diferencias sobre el nivel requerido tendrían que responder a las necesidades del candidato sobre el manejo eficiente de la literatura a la que se enfrenta, aunque esto no queda claro en ninguna convocatoria o sitio web que fue consultado.



Figura 3 Nivel de dominio de idioma más común por nivel educativo.
Fuente: elaboración propia.

Cuando se comparan los sistemas público y privado, parece haber una desventaja del primero. En el sistema público, 33% de los programas requieren certificado y el 67% no los requiere, así mismo el nivel más requerido es A2. En el sistema privado, 75% de los programas requieren certificado, y el nivel más requerido es B2. Estos números aislados pueden hacer parecer al sistema público como de menor calidad y exigencia que el privado. La cantidad de programas existentes en el sistema privado es el motivo por el que se pueden comprender estos sesgos, o sea, el sistema privado puede parecer que requiere un nivel de idioma mayor por porcentaje, y dar la apariencia de ser más exigente. Adicionalmente, hay dos programas de doctorado que requieren altos niveles de dominio del inglés (específicamente uno en la BUAP que requiere C1 y uno en la UDLAP que requiere B2+). Mientras tanto, en el sistema público, al haber más programas de maestría y especialidad se reduce la rigurosidad del nivel de idioma requerido. Es importante hacer estos señalamientos que de otra forma podrían sesgar la percepción de los lectores.

Finalmente, se observa en la figura 4 la distribución de casos según el momento en que se requiere certificación. En 11 casos (50%), se requiere

demostrar el dominio del idioma antes de egresar del programa. En dos casos (9%) lo requieren al ingreso. En nueve casos (41%) no requieren de un certificado. Demostrar el dominio del idioma al momento de ingresar significa que los estudiantes de posgrado tienen entre uno y cuatro años para adquirir dicho dominio y nivel, dependiendo de la duración del posgrado. En términos sencillos, esto significa que se les brinda el mismo tiempo de formación en el idioma que en su posgrado. De la misma forma, significa que el dominio del idioma no tiene un gran peso dentro del posgrado y que se ve más como un requisito por protocolo que por uso.

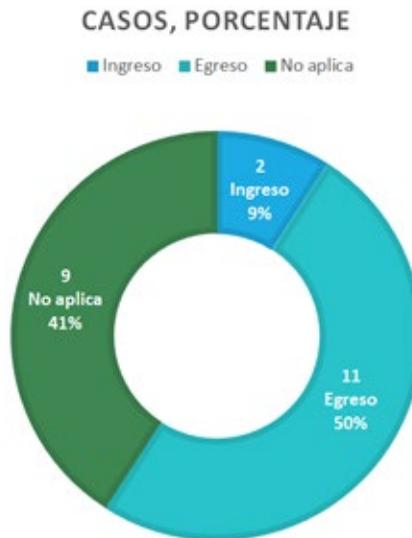


Figura 4 Casos por momento en que requieren el certificado. Fuente: elaboración propia

Discusión

Las políticas públicas en México muchas veces se discuten desde un nivel jerárquico alto (Borromeo y Fernández, 2022). En este sentido, el CONAHCYT es el responsable de una cantidad importante de decisiones que se toman en las instituciones de educación superior en México. Por ejemplo, cuáles son los posgrados y las áreas de conocimiento que se consideran importantes o de prioridad en un momento determinado. Así que las decisiones que tome el CONAHCYT respecto a los requisitos de idioma necesarios para obtener becas de movilidad internacional o becas al extranjero impactarán en las decisiones y políticas de las instituciones de educación superior en el país. Si las reglas del CONAHCYT respecto al dominio del idioma inglés fueran más estrictas, las IES en México no tendrían otra opción que comenzar a considerar el idioma y las certificaciones como un elemento clave de la evaluación y de sus requisitos de ingreso y egreso de los programas de posgrado. El no hacerlo ha llevado a que las IES no perciban el dominio del idioma inglés como un aspecto esencial y clave en la formación de estudiantes de posgrado. Debe considerarse,

sin embargo, que CONAHCYT no puede exigir ningún requisito de ingreso a las IES para evitar imputaciones de intromisión en la autonomía, lo que podría ser un motivo para no proceder con el requisito de certificación de idioma.

Asimismo, no parece que exista un incentivo para los estudiantes ni para las instituciones de demostrar un cierto dominio del idioma inglés por parte del estudiante. En ocasiones se considera incluso como un requisito “vacío” o de poco valor y más como un mero protocolo que debe seguirse para llenar indicadores de las propias instituciones y continuar con sus políticas educativas (Flores, 2020; Mora, Trejo y Roux, 2013).

Los programas de posgrado como tal no incentivan tampoco a que los estudiantes demuestren este dominio del idioma (Mendoza, 2014; Ochoa et al, 2018), esto puede deberse a diferentes motivos. El primero es la existencia de herramientas que permiten al estudiante y personal docente el acceso a la información en otros idiomas traducida al español. Desde los traductores automatizados hasta la inteligencia artificial generativa, son ejemplos de estas herramientas cada vez más confiables y de libre acceso. El segundo motivo es que, potencialmente, los docentes de la institución no cuentan con los instrumentos y materiales adecuados para pedir a sus estudiantes que revisen material, ya sea texto o multimedia, en este idioma (Mendoza, 2014). Por último, la certificación, al no ser clave en los requisitos para ingreso al SNP, y por ende al financiamiento de proyectos o de distribución de becas a estudiantes, puede que el requisito del idioma se vea como una tendencia o política institucional (Flores, 2020) más que funcional. Es decir, como muchas instituciones piden el dominio del idioma en sus posgrados por tendencia o política, algunos programas opten por requerirlo también de forma que se replique lo que otras instituciones están realizando.

Pero se ha notado que existe flexibilidad en esta área. Por ejemplo, hay programas

de posgrado que piden el documento de certificación como ingreso y cuando un candidato no lo tiene, se le brinda una extensión hasta el egreso. Si el estudiante al finalizar sus estudios aún no cuenta con el mismo, a veces se ve como un requisito vacío que no debería impedir su titulación, sobre todo si ya ha hecho el examen profesional o el de titulación, tal como demuestran Ochoa et al (2018). Donde una parte importante de los graduados de programas que requieren la certificación de idioma simplemente no lo tienen. Esto a pesar de que los propios reglamentos de las instituciones marcan como requisito de titulación el cumplimiento de los requisitos de la facultad donde se realizan los estudios.

Lo anterior también implica que los programas de posgrado y las propias instituciones no ven, mayormente, como clave el uso del idioma durante el posgrado (Flores, 2020). A veces se demuestra que se desea más que la formación en el idioma se realice en paralelo a la del posgrado, y que la mitad de los programas lo requieren al egresar y no al ingresar demuestra esta postura. Es decir, no se considera como clave el dominio del idioma durante los estudios. Por ende, las instituciones no hacen un uso del idioma durante la formación de los estudiantes, salvo aquellos que lo requieran por ser posgrados de corte o estudio internacional o aquellos que lo requieran al momento del ingreso.

A pesar de lo anterior, sigue habiendo cierta consistencia entre los posgrados respecto al nivel de aquellos programas que sí requieren una certificación. Las especialidades no requieren una certificación específica, pero sí requieren un cierto dominio del idioma (aunque como se mencionó, no se comprende bien qué nivel de habilidades se requieren, y más bien se menciona que el idioma es necesario). Por otra parte, las maestrías requieren un nivel más específico y bien declarado en la documentación revisada, el cual se estima entre el B1 y el B1+, aunque en algunos casos se requiere dominio A2 (un poco más bajo).

Las maestrías requieren un nivel intermedio. Finalmente, los doctorados suelen requerir un nivel B2 hasta el C1, que se puede considerar un nivel intermedio alto. Estas diferencias entre los niveles de posgrados se pueden comprender debido a la propia necesidad de los estudiantes de dominar la literatura a un nivel más profundo (Marín y Hernández, 2022). De igual manera, entre mayor sea el nivel de dominio de idioma, más posibilidades existe de que haya interés de realizar movilidad internacional en países de habla no española y lograr realmente formarse como parte de un mundo donde la información no se limita al idioma nativo (Crystal, 2003).

Conclusiones

El CONAHCYT no es el organismo adecuado para llevar a cabo una transformación en la forma en que se ve el idioma inglés a nivel posgrados, especialmente porque puede considerarse fuera de sus atribuciones y una interferencia a la autonomía institucional o injerencia en la educación privada. No obstante, no se puede negar que tiene un impacto muy fuerte en la toma de decisiones de las instituciones y sus programas educativos. Usualmente, los cambios que se realizan a procesos en las instituciones tienen que ver con las políticas que dicta este ente nacional. Así, hay espacio para que CONAHCYT con su innegable influencia pueda llevar a un cambio inicial y mejorar a los candidatos a una beca para estudios de posgrados, en especial, requiriendo una certificación de idiomas para estudiar posgrados nacionales.

Esto nos coloca, sin duda, en una situación interesante. Hay dos posibles escenarios a una hipotética y especulativa reacción del CONAHCYT requiriendo certificados de idioma: 1) la cantidad de candidatos que obtienen una beca y estudian un posgrado se reduce debido a que son pocas las personas que tienen un nivel adecuado de idioma para obtener un certificado de acuerdo con los niveles explorados (English First, 2023) , o 2)

Finalmente, estudios donde se explore la relación entre certificaciones de idioma y la política institucional no se han realizado antes en el contexto descrito, aunque sí existen en otros contextos (Ochoa et al, 2018). Esto brinda una nueva posibilidad a personas interesadas en conocer la relación e importancia de los idiomas con la formación especializada de recursos humanos en México, especialmente en el área de la salud.

los candidatos tendrían acceso a una mayor vasta cantidad de recursos e información disponible (El Informador, 2016; Flores, 2020). Cualquiera que fuera la decisión de CONAHCYT (ya sea cambiar la política o dejarla igual) nos coloca en una situación comprometedor. Por un lado, si se reduce la cantidad de candidatos, también se reduce la formación de recursos humanos especializados en el país. Por el otro, dejar la política como se encuentra actualmente, se seguirá formando a profesionales que son capaces de entender y producir ciencia y tecnología en su idioma madre: español, pero poco en idioma inglés.

De ahí que un camino más posible sea el de exigir más a nivel posgrados e instituciones en relación con sus políticas respecto a los certificados de idioma. Es decir, que sean las propias IES que traten de mantener sus políticas (o mejorarlas) respecto a la certificación del idioma para sus candidatos. La legislación institucional de las diversas universidades es clara: cada institución ya sea pública o privada cuenta con sus propios medios para seleccionar a sus candidatos y tomar decisiones respecto a ingreso, permanencia y egreso.

Como se pudo observar, la mayoría de las

instituciones y posgrados explorados en este estudio ya cuentan con decisiones tomadas al respecto de su requerimiento de certificaciones del idioma inglés. Ahora es momento de ejercer dichas decisiones y hacer que aquellas instituciones que requieran certificados, realmente lo exijan como un requisito de ingreso, permanencia o egreso. Es decir, que se deje de considerar como un requisito poco importante y que los candidatos consideren que es requerido para obtener el título de grado y poder cumplir con los compromisos con CONAHCYT. No obstante, la realidad es que esos posgrados miembros del SNP requieren de una eficiencia terminal para estar en buenos términos con el CONAHCYT (CONACYT, 2021, p. 42), por lo que esta ruta se ve igualmente comprometida.

Una ruta que también pueden tomar las IES es la de contar con profesores que tengan la capacidad de brindar cursos en el idioma inglés. La internacionalización y preparación de profesores y estudiantes es algo que subirá, sin duda, la exigencia y reputación de estos posgrados (Cano, 2019 Escobedo, 2014). Contar con al menos la capacidad de demostrar que, en algún momento de su formación, se requerirá el idioma inglés por la naturaleza de la información y su origen (que suele ser generada principalmente en ese idioma), es una forma viable de exigir una certificación a los estudiantes al ingresar.

Así, quedan entonces algunas preguntas que no se pueden contestar en este trabajo, pero que sería interesante explorar en el futuro:

1. De no haber flexibilidad en CONAHCYT y en posgrados respecto a requerir de forma obligatoria un certificado de idioma, ¿habría menos ingreso a posgrados y asignación de becas de movilidad al extranjero?

2. ¿Qué papel juegan los cursos de idioma regulares, especializados y propedéuticos en el estado actual de requisito de idioma en nivel posgrado?

3. ¿Qué importancia tiene la formación del idioma desde el nivel licenciatura, donde las bases disciplinares se forman y donde se puede comenzar con la formación lineal en ambos aspectos?

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del documento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en este artículo

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) de México, mediante los programas Estancias Posdoctorales por México 2022-2024 y el Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

REFERENCIAS

- Borromeo, C.A. y Fernández, J.A. (2023). Una Revisión Del Sistema De Educación Para La Salud, Y Los Espacios Laborales Públicos En Puebla. 1er Congreso Internacional Multidisciplinario de la Divulgación Científica, Universidad Autónoma de Aguascalientes. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25768.34560>
- Borromeo, C.A. y Fernández, J.A. (2022). Políticas de inacción en la Universidad Veracruzana: Impacto en los docentes. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 11(31). <https://doi.org/10.31644/IMASD.31.2022.a05>
- Cano, J.D. (2019). Planeación estratégica del Complejo Regional Centro de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla 2019-2021. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/3167dc99-5e2f-47bf-bda7-d90bb2e3a399>
- Chomsky, N. (2016). *Hegemonía o supervivencia: La estrategia imperialista de Estados Unidos*. México: Penguin Random House.
- CONACYT. (2021). Programa Nacional de Posgrados de Calidad. Anexo Instrumento de Evaluación Posgrados con la industria (tecnológicos) Tipo: Escolarizada. https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/convocatorias/PNPC/2021/Anexo_Posgrados_con_la_Industria.pdf
- CONAHCYT. (2023a). Convocatoria becas de posgrado y apoyos complementarios para el área de salud 2023. https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/convocatorias/becas_nacionales/TDR_Esp_Med_Nacionales_2023.pdf
- CONAHCYT. (2023b). Becas al extranjero para estudios de posgrado. https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/convocatorias/becas_extranjero/documentos/2023/Convocatoria_Becas_Extranjero_Posgrados_2023.pdf
- CONAHCYT. (2023c). Portal de Consultas del Sistema Nacional de Posgrados (SNP). <https://conahcyt.mx/consultas-snp/>
- Crystal, D. (2003). *English as a global language*. Reino Unido: Cambridge University Press.
- Escobedo, O.A. (2014). Periphery Undergraduate Students' beliefs on English as a graduation requirement: a mix-methods study in a University Regional Campus of the BUAP. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/102eac96-69cf-451f-89d7-909e1ac33b17/content>
- Flores, A.B. (2020). Certificación de inglés como lengua extranjera y comprensión lectora. Caso Instituto de Educación Superior en Estudios de la Salud (IESALUD). Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/22394/>
- El Informador. (2016). Desperdician becas de inglés para estudiar en EU. El Informador [Periódico en línea]. <https://www.informador.mx/Jalisco/Desperdician-becas-de-ingles-para-estudiar-en-EU-20160211-0122.html>
- English First. (2023). EF EPI México. <https://www.ef.com.mx/epi/regions/Latin-america/mexico/>
- Liu, W. (2016). The changing role of non-English papers in scholarly communication: Evidence from Web of Science's three journal citation indexes. *Learned Publishing*, 30: 115-123. <https://doi.org/10.1002/Leap.1089>
- López, M., Sañudo, L. y Maggi, R.E. (2013). Investigaciones sobre la investigación educativa 2002-2011. Consejo Mexicano de Investigación Educativa. <https://www.comie.org.mx/v5/sitio/wp-content/uploads/2020/08/Investigaciones-sobre-la-investigaci%C3%B3n-educativa.pdf>

- Marín, A. y Hernández, M.I. (2022). English lexical competence of university students in México. *Revista Lengua y Cultura*, 4. 15-25. 10.29057/lc.v4i7.8726
- McKee, M.M. y Paasche-Orlow, M.K. (2012). Health Literacy and the Disenfranchised: The Importance of Collaboration Between Limited English Proficiency and Health Literacy Researchers. *Journal of Health Communication*, 17(sup3), 7-12, DOI: 10.1080/10810730.2012.712627
- Mendoza, A. (2014). Las prácticas de evaluación docente y las habilidades de escritura requeridas en el nivel posgrado. *Innovación educativa*, 14(66), 147-175. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-26732014000300009&lng=es&tlng=es
- Mora, A., Trejo, N.P y Roux, R. (2013). Can ELT in Higher Education be Successful? The Current Status of ELT in Mexico. *TESL-EJ*, 17(1), pp. 1-26. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1007570.pdf>
- National Institute of Health. (2024). NIH Virtual Tour: National Library of Medicine. https://www.nih.gov/virtual-tour/#ctdl-UMAP_20220603185441371,BLD_20220802141655254
- Ochoa, M.G., García, M., Hernández, M.C. y Sang, Y. (2018). EFL Como Requisito Para Estudios De Posgrado En México: El Caso De Los Egresados Del Área De Ciencias Biológico Agropecuarias y Pesqueras de La Universidad Autónoma de Nayarit. *European Scientific Journal*, 14(28), pp. 101-114. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n28p101>
- Reyes-Ruiz, L. & Carmona Alvarado, F.A. (2020). La investigación documental para la comprensión ontológica del objeto de estudio. Doctorado en Psicología. 1-4 <https://bonga.unisimon.edu.co/bitstream/handle/20.500.12442/6630/La%20investigaci%C3%B3n%20documental%20para%20la%20compresi%C3%B3n%20ontol%C3%B3gica%20del%20objeto%20de%20estudio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Saeed, S. (2023). Languages in science. Mars Translation [Publicación en sitio web]. <https://www.marstranslation.com/blog/languages-of-science>
- Sánchez, P. (2013). Desperdician becas por no saber inglés. *El Siglo de Torreón* [Periódico en línea]. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/2013/desperdician-becas-por-no-saber-ingles.html>
- Thicke, L. (2011). Language is essential for access to information. *British Medical Journal*, 343(d6253) doi:10.1136/bmj.d6253
- Torres, A. (2017). The importance of the languages in scientific publications. *Grupo Comunicar*. <https://doi.org/10.3916/school-of-authors-034>
- UPN [Universidad Pedagógica Nacional]. (2016). Más de 500 estudiantes y académicos de la UPN con becas de movilidad. <https://www.gob.mx/upn/articulos/mas-de-500-estudiantes-y-academicos-de-la-upn-con-becas-de-movilidad>
- Zikmundová, E. (2016). English as a lingua franca: Theory and practical implications. <https://core.ac.uk/download/pdf/295581652.pdf>

EDUCACIÓN PREVENTIVA PERIODONTAL: UN ENFOQUE VITAL PARA ADULTOS CON DIABETES E HIPERTENSIÓN

PERIODONTAL PREVENTIVE EDUCATION: A VITAL APPROACH FOR ADULTS WITH DIABETES AND HYPERTENSION

Martin Salas Paniagua (1*)
Maria Deysi Tapia Álvarez (1)
Marayadith Garrido Garrido (2)
Delina Montes Sánchez (2)
Jocelyn Álvarez Rodríguez (2)

<https://orcid.org/0000-0002-2285-5208>
<https://orcid.org/0000-0001-6299-6710>
<https://orcid.org/0009-0009-8517-3261>
<https://orcid.org/0009-0000-5039-6283>
<https://orcid.org/0000-0002-3840-7290>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

ICUAP, Doctorado en Educación Para la Salud (1), Licenciatura en Estomatología Complejo Regional Sur (2), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Carretera Libramiento Tecnológico San Marcos Necoxtla Km 7.5
martin.salas@correo.buap.mx
deysi.tapia@correo.buap.mx
marayadith.garrido@correo.buap.mx
delina.montes@correo.buap.mx
jocelyn.alvarez@correo.buap.mx

RESUMEN

Este artículo aborda la importancia de la educación preventiva periodontal en adultos que enfrentan comorbilidades, específicamente diabetes tipo II e hipertensión. Explora la profunda conexión entre la salud bucal y estas condiciones médicas, destacando la relevancia de la prevención para el bienestar oral y su conexión sistémica. El objetivo principal es difundir de manera accesible la necesidad de adoptar prácticas de cuidado bucal rigurosas, promover exámenes dentales regulares y ofrecer consejos prácticos para la gestión integral de la salud en el contexto de enfermedades crónicas. A través de esta divulgación científica, se busca sensibilizar a la población sobre la interrelación entre la salud bucal y las condiciones médicas concomitantes, fomentando un enfoque preventivo para mejorar la calidad de vida de estos pacientes.

Palabras claves: educación preventiva, periodontal, adultos, comorbilidades, diabetes, hipertensión, salud bucal.

INTRODUCCIÓN

Dentro de la complejidad del ámbito de la salud, se ha reconocido la importancia fundamental de investigar la interacción entre la salud bucal y las condiciones sistémicas. La periodontitis, una enfermedad inflamatoria crónica que afecta los tejidos que respaldan los dientes, ha captado la atención de la comunidad científica por su estrecha relación con enfermedades crónicas como la diabetes tipo II y la hipertensión.

La atención sobre esta enfermedad resalta la urgencia de abordar la salud bucal de manera integral en la gestión de condiciones médicas complejas. La periodontitis, lejos de ser simplemente una afección oral, representa un factor de riesgo significativo que puede aumentar la gravedad y progresión

ABSTRACT

This article addresses the importance of preventive periodontal education in adults facing comorbidities, specifically diabetes and hypertension. It explores the deep connection between oral health and these medical conditions, highlighting the relevance of prevention for oral and systemic well-being. The main objective is to disseminate in an accessible way the need to adopt rigorous oral care practices, promote regular dental examinations and offer practical advice for comprehensive health management in the context of chronic diseases. Through this scientific dissemination, we seek to raise awareness among the population about the crucial interrelationship between oral health and concomitant medical conditions, promoting a preventive approach to improve the life quality of these patients.

Keywords: preventive education, periodontal, adults, comorbidities, diabetes, hypertension, oral health.

de enfermedades sistémicas, especialmente la diabetes e hipertensión. En lugar de ser un sistema aislado, la boca actúa como un reflejo de la salud general, y las condiciones periodontales pueden desencadenar respuestas inflamatorias que se extienden por todo el cuerpo.

En este contexto, surge la educación preventiva periodontal como un enfoque necesario, especialmente para adultos que enfrentan el desafío adicional de gestionar diabetes tipo II e hipertensión. Este enfoque no solo busca prevenir la progresión de la enfermedad periodontal, sino también empoderar a los pacientes con conocimientos que les permitan comprender y manejar la interacción entre su salud bucal y sus condiciones sistémicas.

Conexión entre periodontitis y enfermedades sistémicas

La periodontitis, una enfermedad inflamatoria crónica que afecta los tejidos de soporte de los dientes, ha captado la atención de la comunidad científica debido a su conexión con diversas enfermedades sistémicas. La boca no es un sistema aislado, y las condiciones de salud bucal pueden tener repercusiones en todo el cuerpo. La periodontitis, en particular, ha sido identificada como un factor de riesgo significativo para el desarrollo y la progresión de enfermedades como la diabetes e hipertensión.

La periodontitis, manifestación avanzada de enfermedad periodontal, implica la inflamación crónica de las estructuras de soporte dental, incluyendo las encías y el hueso que rodea los dientes (Figura 1). ¿Esta enfermedad, aparte de afectar la salud oral/bucal?, también tiene implicaciones en la salud general (Loos et al., 2000). La inflamación sistémica desencadenada por la periodontitis se vincula estrechamente con condiciones como la resistencia a la insulina y la disfunción endotelial, las cuales son consecuencia de la diabetes e hipertensión, respectivamente.

La respuesta inflamatoria sistémica generada por la periodontitis no se limita a la cavidad oral. Las bacterias y citocinas inflamatorias pueden ingresar al torrente sanguíneo, desencadenando respuestas inflamatorias en todo el cuerpo (Loos et al., 2000).



Figura 1. Paciente femenina de 44 años con DTII e HAS, se observa retracción de la encía libre hasta llegar a nivel de retracción en encía adherida con depósito de placa dentobacteriana y cálculo subgingival en caras vestibulares de los incisivos centrales inferiores con presencia de eritema e hiperplasia de las papilas interdentes. Tomada en La Clínica Integrales de Estomatología del Complejo Regional Sur (2023)

La relación entre la diabetes tipo II y la periodontitis se establece a través de la respuesta inflamatoria sistémica. Las personas que viven con diabetes tipo II, especialmente aquellos con un control deficiente de la glucosa, tienen una mayor susceptibilidad a la infección y una capacidad reducida para combatir la inflamación. La periodontitis, al ser una fuente continua de bacterias y mediadores inflamatorios, puede aumentar la resistencia a la insulina y contribuir al desarrollo y progresión de la diabetes (Mealey y Oates, 2006).

En el caso de la hipertensión, la periodontitis también desempeña un papel significativo. La inflamación sistémica inducida por la periodontitis puede contribuir a la disfunción endotelial, un marcador clave en el desarrollo de la hipertensión arterial. Además, la presencia de bacterias periodontales en la circulación sanguínea puede afectar la función endotelial y contribuir a la rigidez arterial, elevando así la presión arterial (de Souza et al., 2014).

Cuando la diabetes e hipertensión coexisten en un individuo, la interacción con la periodontitis puede ser aún más compleja. La inflamación sistémica se multiplica, creando un entorno propicio para la progresión de ambas condiciones. La gestión eficaz de la periodontitis se convierte, por lo tanto, en un componente importante del tratamiento integral de pacientes con estas comorbilidades (Jepsen et al., 2018).

Investigaciones de Genco y Borgnakke (2013) sugieren que el tratamiento de la enfermedad periodontal puede mejorar la respuesta metabólica en pacientes diabéticos con

hipertensión. La relación entre la periodontitis y las enfermedades sistémicas, en particular la diabetes e hipertensión, va más allá de la salud oral. La inflamación sistémica desencadenada por la periodontitis puede influir en la progresión y complicaciones de estas condiciones, destacando la necesidad de un enfoque integrado en el cuidado de la salud. La prevención y el tratamiento de la periodontitis emergen como estrategias para abordar estas enfermedades sistémicas y mejorar la calidad de vida de los pacientes.

Datos epidemiológicos refuerzan la conexión entre la periodontitis y las comorbilidades mencionadas. Estudios han demostrado que los pacientes con diabetes presentan una prevalencia significativamente más alta de enfermedades periodontales en comparación con aquellos sin diabetes (Figura 2). Se estima que las personas con diabetes tienen un riesgo tres veces mayor de desarrollar periodontitis (Mealey y Oates, 2006). Similarmente, la hipertensión también ha sido asociada con un mayor riesgo de enfermedad periodontal, con estudios que indican una relación bidireccional entre ambas condiciones (de Souza et al., 2014).

Estas estadísticas no solo subrayan la frecuencia elevada de enfermedades periodontales en pacientes con diabetes tipo II e hipertensión, sino que también resaltan la necesidad urgente de abordar la salud bucal como parte integral de la gestión de estas condiciones sistémicas. La prevención y el tratamiento de la periodontitis se posicionan como estrategias fundamentales para mitigar el impacto negativo en la salud general y mejorar el bienestar de los pacientes.

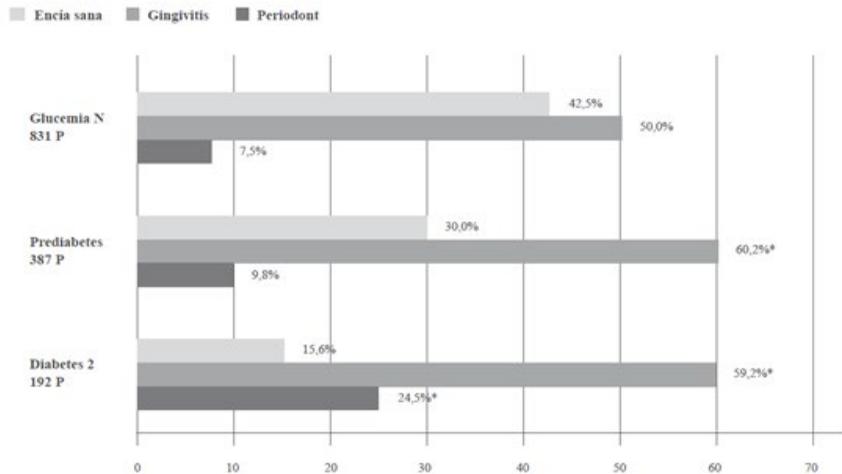


Figura 2. Vínculo entre alteraciones en el metabolismo de la glucosa (prediabetes y DM2) y la salud bucal. A medida que la glucosa se desvía hacia la prediabetes y la DM2, aumenta la prevalencia de problemas periodontales, destacándose la gingivitis en prediabetes y siendo más frecuentes tanto la gingivitis como la periodontitis en DM2. La proporción de individuos con encías saludables disminuye en pacientes diabéticos, Fuente: https://www.redalyc.org/journal/3755/375572965003/375572965003_gf2.png

Impacto de las enfermedades periodontales

Las enfermedades periodontales, particularmente la periodontitis, no solo constituyen una amenaza para la salud bucal, sino que también han demostrado tener impactos sustanciales en condiciones sistémicas, como la diabetes e hipertensión. Este fenómeno complejo va más allá de una simple coexistencia de enfermedades; implica interacciones biológicas que pueden intensificar la gravedad y progresión de estas comorbilidades.

La relación bidireccional entre la periodontitis y la diabetes ha sido objeto de atención significativa. La inflamación crónica asociada con la periodontitis puede agravar la resistencia a la insulina, una característica distintiva de la diabetes tipo 2. Además, la carga bacteriana persistente y la respuesta inmunitaria en la cavidad oral pueden desencadenar la liberación de citocinas proinflamatorias en la circulación sistémica, contribuyendo al estado inflamatorio característico de la diabetes (Mealey y Oates, 2006).

Un estudio longitudinal realizado por Tsai et al. (2012) reveló una asociación entre la periodontitis y un aumento en la resistencia a la insulina en adultos sin diabetes, destacando así la posible relación causal.

La enfermedad periodontal y la diabetes, dos afecciones crónicas en aumento a nivel mundial, presentan una conexión profunda. Se estima que aproximadamente el 90% de la población puede experimentar alguna forma de enfermedad bucal infecciosa, y hasta el 50% de los adultos, o

el 60% en mayores de 65 años, sufren de periodontitis. En el caso de la diabetes, se predice que 439 millones de personas la padecerán para el año 2030, es lo que se menciona en Perioexpertise (s/f).

De la misma manera, el artículo hace alusión a que la periodontitis, una enfermedad inflamatoria crónica desencadenada por una infección microbiana, provoca la destrucción del tejido conectivo y óseo, llevando a la pérdida dental. Por otro lado, la diabetes está asociada con un proceso inflamatorio previo que afecta las células B pancreáticas y provoca resistencia a la insulina. Estudios epidemiológicos han revelado que la pérdida de inserción dental se asocia con un aumento en los niveles de HbA_{1c}, indicando una relación entre enfermedad periodontal y diabetes. Aunque la evidencia sobre el control glucémico es limitada, se destaca que la mala higiene periodontal aumenta el riesgo de mal control glucémico y complicaciones diabéticas.

En este mismo sentido, considera que, los mecanismos patogénicos muestran que un sistema inmunitario desregulado es importante en la diabetes y sus complicaciones. La diabetes modifica el perfil de citoquinas en pacientes con enfermedad periodontal, y la hiperglucemia contribuye al estrés oxidativo, afectando la osteogénesis y la homeostasis del hueso alveolar. La diabetes impacta múltiples aspectos de la patogénesis de la enfermedad periodontal, desde la microbiota hasta la homeostasis ósea.

Por ello, la relación entre diabetes y microbiota periodontal no presenta evidencias concluyentes, ya que no se percibe un efecto significativo de la diabetes tipo 1 o tipo 2 y el control glucémico en la composición bacteriana de la enfermedad periodontal. La diabetes puede modificar cualitativa y cuantitativamente el perfil de citoquinas en pacientes con enfermedad periodontal.

Se observa un aumento en citoquinas proinflamatorias en aquellos con diabetes y periodontitis en comparación con los que no tienen diabetes, pero poseen niveles similares de periodontitis.

En esa descripción incluye que, en la función de las células inmunes, hay evidencia limitada de la alteración de monocitos y linfocitos-T en pacientes diabéticos con periodontitis, mientras que los estudios en animales sugieren una función defectuosa de los neutrófilos en estas condiciones. La hiperglucemia, producto de la diabetes, puede afectar la respuesta inflamatoria a través del estrés oxidativo y la formación de especies reactivas de oxígeno, lo que influye en la osteogénesis y la regulación de la actividad de los osteoblastos. Además, la hiperlipidemia común en la diabetes y obesidad contribuye al estrés oxidativo.

De esta manera, la formación de productos finales de glucosilación avanzada (AGEs) debido a la hiperglucemia contribuye al estrés celular, la inflamación y la destrucción del tejido periodontal. Los AGEs también interactúan con receptores en la superficie celular, exacerbando la inflamación y el estrés oxidativo. La hiperglucemia impacta la homeostasis del hueso alveolar al regular el ratio de los mediadores de resorción ósea RANKL/OPG en tejidos periodontales. Los AGEs contribuyen a la osteoclastogénesis y a la duración de la respuesta inflamatoria, aumentando la expresión de RANKL y reduciendo OPG, junto con la actividad de citoquinas gingivales. En resumen, la diabetes afecta múltiples aspectos de la patogénesis de la enfermedad periodontal, desde la microbiota hasta la homeostasis ósea.

La Figura 3 descrita en Relación entre enfermedad periodontal y diabetes - Perioexpertise. (s/f) muestra el impacto de la diabetes en la patogénesis de la enfermedad periodontal.

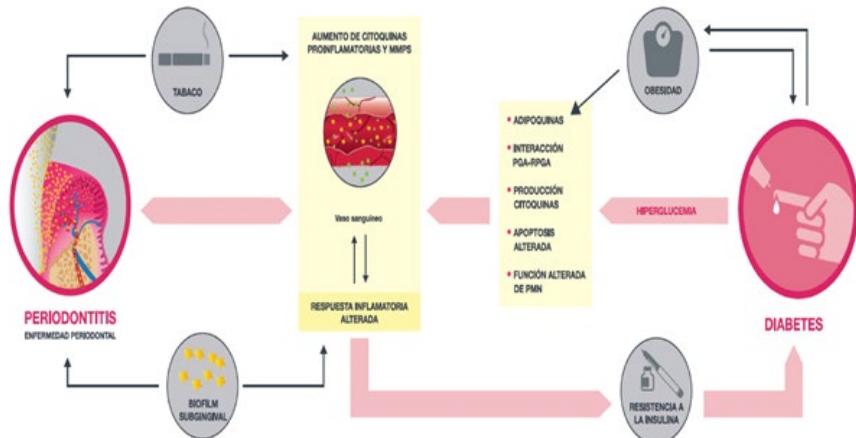


Figura 3. Relación entre enfermedad periodontal y diabetes. Fuente: https://www.perioexpertise.es/img/enfermedades/diabetes_DENTAID.png

También hacen la descripción de que se ha observado que la presencia de *P. gingivalis* puede influir tanto en el control glucémico como en la inducción de citoquinas específicas como IL-1B, IL-8, IL-12 y TNF-alfa. Sin embargo, la investigación sobre el impacto directo de la microbiota periodontal en la diabetes es limitada, y actualmente no hay suficiente evidencia para afirmar que la microbiota periodontal pueda afectar directamente el estado diabético o el control glucémico. En cuanto a los factores inflamatorios, la disregulación del conjunto periférico de citoquinas en la diabetes tipo 1 (DM1) y tipo 2 (DM2) se considera un elemento patogénico central. Los mediadores circulantes como la proteína C reactiva (CRP), el factor de necrosis tumoral alfa (TNF-alfa) e interleucina-6 (IL-6) pueden aumentar en presencia de enfermedad periodontal. Este hallazgo sugiere que la inflamación periodontal podría tener un impacto en el estado diabético.

En este mismo sentido, en la Figura 4 se presenta la interrelación entre los procesos fisiológicos y metabólicos asociados con la diabetes y sus posibles consecuencias en el desarrollo de la periodontitis.

La periodontitis también desempeña un papel en la exacerbación de la hipertensión arterial. Los mecanismos involucrados incluyen la activación del sistema renina-angiotensina-aldosterona y la disfunción endotelial. La inflamación persistente causada por la periodontitis puede afectar negativamente la función de los vasos sanguíneos, contribuyendo a la rigidez arterial y al aumento de la presión arterial (de Souza et al., 2014).

Estudios conducidos por Tonetti et al. (2007) sugieren que los pacientes con periodontitis experimentan una mayor activación del sistema renina-angiotensina, lo que puede contribuir a la hipertensión.

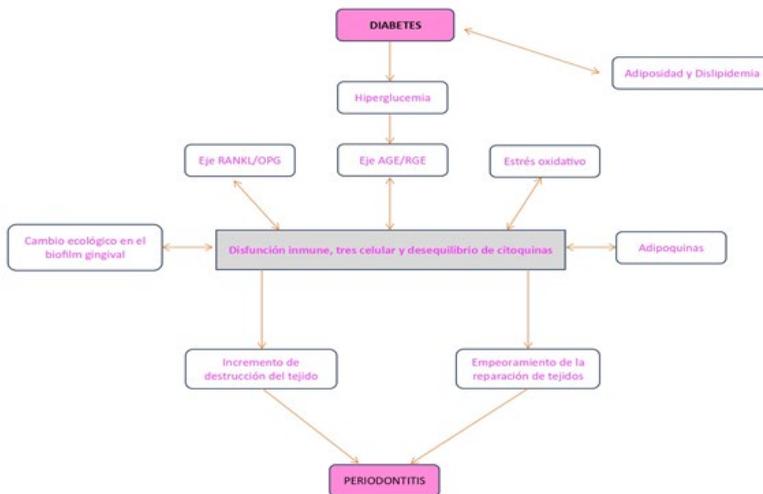


Figura 4. Interrelación entre Los procesos fisiológicos y metabólicos asociados con la diabetes. Fuente: <https://www.perioexpertise.es/img/esquema-diabetes.jpg>

Los mecanismos biológicos subyacentes a la interconexión entre las enfermedades periodontales, la diabetes y la hipertensión son diversos. La respuesta inflamatoria crónica en la periodontitis puede desencadenar respuestas sistémicas que afectan la sensibilidad a la insulina y la homeostasis glucémica en pacientes diabéticos (Loos et al., 2000). Además, la liberación de mediadores inflamatorios y bacterias periodontales en la circulación sanguínea puede activar cascadas inflamatorias que contribuyen a la disfunción endotelial y al aumento de la presión arterial en pacientes hipertensos (Desvarieux et al., 2005).

Las investigaciones de Hajishengallis (2014) han subrayado cómo la respuesta inflamatoria en la periodontitis puede influir en sistemas biológicos que afectan la homeostasis metabólica y cardiovascular.

En conjunto, estos hallazgos no solo enfatizan la necesidad de un abordaje integral en el tratamiento de estas enfermedades, sino que también resaltan la importancia de considerar la salud bucal como un componente esencial en la gestión de condiciones crónicas como la diabetes e hipertensión. La conexión biológica entre las enfermedades periodontales y estas comorbilidades sugiere que el tratamiento y la prevención efectivos de la periodontitis podrían tener beneficios significativos en la salud sistémica de los pacientes.

Salvaguardando la Salud Bucal en Pacientes con Diabetes e Hipertensión

La educación preventiva periodontal emerge como un componente en el cuidado de la salud bucal, especialmente para pacientes que enfrentan condiciones crónicas como la diabetes e hipertensión (Figura 5). Enfocarse en la prevención y el mantenimiento de la salud oral no solo mejora la calidad de vida de los pacientes, sino que también desempeña un papel necesario en la gestión integral de estas comorbilidades.

La educación preventiva periodontal no solo se centra en la gestión actual de las condiciones bucales, sino que también tiene un impacto a largo plazo en la reducción del riesgo de enfermedades periodontales recurrentes. La conciencia de la importancia de la salud bucal y la implementación de prácticas de prevención pueden prevenir la recurrencia de la periodontitis en pacientes con diabetes e hipertensión, mejorando así su bienestar general (Tonetti et al., 2007).

Estudios de Graziani et al. (2011) resaltan la relación positiva entre la adopción de medidas preventivas y la reducción de la recurrencia de la periodontitis.

Por tanto, la educación preventiva periodontal no solo se posiciona como una herramienta clave en la gestión de la salud oral, sino que también desempeña un papel destacado en la atención integral de pacientes con diabetes e hipertensión. La adopción de prácticas de prevención y la conciencia de la importancia de la salud bucal son necesarias para optimizar el bienestar general de estos individuos.



Figura 5. Paciente masculino de 65 años, con antecedentes patológicos de hipertensión con 6 años, en las fotografías intraorales y a la inspección clínica se diagnostica al paciente con gingivitis. Tomada en las Clínicas Integrales de Estomatología del Complejo Regional Sur (2023)

Enfoque Personalizado para Pacientes con Comorbilidades

La atención odontológica personalizada es importante, especialmente para pacientes adultos que presentan comorbilidades como diabetes e hipertensión. Un enfoque cuidadoso y adaptado a las necesidades individuales no solo mejora la salud bucal, sino que también contribuye significativamente a la gestión integral de estas condiciones médicas subyacentes.

La diabetes y la salud bucal están intrínsecamente conectadas, y, por lo tanto, se requiere una atención personalizada para estos pacientes. Se recomienda un monitoreo más frecuente y riguroso de la salud bucal, ya que la periodontitis puede afectar negativamente el control glucémico. La educación continua sobre la importancia de la higiene oral, junto con exámenes periódicos, es importante para prevenir y controlar las enfermedades periodontales en pacientes diabéticos (Mealey & Oates, 2006).

Según la American Dental Association (2023), los pacientes con diabetes deben recibir una evaluación dental completa al menos dos veces al año, con un énfasis especial en la detección y tratamiento temprano de la enfermedad periodontal.

La hipertensión, al igual que la diabetes, requiere una atención personalizada en el ámbito odontológico. Se aconseja la medición regular de la presión arterial antes de cualquier procedimiento dental y la colaboración estrecha con los profesionales médicos para garantizar un control adecuado de la presión arterial. Además, se enfatiza la importancia de minimizar el estrés durante las visitas dentales, ya que puede influir en la presión arterial de estos pacientes (de Souza et al., 2014).

La Asociación Americana del Corazón subraya la importancia de monitorizar la presión arterial antes y después de los tratamientos

dentales y sugiere estrategias para reducir el estrés durante las visitas al consultorio dental (Virani et al., 2023)

Un plan de tratamiento personalizado para pacientes con diabetes e hipertensión debe considerar cuidadosamente las interacciones medicamentosas y los posibles efectos secundarios de los tratamientos dentales. La comunicación efectiva entre el odontólogo y el equipo de atención médica es necesaria para coordinar el cuidado y garantizar la seguridad del paciente. Además, se debe enfocar en estrategias de prevención y manejo de enfermedades periodontales para evitar complicaciones adicionales en estos pacientes (Jepsen et al., 2018).

Según la Academia Americana de Médicos de Familia (2023), la colaboración interdisciplinaria entre médicos y odontólogos es esencial para proporcionar una atención integral y minimizar los riesgos asociados con tratamientos dentales en pacientes con condiciones médicas subyacentes.

La necesidad de un plan de tratamiento personalizado radica en la comprensión de que cada paciente es único, con su propia combinación de condiciones médicas, medicamentos y respuesta individual a los procedimientos dentales. Este enfoque garantiza que la atención sea efectiva, segura y alinee con los objetivos de manejo de las comorbilidades.

Por ello, el diseño de un enfoque personalizado para pacientes adultos con diabetes e hipertensión en el ámbito odontológico es importante para optimizar la salud general del paciente y garantizar la seguridad en los procedimientos dentales. La consideración cuidadosa de las necesidades específicas de estos pacientes, junto con la colaboración interdisciplinaria, son elementos clave para el éxito de este enfoque.

Colaboración Interdisciplinaria en la Gestión de Salud Bucal

La colaboración entre diferentes profesionales de la salud desempeña una necesidad en la gestión efectiva de la salud bucal en pacientes con comorbilidades, como la diabetes e hipertensión. Este enfoque interdisciplinario, que involucra a odontólogos, endocrinólogos y cardiólogos, no solo garantiza una atención más integral, sino que también aborda de manera eficaz las complejas interacciones entre las enfermedades sistémicas y la salud oral.

La relación entre las enfermedades periodontales, diabetes e hipertensión destaca la necesidad de una colaboración estrecha entre odontólogos, endocrinólogos y cardiólogos. La periodontitis, al tener impactos significativos en la diabetes e hipertensión, requiere un enfoque coordinado para garantizar la gestión óptima de estas condiciones. La colaboración interdisciplinaria permite una comprensión completa de la salud del paciente, considerando tanto los aspectos bucales como los sistémicos.

La Asociación Americana de Diabetes (ADA) y la Asociación Americana del Corazón (AHA) respaldan la colaboración entre profesionales de la salud para mejorar la atención de pacientes con diabetes e hipertensión (ADA, 2023; Virani et al., 2023). Esta colaboración se basa en la premisa de que la salud bucal no puede ser considerada de manera aislada, y su impacto en condiciones sistémicas debe abordarse de manera integral.

Existen ejemplos exitosos de programas de atención colaborativa que han demostrado mejoras significativas en la salud bucal de pacientes con comorbilidades. El “Modelo de Atención Colaborativa” implementado por el Centro de Salud Bucal de la Universidad de Columbia es un ejemplo destacado (Greenberg et al., 2012). Este modelo integra la atención bucal en la gestión global de la salud, involucrando a odontólogos, endocrinólogos y cardiólogos en el desarrollo de planes de tratamiento personalizados.

Otro ejemplo es el “Programa de Atención Integrada para Pacientes Diabéticos” en el Hospital General de Massachusetts (Kaye et al., 2016). Este programa reúne a un equipo multidisciplinario que incluye odontólogos, endocrinólogos y cardiólogos para proporcionar atención coordinada a pacientes con diabetes, abordando tanto las necesidades bucales como las sistémicas. Los resultados han demostrado una mejora considerable en el control glucémico y la salud bucal de los participantes.

La implementación de estos programas se basa en la premisa de que la colaboración interdisciplinaria maximiza los resultados al abordar de manera integral las necesidades de los pacientes. Se destaca la importancia de establecer protocolos de comunicación efectiva entre los profesionales de la salud involucrados, asegurando la transmisión de información relevante para una atención coordinada.

Los programas colaborativos exitosos no solo se centran en el tratamiento de las enfermedades existentes, sino que también incorporan medidas preventivas. La educación del paciente sobre la importancia de la salud bucal en el contexto de sus condiciones sistémicas es fundamental para el éxito a largo plazo.

De esta manera, la colaboración entre odontólogos, endocrinólogos y cardiólogos se requiere para un enfoque integral de la salud en pacientes con comorbilidades como la diabetes e hipertensión. Esta colaboración no

solo mejora la coordinación del tratamiento, sino que también permite una comprensión más completa de las interacciones entre la salud bucal y las condiciones sistémicas. Programas de atención colaborativa exitosos demuestran que este enfoque no solo es factible, sino también beneficioso para la salud global de los pacientes. La integración de medidas preventivas y la educación del paciente son componentes clave para abordar de manera efectiva las complejidades de las comorbilidades y mejorar la calidad de vida de los pacientes.

Estrategias Prácticas y Consejos para la Salud Bucal

La salud bucal desempeña un papel importante en el bienestar general, especialmente en pacientes con comorbilidades como diabetes e hipertensión. La adopción de hábitos saludables en la rutina diaria se vuelve necesaria para prevenir complicaciones y mejorar la calidad de vida (Figura 6). Para ello se pueden observar las siguientes estrategias prácticas respaldadas por la evidencia para fomentar una salud bucal óptima en este grupo de pacientes.

1. HIGIENE ORAL RIGUROSA:

Establecer una rutina de higiene oral rigurosa constituye el fundamento para mantener una boca saludable. La Asociación Dental Americana (ADA) recomienda cepillarse los dientes al menos dos veces al día con un cepillo de cerdas suaves y pasta dental fluorada (ADA, 2023). La utilización diaria del hilo dental es necesaria para eliminar la placa entre los dientes y a lo largo de la línea de las encías, reduciendo así el riesgo de enfermedades periodontales (Sanz et al., 2020). Complementar la rutina con enjuagues bucales con fluoruro refuerza la defensa contra las caries y la inflamación.

2. ALIMENTACIÓN SALUDABLE Y CONTROL DE GLUCOSA:

La adopción de una dieta equilibrada es fundamental, especialmente para aquellos con diabetes. Limitar el consumo de azúcares y carbohidratos refinados contribuye a prevenir caries y controlar los niveles de glucosa (Sanz et al., 2020). La monitorización regular de la glucosa es necesaria para mantener un control glucémico adecuado, reduciendo así el riesgo de complicaciones periodontales (Taylor et al., 2013).

3. EXÁMENES DENTALES REGULARES:

Las visitas regulares al odontólogo desempeñan un papel importante en la detección temprana de problemas periodontales. La ADA recomienda exámenes dentales cada seis meses, aunque la frecuencia puede personalizarse para pacientes con diabetes e hipertensión (ADA, 2023). La detección temprana de signos de inflamación gingival o sangrado permite intervenciones oportunas, evitando complicaciones a largo plazo.

4. CONTROL DE LA PRESIÓN ARTERIAL:

El control adecuado de la presión arterial es necesario para prevenir la progresión de enfermedades periodontales en pacientes hipertensos (de Souza et al., 2014). Mantener la presión arterial dentro de los rangos recomendados beneficia tanto a la salud sistémica como a la bucal, contribuyendo a una gestión integral de la salud.

5. ABORDAR EL ESTRÉS:

La gestión del estrés es clave para mantener la salud bucal y sistémica. Incorporar prácticas como la meditación, la respiración profunda o la actividad física regular ayuda a controlar la respuesta inflamatoria, beneficiando la salud periodontal (Sanz et al., 2020). Reducir el estrés contribuye a un bienestar general mejorado.

6. EDUCACIÓN CONTINUA:

La educación continua desempeña un papel fundamental en empoderar a los pacientes. Proporcionar información sobre la relación entre las comorbilidades y la salud oral motiva a los pacientes a adoptar y mantener hábitos saludables. La comprensión de estas interacciones fortalece la conexión entre el autocuidado bucal y la gestión efectiva de las condiciones médicas.

La implementación de estas estrategias prácticas en la rutina diaria no solo contribuye a mantener una buena salud bucal, sino que también juega un papel integral en la gestión de condiciones médicas concurrentes. La combinación de higiene oral rigurosa, alimentación saludable, exámenes dentales regulares y el manejo de factores de riesgo como la presión arterial y el estrés, constituye un enfoque holístico para prevenir complicaciones y mejorar la calidad de vida de los pacientes. La educación continua refuerza la importancia de estos hábitos y promueve la autonomía en el cuidado activo de la salud bucal.

CONSEJO DE SALUD BUCAL

HIGIENE ORAL RIGUROSA

- Cepillado dental después de cada comida.
- Uso de hilo dental diario para eliminar placa entre los dientes.
- Enjuague bucal antimicrobiano para prevenir infecciones.

ALIMENTACIÓN SALUDABLE Y CONTROL DE GLUCOSA

- Dieta equilibrada rica en frutas, verduras y calcio.
- Monitoreo regular de los niveles de glucosa.
- Evitar alimentos azucarados y controlar la ingesta de carbohidratos.

EXÁMENES DENTALES REGULARES

- Visitas al dentista cada 6 meses.
- Evaluación de la salud periodontal y detección.

CONTROL DE LA PRESIÓN ARTERIAL:

- Monitoreo regular de la presión arterial.
- Colaboración entre el dentista y el médico para abordar problemas sistémicos.

EDUCACIÓN CONTINUA:

- Concientización sobre la relación entre la salud bucal y condiciones sistémicas.
- Sesiones educativas periódicas para pacientes sobre hábitos saludables.

¡CUIDA TU SONRISA Y TU BIENESTAR GENERAL!

Figura 11. Sargazo; a) Seco, b) carbonizado a 500°C y molido, c) carbonizado a 800°C y molido. Elaboración propia.

CONCLUSIÓN

En el análisis de la importancia de la educación preventiva periodontal en adultos que enfrentan las complejidades de diabetes e hipertensión, se evidencia un enfoque vital para la gestión integral de la salud. La periodontitis, como entidad inflamatoria crónica que afecta los tejidos de soporte dental, no solo incide en la salud bucal, sino que establece conexiones fundamentales con la diabetes e hipertensión, trascendiendo así los límites de la cavidad oral.

La relación estrecha entre la periodontitis y las comorbilidades mencionadas subraya la necesidad de una intervención educativa preventiva. Los riesgos inherentes a la inflamación crónica asociada con la periodontitis se magnifican en presencia de condiciones como la diabetes e hipertensión. La conexión bidireccional entre estas enfermedades resalta la importancia de abordar la salud bucal como un componente integral del cuidado médico.

Las estrategias preventivas, enfocadas en la implementación de prácticas de higiene oral rigurosas, la promoción de una alimentación

saludable y la concientización sobre la importancia de exámenes dentales regulares, se revelan como pilares fundamentales en la educación preventiva periodontal. La capacidad de empoderar a los pacientes a través de la información y la comprensión de cómo su salud bucal impacta directamente en las condiciones sistémicas, como la diabetes e hipertensión, destaca la necesidad de un enfoque educativo personalizado y accesible.

Por tanto, reafirma que la educación preventiva periodontal no solo busca prevenir la progresión de la enfermedad periodontal, sino que también se presenta como una herramienta en la gestión global de la salud de los pacientes con diabetes e hipertensión. La colaboración entre profesionales de la salud y la implementación de estrategias educativas adaptadas a las necesidades específicas de estos pacientes son esenciales para garantizar un abordaje holístico y mejorar la calidad de vida. La educación preventiva periodontal emerge, en última instancia, como un enfoque vital para preservar la salud bucal y contribuir al bienestar general de adultos con diabetes e hipertensión.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

AGRADECIMIENTOS

A los docentes y asesores del doctorado en Investigación y Educación para la Salud por el apoyo brindado durante la formación académica.

REFERENCIAS

- Academia Americana de Médicos de Familia. (2023, marzo 7). Aafp.org. https://www.aafp.org/dam/AAFP/documents/about_us/special_constituencies/2019-2020/SP-BP-CollaborativeDentist-050119.pdf
- American Dental Association (ADA). 2023. Oral Health Topics. Ada.org. Recuperado el 20 de diciembre de 2023, de <https://www.ada.org/en/member-center/oral-health-topics/brushing-your-teeth>
- American diabetes association releases 2023 standards of care in diabetes to guide prevention, diagnosis, and treatment for people living with diabetes. (2022). Diabetes.org. Recuperado el 20 de diciembre de 2023, de <https://www2.diabetes.org/newsroom/press-releases/2022/american-diabetes-association-2023-standards-care-diabetes-guide-for-prevention-diagnosis-treatment-people-living-with-diabetes>
- Chapple, I. L. C., Van der Weijden, F., Doerfer, C., Herrera, D., Shapira, L., Polak, D., Madianos, P., Louropoulou, A., Machtei, E., Donos, N., Greenwell, H., Van Winkelhoff, A. J., Eren Kuru, B., Arweiler, N., Teughels, W., Aimetti, M., Molina, A., Montero, E., & Graziani, F. (2015). Primary prevention of periodontitis: managing gingivitis. *Journal of Clinical Periodontology*, 42(S16). <https://doi.org/10.1111/jcpe.12366>
- de Souza, C. M., Braosi, A. P. R., Luczyszyn, S. M., Olandoski, M., Kotanko, P., Craig, R. G., Trevilatto, P. C., & Pecoits-Filho, R. (2014). Association among oral health parameters, periodontitis, and its treatment and mortality in patients undergoing hemodialysis. *Journal of Periodontology*, 85(6). <https://doi.org/10.1902/jop.2013.130427>
- Desvarieux, M., Demmer, R. T., Jacobs, D. R., Jr, R undek, T., Boden-Albala, B., Sacco, R. L., & Papapanou, P. N. (2010). Periodontal bacteria and hypertension: the oral infections and vascular disease epidemiology study (INVEST). *Journal of Hypertension*, 28(7), 1413–1421. <https://doi.org/10.1097/hjh.0b013e328338cd36>
- Desvarieux, M., Demmer, R. T., Rundek, T., Boden-Albala, B., Jacobs, D. R., Jr, Sacco, R. L., & Papapanou, P. N. (2005). Periodontal Microbiota and carotid intima-media thickness: The Oral Infections and Vascular Disease Epidemiology Study (INVEST). *Circulation*, 111(5), 576–582. <https://doi.org/10.1161/01.cir.0000154582.37101.15>
- Genco, R. J., & Borgnakke, W. S. (2013). Risk factors for periodontal disease. *Periodontology* 2000, 62(1), 59–94. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0757.2012.00457.x>
- Greenberg, B. L., Kantor, M. L., Jiang, S. S., & Glick, M. (2012). Patients' attitudes toward screening for medical conditions in a dental setting. *Journal of Public Health Dentistry*, 72(1), 28–35. <https://doi.org/10.1111/j.1752-7325.2011.00280.x>
- Graziani, F., Karapetsa, D., Alonso, B., & Herrera, D. (2017). Nonsurgical and surgical treatment of periodontitis: how many options for one disease? *Periodontology* 2000, 75(1), 152–188. <https://doi.org/10.1111/prd.12201>
- Hajishengallis, G. (2014). Immunomicrobial pathogenesis of periodontitis: keystone, pathobionts, and host response. *Trends in Immunology*, 35(1), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.it.2013.09.001>
- Jepsen, S., Caton, J. G., Albandar, J. M., Bissada, N. F., Bouchard, P., Cortellini, P., Demirel, K., de Sanctis, M., Ercoli, C., Fan, J., Geurs, N. C., Hughes, F. J., Jin, L., Kantarci, A., Lalla, E., Madianos, P. N., Matthews, D., McGuire, M. K., Mills, M. P., ... Yamazaki, K. (2018). Periodontal manifestations of systemic diseases and developmental and acquired conditions: Consensus report of workgroup 3 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri Implant Diseases and Conditions. *Journal of Periodontology*, 89(S1). <https://doi.org/10.1002/jper.17-0733>
- Kaye, E. K., Chen, N., Cabral, H. J., Vokonas, P., & García, R. I. (2016). Metabolic syndrome and periodontal disease progression in men. *Journal of Dental Research*, 95(7), 822–828. <https://doi.org/10.1177/0022034516641053>
- Loos, B. G., Craandijk, J., Hoek, F. J., Dillen, P. M. E. W., & Van Der Velden, U. (2000). Elevation of systemic markers related to cardiovascular diseases in the peripheral blood of periodontitis patients. *Journal of Periodontology*, 71(10), 1528–1534. <https://doi.org/10.1902/jop.2000.71.10.1528>

- Mealey, B. L., & Oates, T. W. (2006). Diabetes mellitus and periodontal diseases. *Journal of Periodontology*, 77(8), 1289–1303. <https://doi.org/10.1902/jop.2006.050459>
- Nelson, R. G., Shlossman, M., Budding, L. M., Pettitt, D. J., Saad, M. F., Genco, R. J., & Knowler, W. C. (1990). Periodontal disease and NIDDM in Pima Indians. *Diabetes Care*, 13(8), 836–840. <https://doi.org/10.2337/diacare.13.8.836>
- Relación entre enfermedad periodontal y diabetes - Perioexpertise. (s/f). Perioexpertise. es. Recuperado el 20 de diciembre de 2023, de <https://www.perioexpertise.es/enfermedades-encias/implicaciones-sistemicas-diabetes>
- Sanz, M., Beighton, D., Curtis, M. A., Cury, J. A., Dige, I., Dommisch, H., Ellwood, R., Giacaman, R. A., Herrera, D., Herzberg, M. C., Könönen, E., Marsh, P. D., Meyle, J., Mira, A., Molina, A., Mombelli, A., Quirynen, M., Reynolds, E. C., Shapira, L., & Zaura, E. (2017). Role of microbial biofilms in the maintenance of oral health and in the development of dental caries and periodontal diseases. Consensus report of group 1 of the Joint EFP/ ORCA workshop on the boundaries between caries and periodontal disease. *Journal of Clinical Periodontology*, 44(S18). <https://doi.org/10.1111/jcpe.12682>
- Simpson, T. C., Needleman, I., Wild, S. H., Moles, D. R., & Mills, E. J. (2010). Treatment of periodontal disease for glycaemic control in people with diabetes. En T. C. Simpson (Ed.), *Cochrane Database of Systematic Reviews*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Taylor, G. W., Burt, B. A., Becker, M. P., Genco, R. J., Shlossman, M., Knowler, W. C., & Pettitt, D. J. (1996). Severe periodontitis and risk for poor glycemic control in patients with non insulin dependent diabetes mellitus. *Journal of Periodontology*, 67(10S), 1085–1093. <https://doi.org/10.1902/jop.1996.67.10s.1085>
- Tonetti, M. S., D'Auto, F., Nibali, L., Donald, A., Storry, C., Parkar, M., Suvan, J., Hingorani, A. D., Vallance, P., & Deanfield, J. (2007). Treatment of periodontitis and endothelial function. *The New England Journal of Medicine*, 356(9), 911–920. <https://doi.org/10.1056/nejmoa063186>
- Tsai, C., Hayes, C., & Taylor, G. W. (2002). Glycemic control of type 2 diabetes and severe periodontal disease in the US adult population. *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, 30(3), 182–192. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0528.2002.300304.x>
- Virani, S. S., Newby, L. K., Arnold, S. V., Bittner, V., Brewer, L. C., Demeter, S. H., Dixon, D. L., Fearon, W. F., Hess, B., Johnson, H. M., Kazi, D. S., Kolte, D., Kumbhani, D. J., LoFaso, J., Mahtta, D., Mark, D. B., Minissian, M., Navar, A. M., Patel, A. R., ... Williams, M. S. (2023). 2023 AHA/ACC/ACCP/ASPC/NLA/PCNA guideline for the management of Patients With Chronic Coronary Disease: A report of the American heart association/American college of cardiology joint committee on clinical practice guidelines. *Circulation*, 148(9). <https://doi.org/10.1161/cir.0000000000001168>

ENERGÍA EÓLICA IMPULSADA POR TRÁFICO VEHICULAR, UNA OPCIÓN PARA EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR ALUMBRADO PÚBLICO

WIND ENERGY DRIVEN BY VEHICULAR TRAFFIC,
AN OPTION FOR THE CONSUMPTION OF
ELECTRICAL ENERGY BY PUBLIC LIGHTING

Edgar Hernández Palafox
*José Joaquín Alvarado Pulido

<https://orcid.org/0000-0002-7566-3955>
<https://orcid.org/0000-0001-7186-4429>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

Posgrado en Ciencias en Energías Renovables. ECOCAMPUS Valsequillo Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
Independencia O 2 SUR 50, 72960 San Pedro Zacachimalpa, Puebla, Mx.

edgarhdezp33@gmail.com
joaquin.alvarado@correo.buap.mx

RESUMEN

La tecnología de los sistemas de alumbrado público, que funcionan con energía eólica e inclusive con energía solar al mismo tiempo, se han creado desde hace poco más de cinco años. El diseño de los sistemas eólicos depende de su potencia, el número de paletas, por la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, su material de construcción y de la energía cinética del viento. Actualmente, la eficiencia energética que han emprendido algunos países, requiere de cambios en los equipos y sistemas utilizados para el alumbrado público. Los sistemas eólicos impulsados por el viento que genera el tráfico vehicular, se han vuelto una opción para generar energía eléctrica y abastecer el alumbrado público. Esta investigación hace referencia a la importancia del alumbrado público, sus problemáticas y las alternativas de solución basadas en los sistemas eólicos impulsados por el tráfico vehicular.

Palabras clave: Sistemas de energía eólico, turbinas tipo savonius, turbinas tipo darrieus.

ABSTRACT

The technology of public lighting systems that works with wind energy and even solar energy at the same time has been created for just over five years. The design of wind systems depends on its power, the number of blades, the arrangement of their axis of rotation, the type of generator, their construction material and the kinetic energy of the wind. Currently, the energy efficiency that some countries have undertaken requires changes in the equipment and systems used for public lighting. Wind systems driven by the wind generated by vehicular traffic have become an option to generate electrical energy and supply public lighting. This research refers to the importance of public lighting, its problems and alternative solutions based on wind systems driven by vehicular traffic.

Keywords: Eolic energy systems, savonius type turbines, darrieus type turbines

ANTECEDENTES

La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía (CONUEE, 2023) describe en la plataforma del gobierno mexicano que “el alumbrado público es un servicio que consiste en proveer la iluminación mínima necesaria en los espacios públicos y vialidades, considerando la garantía de seguridad de peatones y vehículos”. Para Gámez (2018), el alumbrado público “es un servicio que brinda el gobierno, el cual consiste en ofertar la iluminación en las calles y parques” (p. 31). Además, considera que “la falta de alumbrado público repercute en la seguridad de los habitantes, debido a las deficiencias técnicas y sociales”.

Así mismo Ramírez et al. (2018), considera que “las malas condiciones de espacios públicos en fraccionamientos cerrados en México, han

incidido en el aumento de la delincuencia, así como de la percepción de inseguridad” debido a la “falta de mantenimiento y deterioro continuo de sus espacios públicos” (p. 1). Hace notar el autor, que este estudio se realizó en el Fraccionamiento Los Héroes, ubicado en el sureste de la ciudad de Puebla. Por su parte, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022), a través de su Encuesta Nacional de Seguridad Pública Urbana (ENSU) describe que el porcentaje de la población mayor a 18 años de edad, identificó durante diciembre de 2022 que el alumbrado público es insuficiente y lo considera como una problemática en su ciudad. En la figura 1, se muestra el porcentaje de la población por estado del mapa territorial mexicano que reporta tener problemas de alumbrado público.

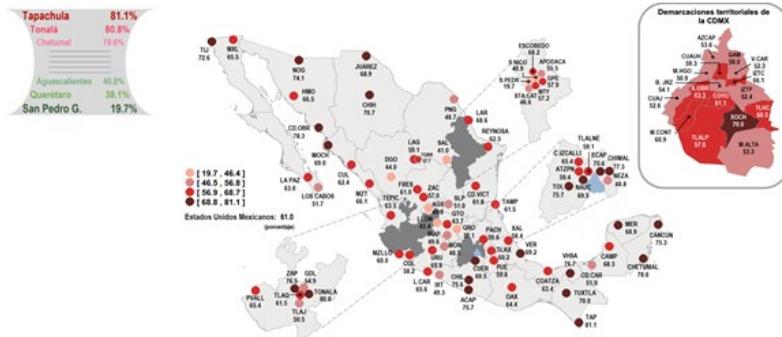


Figura 1. Problemáticas de alumbrado público. (INEGI, 2022, https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ensu/doc/ensu2022_diciembre_presentacion_ejecutiva.pdf)

Por otra parte, Díaz (2018) desarrolló un sistema de iluminación solar para el ahorro de energía eléctrica en alumbrado público en México, pues considera que la mayor parte de la energía proviene de los hidrocarburos, la obtención de los cuales daña el medio ambiente. Para Flores (2019), “el alumbrado público es uno de los servicios con más insistencia de demanda por los habitantes de las localidades como resultado del crecimiento de la población y del desarrollo urbano” (p. 1).

De esta manera la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía (CONUEE, 2019) describe en su estudio denominado “Alumbrado público, eficiencia energética y la ciudad inteligente: hacia el proyecto nacional 2.0” que el “alumbrado público es una necesidad social insatisfecha cuya falta o funcionamiento inadecuado aporta a la percepción de inseguridad” (p. 1), y afirma que “el servicio de alumbrado público es prestado en México por las 2,458 autoridades municipales y estima que existen 10 millones de sistemas de alumbrado público instalados en los municipios” (p. 2).

Para Pérez (2019), “muchas instalaciones de alumbrado público son anticuadas y altamente ineficientes, generando un alto consumo

de energía eléctrica con baja eficiencia energética” (p. 1). Aunado al autor anterior, la CONUEE (2019) considera que “el alumbrado público consume el equivalente al 2.25% del consumo de energía eléctrica nacional y que de acuerdo con cifras de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en 2017 fue de 4,496 GWh” (p. 2). “Esto conduce a una mayor necesidad de ahorro de energía, de mantenimiento, y de eficiencia energética, lo que se refleja en costos muy altos que tienen que pagar los ayuntamientos” (Pérez, 2019, p. 1).

La Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2023) describe en su página web que “el costo por alumbrado público oscila en un rango de 1.76 a 5.38 pesos por kilowatt hora (kWh)”. Con base a estos costos, la CONUEE (2019) establece que “se ha generado una erogación 15,000 millones de pesos que los gobiernos municipales deben pagar a la Comisión Federal de Electricidad por alumbrado público” (p. 4).

En contraste Espinosa (2019), realiza el diseño y construcción de un prototipo a escala de una turbina eólica aplicada a una luminaria. Comenta que el prototipo generó un potencial eléctrico de 0.663 Watts a un voltaje de 2.23 Volts. Así mismo, autores como Maldonado et al. (2021), diseñaron un sistema de generación

de electricidad a partir de energía eólica en un parque del barrio las Flores de la ciudad de Barranquilla Colombia, en el cual no es impulsado por tráfico vehicular.

Aunado a lo antes descrito, Cardoso (2022) comenta que el derecho de alumbrado público es un problema para los municipios de México, ya que en los recibos de luz aparecen las siglas DAP (derecho de alumbrado público), siendo el monto que se tiene que cubrir por el servicio de energía eléctrica.

Por su parte Rivera (2020), hace notar que es necesario realizar propuestas para la implementación de instalaciones de media tensión para calles de la ciudad de Puebla, donde el Gobierno del Estado de Puebla en conjunto con la Secretaría de Infraestructura Movilidad y Transporte se han dado a la tarea de transformar Puebla, considerando carreteras, alumbrado público, escuelas, hospitales, entre otros.

Quiñonez et al. (2022) expresa que el camino hacia la eficiencia energética que han emprendido muchos países implica una serie de cambios en los equipos y sistemas utilizados para el alumbrado público, considerando que la tecnología LED (Diodo Emisor de Luz, por sus siglas en inglés) es cada vez más usada por sus beneficios de mayor eficiencia y menor pérdida.

Sánchez (2022) diseña una turbina de eje vertical para el suministro de energía en luminarias de alumbrado público en zonas rurales. Este tipo de diseño solo se realizó por medio del análisis teórico y analítico, no se generó el prototipo. De la misma forma Guamushig (2022), presenta una investigación sobre el diseño de una turbina de vórtice de

eje vertical en la cual se describe el proceso del diseño por medio de simulación.

Appadurai (2022) ha generado un aerogenerador a pequeña escala basados en nanocompuestos de epoxi/carburo de silicio (sic) para aplicaciones urbanas. El modelo de este sistema fue desarrollado por medio del software de diseño CATIA y simulado por medio del Análisis de Elemento Finito.

En su caso, Rivera (2023) presenta una investigación que refiere al costo beneficio de un aerogenerador de eje vertical de pequeña escala para uso residencial. El estudio determinó la rentabilidad del sistema evaluando consumos mensuales de 250, 500 y 750 kWh.

China ha optado por el uso de un sistema de energías verdes basadas en materiales de carbono y ha desarrollado energía solar y eólica con capacidad de 2,495 y 2,674 GW, respectivamente (Liu et al., 2022).

Badakhshan, Afganistán, está invirtiendo en tecnología de producción de hidrógeno usando energía eólica (Almutairi et al., 2021).

Como ha sido posible apreciar, la carencia de alumbrado público económico y eficiente constituye un notable problema social, impulsando diversos desarrollos tecnológicos. Muchos de estos proyectos conllevan elevados costos de inversión o mantenimiento. En este contexto, la utilización de aerogeneradores activados por el tráfico vehicular ha ganado prominencia como una opción altamente destacada. En las próximas secciones, se examinarán en detalle los distintos sistemas eólicos asociados a esta innovadora propuesta.

Sistemas Eólicos

La energía eólica se transforma en energía eléctrica mediante un aerogenerador. La empresa World Energy Trade (2020), describe que un aerogenerador, es un generador eléctrico que funciona convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica a través de una hélice que, por medio de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, convirtiendo la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Para Maldonado (2021), los aerogeneradores se clasifican por su potencia, por el número de paletas, por la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, entre otros. Por mencionar alguno de ellos, se puede citar a los de eje vertical como son el Savonius, el Darrieus, el Giromill; los de eje horizontal; los multipalas o aeroturbinas lentas; rotor tipo hélice o aeroturbinas rápidas. En la figura 2, se muestra el diseño de una turbina tipo vertical y tipo horizontal.

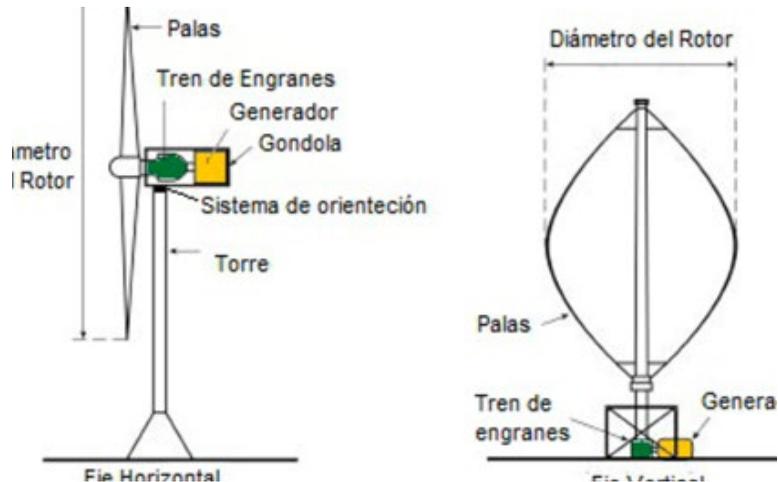


Figura 2. Aerogeneradores de eje vertical y de eje horizontal (Soriano, 2015, <https://www.ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/LuisSA.pdf>)

Turbina tipo Darrieus

Para Martín y Jeremie citados por Saavedra (2019), las hélices de la turbina tipo Darrieus, están diseñadas de manera que el viento viaje una distancia más larga en un lado convexo que el otro cóncavo. El diseño de esta turbina, hace que la velocidad del viento sea relativamente más alta en el lado convexo. Esto hace que, la diferencia de velocidad sobre la hélice obligue a girar mientras el viento atraviesa la turbina.

Por su parte, Mendoza y Rodríguez (2017) describen que el aerogenerador tipo Darrieus fue inventado por el ingeniero francés George Jean Mary Darrieus en 1931 en Estados Unidos. Las patentes de este investigador incluyen el rotor con paletas curvas y el de paletas rectas. Así mismo, el mismo autor afirma que por las características y condiciones de trabajo lo convierten en un rotor óptimo para la generación de energía a pequeña escala. Ver figura 3.

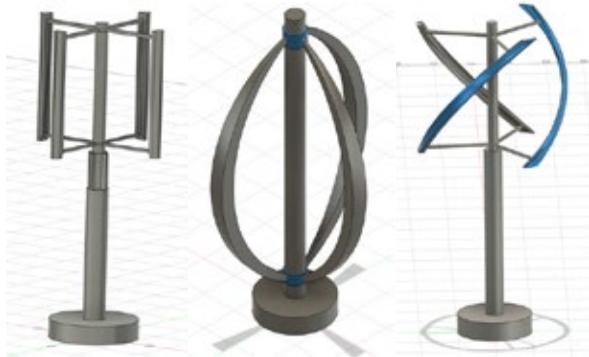


Figura 3. Turbina eólica tipo Darrieus, a) rotor con paletas curvas, b) rotor con paletas rectas, rotor con paletas helicoidales (Hernández, 2023).

Turbina tipo Savonius

Este tipo de turbina convierte la energía cinética de las corrientes del viento, en un par que actúa en los álabes del rotor. “El torque generado se transmite a través del eje giratorio para poner en actividad un generador eléctrico” (Aparicio y Meza, 2022, p. 41). Por su parte, Pedrozo (2021) describe que “el tipo de rotor más usual es el de dos o tres paletas, considera así mismo, que es una turbina de arrastre, ya que no puede rotar a mayor velocidad que la del viento” (p. 6). Hace notar el mismo autor que, este tipo de sistema eólico fue desarrollado por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en el año de 1922. En la figura 4, se muestra el esquema de la turbina tipo Savonius.

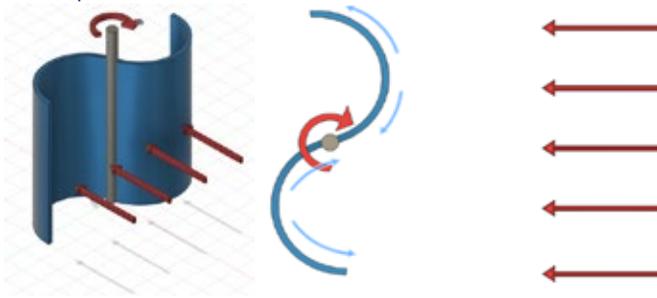


Figura 4. Turbina eólica tipo Savonius (Ali, 2013, <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=3714f618f873b6dace1f547dec907f9773d884f1>)

Donde:

V es la velocidad del viento [m/s]; F_1 es la fuerza convexa [N]; F_2 es la fuerza cóncava [N]; w es la velocidad angular [rpm]; v es la velocidad del rotor [rpm].

De esta manera y haciendo referencia a lo antes descrito, los sistemas eólicos impulsados por tráfico vehicular, emplean por lo general turbinas de eje vertical. La empresa Illuminet (2023), puntualiza en su página web que el funcionamiento de estos sistemas eólicos es sencillo, es decir, “luminarias que aprovechan la fuerza del viento para transformarla mediante turbinas, en energía que se utilizará para que una lámpara se ilumine”. Lo interesante de estos sistemas eólicos es que son accionados por la fuerza del aire que generan los vehículos que pasen a cierta distancia de una luminaria sobre una avenida transitada. En la figura 5 se muestra el principio del funcionamiento de un sistema eólico impulsado por el aire proveniente de los autos que circulan cerca de la luminaria.



Figura 5. Sistemas eólicos impulsados por el viento generado por vehículos (Illuminet, 2023, <https://illuminet.com/energia-eolica-de-autos-para-iluminar-carreteras/>).

Dentro de los prototipos ya existentes se cuenta con la turbina Muneer que mide 8 pies de alto y está hecha de fibra de carbono reciclable. Su batería recargada puede almacenar un kilovatio de electricidad, energía suficiente para hacer funcionar dos lámparas y un ventilador durante unas 40 horas (Altenergymag, 2023)

Conclusión

La energía eólica como la energía solar se han combinado desde hace algunos años para el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a los sistemas de alumbrado público. Uno de los principales beneficios de este tipo de sistemas es que permiten reducir el costo respecto al sistema convencional de alumbrado público. Así mismo, se considera que este tipo de sistemas eólicos están diseñados para ser utilizados en parques, instituciones educativas, vías interurbanas, autopistas, zonas industriales y otros entornos públicos.

La manufactura de un sistema eólico impulsado por tráfico vehicular beneficiaría a los habitantes del estado de Puebla, ya que se podría reducir en gran medida el pago del DAP (Derecho de Alumbrado Público) e inclusive eliminarlo. Recordando que este impuesto por alumbrado público se implementó el año pasado y el monto que debe pagar la sociedad va a depender del consumo de energía que se realice en cada hogar o negocio. Se estima que, la recaudación de este impuesto será aproximadamente de 140 millones de pesos durante el primer año de aplicación

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros. Así también, los autores del Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores y Posgrado en Ciencias de Energías Renovables, Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, así como al Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores, al Posgrado en Ciencias de Energías Renovables y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por el interés en la difusión de la ciencia y la motivación que brindan para continuar desarrollando investigación.

REFERENCIAS

Ali, M. H. (2013). Experimental comparison study for Savonius wind turbine of two & three blades at low wind speed. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 3(5), 2978-2986.

<https://www.mendeley.com/search/?page=1&query=Experimental%20comparison%20study%20for%20Savonius%20wind%20turbine%20of%20two%20%26%20three%20blades%20at%20low%20wind%20speed&sortBy=relevance>

<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=3714f618f873b6dacef1547dec907f9773d884f1>

Almutairi, K., Hosseini Dehshiri, S. S., Hosseini Dehshiri, S. J., Mostafaeipour, A., Jahangiri, M., & Techato, K. (2021, July 15). Technical, economic, carbon footprint assessment, and prioritizing stations for hydrogen production using wind energy: A case study. *Energy Strategy Reviews*, 36(0), 100684. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100684>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344922000039?via%3Dihub>

Altenergymag. (2023). Traffic Powered Wind Turbines. Recuperado de <https://www.altenergymag.com/article/2019/05/top-article-from-2019-traffic-powered-wind-turbines/31030>

Aparicio Romero, J. A., Meza Allpas, N. A., & Núñez Flores, P. R. (2022). Diseño de un vawt savonius para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda-Huancayo. Recuperado de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11988/2/IV_FIN_111_TE_Aparicio_Meza_Núñez_2022.pdf

Appadurai, M., & Raj, E. F. I. (2022). Epoxy/silicon carbide (sic) nanocomposites based small scale wind turbines for urban applications. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 13(1), 191-206. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00417-w>

<https://www.mendeley.com/search/?page=1&query=Epoxy%2Fsilicon%20carbide%20%28sic%29%20nanocomposites%20based%20small%20scale%20wind%20turbines%20for%20urban%20applications&sortBy=relevance>

Cardoso, R. R., Delgado, G. S., & Rosas, A. G. (2022). DAP (derecho de alumbrado público) un problema para los municipios en México. *Prospectiva Jurídica*, 13(25), 91-104. <https://prospectivajuridica.uaemex.mx/article/view/18930>

Comisión Federal de Electricidad. (2023). Tarifas. Recuperado de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/AlumbradoPublicoMT.aspx>

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2023). Estados y municipios – Alumbrado público. Recuperado de <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/estados-y-municipios-alumbrado-publico>

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2019). Alumbrado público, eficiencia energética y la ciudad inteligente: Hacia el proyecto nacional 2.0. Cuaderno de la CONUEE Número 4/Nuevo Ciclo, mayo 2019. Recuperado de https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno4nvoiclocorreJLTODB_1.pdf

Díaz, J. F. M. (2018). Desarrollo de un sistema de iluminación solar para el ahorro de energía eléctrica en el alumbrado publico de mexico (Doctoral dissertation, Universitat Rovira i Virgili). <https://www.tdx.cat/handle/10803/667293>

- Espinosa Suárez, M. A. (2019). Diseño y construcción de un prototipo a escala de turbina eólica aplicada a una luminaria. <http://hdl.handle.net/11191/6384>
- Flores Valenzuela, E. S. (2019). Mejoramiento de los niveles de iluminación en el alumbrado público de la avenida Pastor Sevilla con la avenida Ricardo Palma–distrito de SJM. Recuperado de <http://repositorio.untels.edu.pe/jsui/handle/123456789/446>
- Gámez, M. R., & Cedeño, H. A. M. (2018). Falta de alumbrado público y su repercusión en la seguridad de los habitantes del sector San Felipe del cantón Portoviejo. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT* ISSN: 2588-0721, 3(1), 30-34. <https://www.mendeley.com/search/?page=1&query=Falta%20de%20alumbrado%20p%C3%ABlico%20y%20su%20repercusi%C3%B3n%20en%20la%20seguridad%20de%20los%20habitantes%20del%20sector%20San%20Felipe%20del%20cant%C3%B3n%20Portoviejo&sortBy=relevance>
- Guamushig Simaluisa, C. J., & Iza Noroña, D. P. (2022). Diseño de una turbina de vórtice de eje vertical (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)). <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/9662/1/PI-002223.pdf>
- Iluminet. (2023, 12 abril). <https://iluminet.com/energia-eolica-de-autos-para-iluminar-carreteras/>
- Hernández. P. E., (2023), Diseño de turbinas eólicas, Autoría propia, realizada en Fusion 360, Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022), Encuesta Nacional de seguridad Pública Urbana – ENSU Cuarto Trimestre 2022. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ensu/doc/ensu2022_diciembre_presentacion_ejecutiva.pdf
- Liu, L., Wang, Y., Wang, Z., Li, S., Li, J., He, G., Li, Y., Liu, Y., Piao, S., Gao, Z., Chang, R., Tang, W., Jiang, K., Wang, S., Wang, J., Zhao, L., & Chao, Q. (2022, January 10). Potential contributions of wind and solar power to China's carbon neutrality. *Resources, Conservation and Recycling*, 180(0), 106155. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106155>
- <https://www.mendeley.com/search/?page=1&query=Potential%20contributions%20of%20wind%20and%20solar%20power%20to%20China%27s%20carbon%20neutrality&sortBy=relevance>
- Maldonado-Moreno, J. C., & Cervantes-Nobles, J. D. J. (2021). Diseño de un sistema de generación de electricidad a partir de la energía eólica en un parque del barrio Las Flores de la ciudad de Barranquilla. Universidad Antonio Nariño. Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Biomédica.
- <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/5084/1/2021%20Jair%20cervantes%20.pdf>
- Mendoza-Cerón, N., y Rodríguez-Castillo, M. E. (2017). Diseño de un rotor eólico tipo Darrieus helicoidal. *Mecánica*, 1(2), 34-41. Recuperado de https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ingenieria_Mecanica/vol1num2/ECORFAN_Revista%20_de%20_Ingenier%C3%ADa_Mec%C3%A1nica_V1_N2.pdf#page=41
- Pedrozo Tapia, S. L. (2021). Diseño y prueba de desempeño de un rotor tipo Savonius para extracción de energía a partir del flujo vehicular. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/55707/26191.pdf?sequence=1>
- Perez Guzman, J. H. O. N. A. T. A. N. (2019). Calidad y eficiencia energética en el sistema de iluminación del alumbrado público de la cabecera municipal de San Fernando, Chiapas. <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/2091/MDRPIECA2019038.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Quiñonez, M. Q., Quiñonez, K. Y. S., Caicedo, M. R. I., & Bone, V. E. R. (2022). Impacto de la iluminación LED en la calidad de la energía de los circuitos de alumbrado público. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(4), 286-301. DOI: <https://doi.org/10.51798/sjiss.v3i4.472>
- <https://www.mendeley.com/search/?page=1&query=Impacto%20de%20la%20iluminacion%20LED%20en%20la%20calidad%20de%20la%20energia%20de%20los%20circuitos%20de%20alumbrado%20p%C3%BAblico&sortBy=relevance>
- Ramírez, J. M. B., Lucero, M. D. L. F., & Romero, M. L. G. (2018). Recuperación del espacio público para la reducción de la percepción de inseguridad: el caso del fraccionamiento Los Héroes en Puebla, México. *Revista de Urbanismo*, (39), 1-16. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2018.50489>, <https://www.mendeley.com/search/?page=1&query=Recuperaci%C3%B3n%20del%20espacio%20p%C3%BAblico%20para%20la%20reducci%C3%B3n%20de%20la%20percepci%C3%B3n%20de%20inseguridad-%3A%20el%20caso%20del%20fraccionamiento%20Los%20H%C3%A9roes%20en%20Puebla%2C%20M%C3%A9xico&sortBy=relevance>
- Rivera Herrera, R., & RIVERA HERRERA, R. I. C. A. R. D. O. (2020). Propuesta para la transición de instalaciones de media tensión para la 13 sur entre la reforma y la av. 11 poniente, en la ciudad de Puebla (Master's thesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla). Recuperado de <https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/11311/20200825122604-7716-T.pdf?sequence=2>
- Rivera, S. E. A. (2023). Costo beneficio de un aerogenerador de eje vertical de pequeña escala para uso residencial. <https://repositorio.unitec.edu/bitstream/handle/123456789/11427/21651075-octubre2020-i12-pg.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Saavedra, C. A. (2019). Optimización de la geometría de aerogenerador de eje vertical tipo Savonius. Recuperado de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/saavedra_chimal_a/etd_4021041920581.pdf
- Sánchez. C. C. M., Medina, A. P. E. (2022). Diseño de una turbina de eje vertical darrieus para suministrar energía en luminarias de alumbrado público en zonas rurales de San Ignacio. Perú. https://www.researchgate.net/profile/paul_edgardo_medina_agurto/publication/366622589_diseno_de_una_turbina_de_eje_vertical_darrieus_para_suministrar_energia_en_luminarias_de_alumbrado_publico_en_zonas_rurales_de_san_ignacio/links/63ab7c7303aad5368e4745f5/diseño-de-una-turbina-de-eje-vertical-darrieus-para-suministrar-energia-en-luminarias-de-alumbrado-publico-en-zonas-rurales-de-san-ignacio.pdf
- Soriano Avendaño, L. A. (2015). Modelación de aerogenerador con compensación difusa. <https://www.ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/LuisSA.pdf>
- World Energy Trade. (2020). Aerogenerador. Recuperado de <https://www.worldenergytrade.com/component/seoglossary/1-energia/aerogenerador>

BIOTECNOLOGÍA Y EL RENACER DEL ICUAP

BIOTECHNOLOGY AND THE REBIRTH OF ICUAP

Betzie Guadalupe Espinoza Herrera (1)
Samuel Hernández Anzaldo (2)

<http://orcid.org/0000-0001-6264-3114>
<http://orcid.org/0000-0002-4578-5310>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP

Recibido: 20/diciembre/ 2023

Aprobado: 26/febrero/ 2024

Publicado: 7/marzo/ 2024

(1)Licenciatura en Biotecnología, Facultad de Ciencias Biológicas.

(2)Centro de Química, Instituto de Ciencias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

betzie.espinozah@alumno.buap.mx

samuel.hernandezan@correo.buap.mx

El programa de la licenciatura Biotecnología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) fue creado en el año del 2013, recientemente, la Facultad de Ciencias Biológicas celebró el décimo aniversario de dicho programa. Desde ese año, la programación e impartición de las materias han estado a cargo principalmente de tres unidades académicas: Facultad de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Químicas y del Instituto de Ciencias.

El programa de Biotecnología ha fungido como plataforma para la consolidación de diferentes docentes recién ingresados a nuestra institución y esto se ha reflejado en la calidad de los estudiantes egresados de la carrera de biotecnología.

Muchas y muchos estudiantes de la licenciatura en biotecnología tienen la visión del Instituto de Ciencias (ICUAP) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla como una parte fundamental de sus carreras. Esto es debido a que en las instalaciones del instituto se les permite realizar voluntariados en los laboratorios de investigación, para realizar estancias, programas de servicio social y prácticas profesionales e incluso

tesis de licenciatura. Todos estos proyectos están enfocados a las diferentes áreas del conocimiento en las que pueden incursionar como biotecnólogos al terminar sus programas. Al final, esto les da la oportunidad de explorar el enfoque que más les interesa para desarrollarlo en sus vidas profesionales.

Por otro lado, durante la formación de los biotecnólogos, el ICUAP brinda la oportunidad de involucrarse en laboratorios para adquirir experiencia y conocimiento que contribuyan al desarrollo profesional, además, se involucran en el ambiente de la investigación y la divulgación científica que tiene un papel valioso en la decisión de los intereses profesionales del alumnado.

Adicionalmente, la vocación por la docencia de los y las académicas del instituto ha sido un rasgo distintivo de esta unidad académica. De manera general, las y los doctores de los centros de investigación del ICUAP, han mostrado calidez, humildad, empatía y paciencia además de disposición para transmitir conocimientos científicos a las nuevas generaciones de estudiantes contribuyendo significativamente a cerrar la brecha de rezago que dejó la pandemia



del COVID-19, la cual, mermó a muchos jóvenes de las experiencias experimentales. Otra contribución importante al estudiantado es el apoyo que se ofrece para la participación en diferentes actividades como congresos, exposición de carteles y proyectos cortos de investigación, siendo estas actividades las que proyectan al ICUAP a nivel nacional e internacional.

De acuerdo al último informe entregado por la directora del ICUAP, el 85% de las y los profesores investigadores son miembros del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONACHCYT). Generando una planta del núcleo base con mucha calidad científica y la forma de involucrarse con el alumnado que tienen un alto grado de estudios y un amplio repertorio de conocimientos, motiva a los estudiantes a seguir dentro de las líneas de investigación planteadas en los diferentes grupos de investigación.

La carrera de biotecnología en la BUAP le ha dado un impulso más grande académico y científico al ICUAP y ha permitido tener un alcance mayor hacia nuevas generaciones de estudiantes que exigen preparación de clases más dinámicas y laboratorio con alto equipamiento para desarrollarse y tener competencia en los diversos campos laborales que puedan cubrir. Por esto, es importante que directivos, académicos y estudiantes del Instituto tengamos claro que este compromiso con el programa de biotecnología incluye una alta prioridad para aprovechar la energía, iniciativa y curiosidad de los estudiantes de biotecnología, que a decir de manera personal por los autores, tienen mucha capacidad y mucho potencial para alcanzar todas sus metas.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a los miembros del laboratorio de Química Inorgánica, del ICUAP principalmente a las doctoras Yasmi Reyes Ortega, Alejandra Romero Morán y Cándida Pastor Ramírez y al doctor Hugo Vázquez Lima por su apoyo en el desarrollo de los y las estudiantes de biotecnología. Además, a la dirección del ICUAP por la invitación y gestión del presente número.

HACER CIENCIA. VIVENCIAS EN EL ICUAP

DO SCIENCE. ICUAP'S EXPERIENCES

Emilio de La Cruz Domínguez
Yasmi Reyes Ortega*

<http://orcid.org/0009-0002-5832-7615>
<http://orcid.org/0000-0001-8008-8644>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP.
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

Centro de Química
Instituto de Ciencias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Ciudad Universitaria, Av. San Claudio, Jardines de San Manuel,
C.P. 72570 Puebla, Pue. México
emilio.delacruz@alumno.buap.mx
yasmi.reyes@correo.buap.mx
(*) Autor de correspondencia

De todos los caminos que existen, de la gran variedad de profesiones que hay, de todos los estilos de vida posibles, escoger a la biotecnología y el camino de la investigación, son sin duda una de las mejores decisiones de mi vida. Para mí, la ciencia no se limita solo a estudiar el universo y la materia que lo compone, no se trata solo de datos e interpretaciones; para mí la ciencia es una forma de encontrar mi lugar en el mundo. Un lugar donde todo lo que importa es tu capacidad para entender y tus ganas de aprender más, donde no solo se vive para resolver problemas o recibir galardones, lo mejor de esta vida, es hacer del conocimiento un fin en sí mismo, o en otras palabras, lo mejor de esta vida es “Hacer ciencia”. Una frase que describe un concepto desproporcionado para la simpleza de un par de palabras, hacer ciencia, significa amar a lo desconocido por su capacidad para sorprendernos, significa compartir ideas y propósitos, alegrías y tristezas, significa crear y destruir, significa siempre ir más allá y lograr aún más, pero nunca solo.

Hacer ciencia, también es comunidad, compañerismo, disciplina, responsabilidad, compromiso, y mi gran fortuna es siempre poder ir de la mano de grandes maestros

y compañeros que de una u otra forma, los cuales han contribuido para formar el científico que soy.

Mi nombre es Emilio Enrique de la Cruz Domínguez, actualmente tengo 25 años, soy de Puebla capital, me encuentro terminando la carrera de Biotecnología; estoy cursando mi noveno y último semestre. Terminé hace poco mi estancia de servicio social en el laboratorio de química inorgánica (ICUAP-9) del instituto de ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla desarrollando un pequeño proyecto de investigación bajo la asesoría de mi ahora maestra la Dra. María Graciela Yasmi Reyes Ortega.

Dentro de laboratorio de química inorgánica, se realiza investigación enfocada a la producción de materiales magnéticos que son de interés industrial en la fabricación de diferentes dispositivos electrónicos como los microchips y las USB; dentro de mi estancia, mi trabajo consistió en complementar la síntesis de un polímero que se obtiene al sintetizar una base de Schiff que ya fue reportada por el mismo laboratorio de la mano de la Dra. Candy y la Dra. Yasmi, hace unos años (Figura 1).

Después de algunos meses, logramos ajustar



Figura 1. Trabajando en el laboratorio

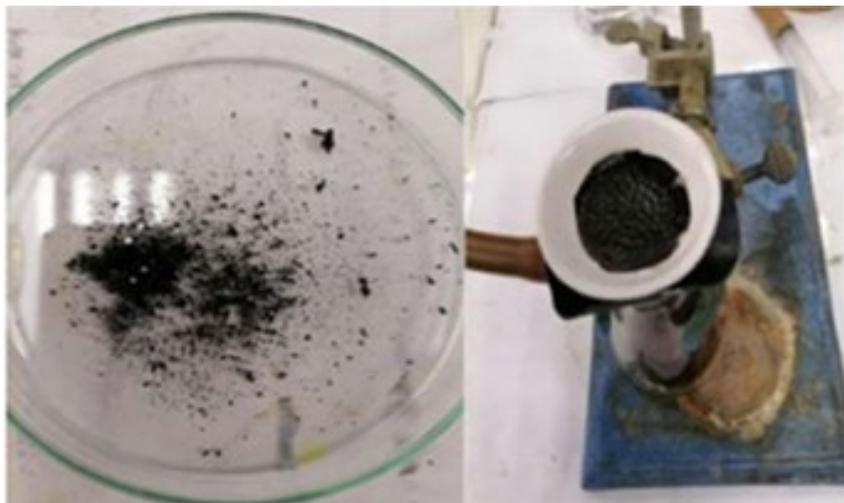


Figura 2. Polímero purificado para su caracterización por espectroscopia electrónica.

la síntesis inicial de la base de Schiff para obtener únicamente el polímero de nombre YEH4, sin embargo, aún me encuentro trabajando en la purificación, con la finalidad de obtener un cristal, para poder hacer una caracterización más completa (Figura 2).

Ahora puedo decir que estar en el laboratorio, me ayudó a terminar de encontrar mi gusto por la ciencia; descubrí que hacer investigación y contribuir al desarrollo del conocimiento son muy importantes para mí y mi desarrollo personal y profesional, me encontré con personas como mi compañero Arturo, un alumno de doctorado, que me compartió su experiencia para mejorar en muchos ámbitos, además está mi maestra la Dra. Yasmi, que ha sido fuente inagotable de conocimiento y perspectiva.
Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, al ICUAP, particularmente, por su apoyo para hacer el trabajo de investigación.

EXPERIENCIAS DE VIDA EN UN LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN ICUAP.

LIFE EXPERIENCES IN THE RESEARCH
LAB OF ICUAP.

Salvador Brito Ojeda
Yasmi Reyes Ortega*

<https://orcid.org/0009-0001-2159-662X>
<https://orcid.org/0000-0001-8008-8644>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP.
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

Centro de Química. Instituto de Ciencias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Ciudad Universitaria, Av. San Claudio, Jardines de San Manuel,
C.P. 72570 Puebla, Pue. México
salvador.brito@alumno.buap.mx
yasmi.reyes@correo.buap.mx (*)

Mi nombre es Salvador Brito Ojeda. Actualmente, tengo 24 años y soy originario de Puebla. Ingresé a la carrera de químico farmacólogo en la Facultad de Ciencias Químicas durante el periodo de primavera 2018. Ahora estoy terminando mis últimas materias del mapa curricular. Inscríbime un servicio social en el Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, en un proyecto donde el objetivo principal era aprender a trabajar en un laboratorio desarrollando una parte del trabajo de investigación. La razón por la cual elegí ingresar a este proyecto fue para generar esa experiencia y conocer cómo es el desarrollo de una investigación y el trabajo en el laboratorio. En ningún otro momento de mi carrera había cursado o tocado temas acerca de la química inorgánica y es por eso que me llamó mucho la atención este programa. Cuando empecé a conocer mi área de trabajo, mis compañeros y los encargados del laboratorio me hicieron sentir muy bien recibido. Algo que me gustó

mucho al trabajar en el laboratorio fue que desde el principio la Dra. Yasmi me brindó una metodología para empezar todo el tema de síntesis. Me recomendaba investigar algunos temas clave que me ayudaron a comprender mejor cómo es que funciona la química inorgánica, desarrollamos un pequeño protocolo en el que se iba agregando información tanto teórica como experimental acerca de los temas que íbamos viendo. Con el paso del tiempo, fui comprendiendo mejor diferentes aspectos importantes, y por qué son relevantes, sobre la síntesis de productos, entre estos aspectos está la prueba y selección de un buen disolvente para la reacción (Figura 1). La elección de un buen ligante para la síntesis (Figura 2), la realización de un perfil térmico para conocer la temperatura óptima para una reacción (Figura 3), así como elegir y darle un tratamiento necesario al material que se ocupará para la reacción y también la realización de una correcta extracción del producto obtenido.



Figura 1. Pruebas de solubilidad.



Figura 2. Ligante elegido para la reacción.

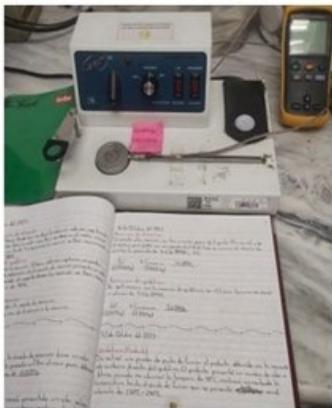


Figura 3. Perfil de temperaturas para la reacción.

Después de realizar las primeras reacciones me enseñaron diferentes metodologías espectroscópicas y físicas que son de gran ayuda para caracterizar los productos obtenidos. Durante la carrera estudié algunas de estas espectroscopias, pero la mayoría de veces no llegaba a ponerlas en práctica o no lograba relacionar su utilidad. Realicé pruebas de solubilidad, esta prueba ayuda a determinar en qué disolventes es soluble el producto obtenido y así obtener más características de él. Seguido se realizan pruebas de punto de fusión, lo cual nos va a ayudar a asignar la temperatura a la que el producto obtenido tiene un cambio de estado; pasando de sólido a líquido, lo cual, nos va a brindar aún más información. Aprendí a utilizar e interpretar resultados de espectros UV-vis e infrarrojo, y esta es la parte que más me fascinó del programa, ya que por mi parte tengo el conocimiento teórico y el fundamento de estas pruebas, pero en ningún momento tuve la oportunidad de ponerlas en práctica y analizar qué información podrían brindarme. Aprendí que estas pruebas (UV-vis e infrarrojo) nos brindan información acerca de la estructura que tiene nuestra molécula o producto obtenido y son indispensables para la correcta identificación de nuevos compuestos. También aprendí acerca de dos métodos de síntesis que no conocía antes. La síntesis tradicional en la cual se emplean metales en un estado ionizado o, mejor dicho,

en su forma de sal. El otro método de síntesis que aprendí fue la síntesis directa en la que se emplea el metal en su estado metálico, en el cual llevé a cabo ambos tipos de síntesis y observar sus diferencias, ventajas y desventajas. Además de adquirir todos esos conocimientos en el laboratorio, tuve la oportunidad de asistir a varias pláticas y presentaciones de trabajos de investigación que realizaban compañeros del instituto, y también de la facultad de biología. Esto último fue muy interesante para mí, ya que pude conocer la manera en la que se expone y defiende un tema de investigación, y esto, aporta un punto de vista diferente al que tenía antes acerca de las defensas y evaluación de ponencias. Como conclusión de este proceso, puedo opinar que, mi estancia en el laboratorio fue una de las partes más bonitas e interesantes que he tenido a lo largo de la carrera. No solo por toda la información y preparación que obtuve en él, sino también por poder trabajar junto a personas que saben y disfrutan lo que hacen día a día, además de todo el apoyo y atención que recibí en cada momento por parte de ellos.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a los doctores y a los compañeros que me brindaron su apoyo y que trabajan en el Laboratorio de Inorgánica del Centro de Química.

ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN PLANTAS: UN MECANISMO DE DEFENSA ANTE LOS HERBÍVOROS

ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN PLANTS: A DEFENSE MECHANISM AGAINST HERBIVORES

Miguel Santoyo Martínez(1)*

Leticia Isabel Valencia Cuevas (2)

María Guadalupe Tenorio Arvide (3)

<https://orcid.org/0000-0002-8546-962X>

<https://orcid.org/0000-0001-6125-4782>

<https://orcid.org/0000-0003-1770-9131>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP

Recibido: 20/diciembre/ 2023

Aprobado: 26/febrero/ 2024

Publicado: 7/marzo/ 2024

(1)Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. 14 sur 6301, Col. San Manuel, C. P. 72570, Puebla, Pue. México.

(2)Escuela de estudios superiores Jicarero, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Carretera Galeana, Tequesquitengo s/n, Comunidad El Jicarero, C. P. 62915, Jojutla, Morelos, México

tenorio.arvide@correo.buap.mx

leticia.valencia@uaem.mx

miguel.santoyom@correo.buap.mx

RESUMEN

La herbívora es un proceso natural en el que los animales consumen tejidos vegetales, ante esta situación las plantas han desarrollado diferentes estrategias adaptativas para disminuir el consumo de sus tejidos. Por ejemplo, la formación de espinas y la producción de compuestos químicos son mecanismos de defensa que han desarrollado las plantas para provocar lesiones, efectos adversos a los herbívoros como daños en su sistema digestivo o la muerte. Existe un grupo de plantas que ha evolucionado para acumular elementos tóxicos como los metales pesados de su entorno, algunos de los cuales no tienen ninguna función metabólica en las plantas, sin embargo, los acumulan en sus diferentes tejidos como la raíz, tallo y hojas, lo que ha sido de utilidad para disminuir el ataque de los herbívoros. El tejido que acumula una mayor concentración de metales pesados son las hojas, siendo el órgano vegetal más atacado por los herbívoros. Por lo que la acumulación de metales pesados en plantas ha sido una estrategia de defensa viable por el reducido gasto energético que se necesita para llevar estos elementos a las hojas de las plantas.

Palabras claves: Herbívoros, metales pesados, plantas acumuladoras, defensa.

ABSTRACT

Herbivory is a natural process in which animals consume plant tissues. In this situation, plants have developed different adaptive strategies to reduce the consumption of their tissues. For example, the formation of thorns and the production of chemical compounds are defense mechanisms that plants have developed to cause injuries, adverse effects on herbivores such as damage to their digestive system or death. There is a group of plants that has evolved to accumulate toxic elements such as heavy metals from their environment, some of which do not have any metabolic function in plants. However, they accumulate them in their different tissues such as the root, stem and leaves, which has been useful to reduce the attack of herbivores. Therefore, the accumulation of heavy metals in plants has been a viable defense strategy due to the reduced energy expenditure needed to transport these elements to the leaves of the plants.

Keywords: Herbivores, heavy metals, accumulator plants, defense.

INTRODUCCIÓN

Las plantas son los principales productores primarios de los ecosistemas terrestres, por lo que se convierten en una fuente importante de alimento y energía para otros organismos como los consumidores primarios (herbívoros), siendo estos últimos enemigos naturales de las plantas (Granados-Sánchez et al., 2008). El consumo de los tejidos por parte de los herbívoros tiene un costo energético para las plantas, lo que puede reducir su sobrevivencia y éxito reproductivo. Es por ello, que las plantas han adquirido a través de su evolución adaptaciones morfológicas, fisiológicas o químicas, cuyo objetivo es reducir el ataque de los herbívoros, a este conjunto de características se les ha agrupado bajo el término de defensa (Gómez y Zamora 2002). Este proceso de evolución ha favorecido estrategias que involucran mecanismos que no requieren un gasto energético elevado. En este sentido, hay plantas que acumulan elementos tóxicos llamados metales pesados, principalmente en sus hojas, los que actúan como un mecanismo de defensa que reduce los niveles de daño por herbívoros. La ventaja para las plantas es que estos elementos los obtienen del ambiente en donde crecen y no invierten energía para producirlos.

Sistemas de defensas en plantas

Las defensas de las plantas pueden ser de tipo químico mediante la producción de metabolitos secundarios. Estos son compuestos o productos químicos que juegan un papel importante en la defensa, ya que perjudican el rendimiento de los herbívoros por uno de estos mecanismos generales: a) reducen el valor nutricional de los tejidos vegetales; 2) pueden actuar disuadiendo a los herbívoros de consumir un tejido; o 3) pueden ser tóxicos (Belete et al., 2018). Por ejemplo, los flavonoides y taninos producen un sabor amargo a los herbívoros inhibiendo su alimentación, reducen las proteínas solubles de las plantas, lo que disminuye el valor nutricional, además, tienen efectos en la inhibición de la digestión. Las saponinas producen un sabor amargo que disminuye el consumo del tejido vegetal y tienen efectos inflamatorios en los herbívoros. Finalmente, los glúcidos cianogénicos generan moléculas tóxicas como el ácido cianhídrico que provoca envenenamiento (Camacho-Escobar et al., 2019) (Figura 1).

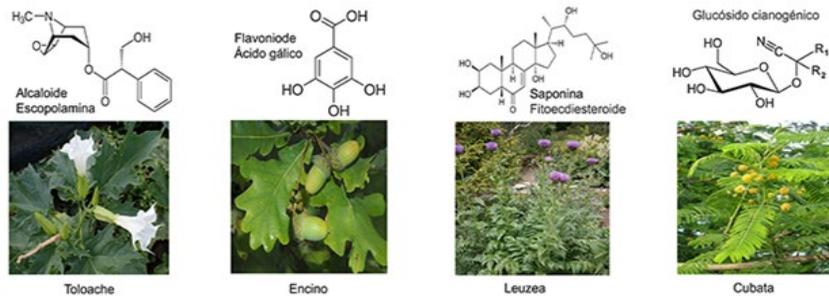


Figura 1. Mecanismos de defensa química en plantas. Imagen 1. Autor (Santoyo-Martínez M), tomada en el poblado de Huautla, Morelos. Imagen 2. crédito: <https://mexico.inaturalist.org/taxa/56133-Quercus-robur>. Imagen 3. crédito: <https://ecuador.inaturalist.org/taxa/793348-Rhaponticum-carthamoides>. Imagen 4. Autor (Santoyo-Martínez M) tomada en el poblado de Quilamula, Morelos.

Otro tipo de defensa es el físico, como la producción de espinas, pelos y tricomas, que por sus características físicas impiden el contacto del herbívoro con el tejido vegetal, siendo uno de los mecanismos de defensa más diversos y pueden medir desde un par de milímetros hasta centímetros (Oyama y Espinoza, 1986) (Figura 2).



Figura 2. Mecanismos de defensa física en plantas. Imagen 1. Autor (Santoyo-Martínez M), tomada en el poblado de Zapotitlán, Puebla. Imagen 2. Autor (Santoyo-Martínez M), tomada en la ciudad de Pachuca, Hidalgo. Imagen 3 y 4. crédito: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wigandia_urens,_a_nettle_know_as_Quemadura_%289358343073%29.jpg

Por otro lado, existe un mecanismo de defensa en plantas, que es menos conocido, y que consiste en la acumulación de metales pesados en sus tejidos, donde las hojas, son las estructuras donde se concentran comúnmente estos elementos. El valor adaptativo de este mecanismo radica en que las especies acumuladoras de metales tienen protección contra el estrés causado por los herbívoros (Body y Martens 1992; Martens y Boyd, 1994). Esta propuesta permite explicar la prevalencia de las plantas acumuladoras mediante un proceso de selección natural, en donde las plantas adquieren los metales pesados del suelo, los cuales son absorbidos y acumulados en sus partes aéreas sirviendo como un mecanismo de defensa ante el ataque de los herbívoros. La

ventaja de esta estrategia para las plantas es que no sintetizan estos elementos, por lo que pueden tener un menor costo metabólico a diferencia de la defensa química existente en las plantas, basada en la síntesis de productos orgánicos procedentes del metabolismo secundario (Poschenrieder et al., 2008).

¿Cómo acumulan los metales pesados las plantas?

Las plantas tienen la capacidad de adquirir iones inorgánicos del suelo, entre estos los metales pesados. La raíz es la encargada de su ingreso debido a que tiene la capacidad de absorber estos compuestos, ya que posee cargas negativas en sus células y por la presencia de grupos carboxilos del ácido péctico que interactúan con las cargas positivas de los iones inorgánicos. Esto facilita su entrada mediante un proceso de difusión en el medio y por intercambio catiónico (Wang y Chen, 2009). Una vez unidos, los metales pesados ingresan a través de las capas superficiales de la raíz, atravesando la pared celular de las células con la ayuda de algunas proteínas que permiten su ingreso y transporte hacia los sistemas vasculares (Xilema y Floema) que son los encargados de llevarlos hasta la parte aérea de las plantas (translocación) (Furini 2012) (Figura 3). Si bien, la acumulación de metales pesados puede tener efectos morfológicos, fisiológicos o genéticos en las plantas que los acumulan (Santoyo-Martínez et al., 2020) está bien documentado que diversas especies pueden establecerse, crecer y reproducirse en sitios con presencia de metales pesados.

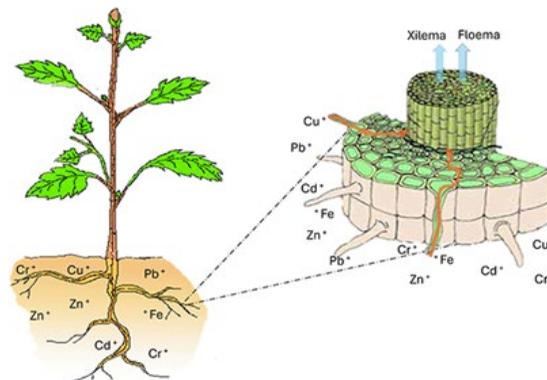


Figura 3. Ingreso y transporte de iones inorgánicos del suelo a la parte aérea de las plantas. Imagen (Santoyo-Martínez M)

Consecuencias de comer hojas con metales pesados

La protección de las plantas por la acumulación de metales pesados debe de cumplir las siguientes condiciones: 1) el metal absorbido debe de ser más tóxico para el herbívoro que para la planta; 2) el metal debe de reducir los efectos de la herbivoría, y 3) el metal incrementa la resistencia de la planta contra el ataque de especies de herbívoros (Boyd, 2012). Las condiciones antes mencionadas provocan en los herbívoros dos efectos, uno disuasivo, y otro tóxico, este último generando la muerte al organismo (Figura 4).

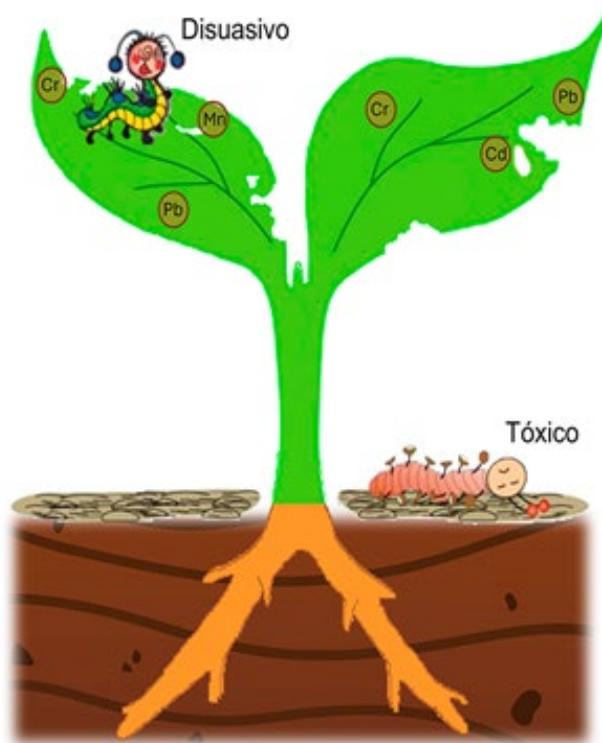


Figura 4. Efecto en los herbívoros por el consumo de plantas acumuladoras de metales pesados. modificado de Llugany et al., 2007.

En los últimos años, se han realizado más estudios, lo que ha revelado que cerca de 450 especies de plantas acumulan metales pesados en sus tejidos, particularmente Cadmio (Cd), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Zinc Zn (Hall, 2002; Rascio, y Navari-Izzo, 2011). La acumulación

puede haber evolucionado en algunas especies de plantas debido a un proceso de selección natural, en donde las plantas que acumulaban una mayor concentración de metales eran más resistentes a los ataques de los herbívoros, lo que favoreció su sobrevivencia y éxito reproductivo.

CONCLUSIÓN

La acumulación de metales pesados en las plantas es un proceso evolutivo que ha servido como mecanismos de defensa contra los herbívoros. Este mecanismo resulta ventajoso sobre las defensas tradicionales como la producción de metabolitos secundarios o la defensa física (p. ej. espinas), donde la acumulación de estos elementos implica un menor gasto energético, dado que las plantas acumuladoras de metales pesados no los sintetizan, simplemente los obtienen del sustrato en donde crecen acumulándolos en sus tejidos. Entre los elementos tóxicos que acumulan las plantas están el Cr, Cd y Pb que, si bien limitan el crecimiento normal de la planta, se compensa con la disminución en el ataque de los herbívoros que consumen sus tejidos.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por el apoyo de una beca otorgada para la estancia posdoctoral Miguel Santoyo-Martínez.

REFERENCIAS

- Belete, T. 2018. Defense mechanisms of plants to insect pests: from morphological to biochemical approach. Trends in Technical & Scientific Research. 2: 30-38.
- Boyd, R. S. y Martens, S. N. 1992. The raison d'être for metal hyperaccumulation by plants. In: Baker AJM, Proctor J, Reeves RD (eds) The vegetation of ultramafic (serpentine) soils. Intercept Limited, Andover. 279-289 p.
- Boyd, R. S. 2012. Plant defense using toxic inorganic ions: Conceptual models of the defensive enhancement and joint effects hypotheses. Plant Science. 195: 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.06.012>
- Camacho-Escobar, M. A., Ramos-Ramos, D. A., Ávila-Serrano, N. Y., Sánchez-Bernal, E. I., & López-Garrido, S. J. (2020). Las defensas físico-químicas de las plantas y su efecto en la alimentación de los rumiantes. Terra Latinoamericana, 38: 443-453. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.629>
- Furini A. 2012. Plant and Heavy Metals. Springer. 95 pp.
- Gomez JM, Zamora R (2002) Thorns as induced mechanical Defense in a long-lived shrub (*Hormathophylla spinosa*, Cruciferae). Ecology 83: 885-890. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[0885:TAIMDI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[0885:TAIMDI]2.0.CO;2)
- Granados-Sánchez, D., Ruíz-Puga, P., & Barrera-Escorcía, H. (2008). Ecología de la herbivoría. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, 14: 51-63.
- Hall, J. Á. (2002). Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. Journal of experimental botany, 53: 1-11. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.1>
- Martens, S. N. and Boyd, R. S. 1994. The ecological significance of nickel hyperaccumulation: a plant chemical defense. Oecologia. 98: 379-384.
- Oyama, K., y Espinoza, F. 1986. Hervíboros y plantas ¿cómo interactúan?
- Poschenrieder, C., Tolra, R. y Barcelo, J. 2008. Can metals defend plants against biotic stress? Trends in Plant Sciences. 11: 288-295. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.04.007>
- Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting?. Plant science, 180: 169-181. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>
- Santoyo-Martínez, M., Mussali-Galante, P., Hernández-Plata, I., Valencia-Cuevas, L. Y Tovar-Sánchez E. 2020. Heavy metal bioaccumulation and morphological changes in *Vachellia campechiana* (Fabaceae) reveal its potential for phytoextraction of Cr, Cu, and Pb in mine tailings. Environmental Science Pollution and Research. 27: 11260-11276. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07730-7>
- Wang, J. y Chen. C. 2009. Biosorbents for heavy metals removal and their future. Biotechnology Advances. 27: 195-226. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.11.002>

LAS AVES DE GRANJA REQUIEREN VACUNARSE PARA MANTENER LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS CON ALTO VALOR NUTRICIONAL A BAJO COSTO. POULTRY BIRDS REQUIRE VACCINATION TO SUPPORT THE PRODUCTION OF FOOD WITH HIGH NUTRITIONAL VALUE AT LOW COST.

Sergio Alberto Matias Vera¹
María Patricia Sánchez Alonso¹
Erasmó Negrete Abascal²
Candelario Vázquez Cruz¹

<https://orcid.org/0009-0004-2527-4603>
<https://orcid.org/0000-0002-9313-3659>
<https://orcid.org/0000-0002-9105-5669>
<https://orcid.org/0000-0003-4362-8044>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

¹ Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas, ICUAP, BUAP. ² Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. Av. De Los Barrios 1, Los Reyes, Iztacala, 54090 Tlalnepantla de Baz, Edo. De México.

sergio.matiasvera.icuap@viep.com.mx
maria.sanchez@correo.buap.mx
candelario.vazquez@correo.buap.mx
ecobacilos@yahoo.com
negrete@yahoo.com
margarita.arenas@correo.buap.mx

RESUMEN

El sector avícola es uno de los más importantes en el mundo y en la sociedad mexicana, gracias a la producción de alimentos de primera necesidad, un ejemplo de esto es que México ocupa los primeros lugares en la exportación de huevo y presenta un consumo per cápita de 22 kilos, posicionándose como el mayor consumidor a nivel mundial. Sin embargo, la industria avícola se ve afectada por infecciones como la coriza infecciosa causada por *Avibacterium paragallinarum* o la gallibacteriosis cuyo agente causal es *Gallibacterium anatis*. Estas afectan principalmente a gallinas de postura y pollos de engorde, causando una disminución del 10 al 40% en la producción de huevo, impactando directamente en la salud pública y generando pérdidas económicas relevantes. Lo anterior destaca la importancia en la búsqueda de nuevas alternativas para tener mayor control y prevención de infecciones, donde *A. paragallinarum* y *G. anatis* poseen características potenciales para ello

Palabras clave: *Avibacterium paragallinarum*, *Gallibacterium anatis*, coriza infecciosa, vacunas, industria avícola.

INTRODUCCIÓN

Las vacunas han desempeñado un papel importante en la historia de la humanidad, el ejemplo más reciente, es la vacuna que ayudó a contener la pandemia de COVID-19, producida por el coronavirus SARS-CoV-2. En la práctica existen varios tipos de vacunas, cuya utilidad consiste en exponer al organismo hospedero contra un agente infeccioso para generar una respuesta inmune. En otras palabras, las vacunas preparan al organismo para que cuando se enfrente a una infección pueda ganar la batalla.

Para el ser humano la vacunación es importante, existe un esquema de prevención de enfermedades infecciosas que inicia a muy temprana edad y que se prolonga hasta la adolescencia aplicando dosis periódicamente.

ABSTRACT

The poultry sector is one of the most important in the world and in Mexican society, thanks to the production of staple foods. An example of this is that Mexico ranks first in egg exports and has a per capita consumption of 22 kilos, making it the largest consumer in the world. However, the poultry industry is affected by infections such as infectious coryza caused by *Avibacterium paragallinarum* or gallibacteriosis whose causal agent is *Gallibacterium anatis*. These mainly affect laying hens and broilers, causing a 10 to 40% decrease in egg production, directly impacting public health and generating significant economic losses. This highlights the importance of the search for new alternatives to have greater control and prevention of infections, where *A. paragallinarum* and *G. anatis* have potential characteristics for this.

Keywords: *Avibacterium paragallinarum*, *Gallibacterium anatis*, infectious coryza, vaccines, poultry industry.

En otros sectores de interés para la sociedad, como el caso del sector productivo de la industria avícola la vacunación es importante, pues constituye una de las fuentes de alimentación accesibles para las personas a nivel local y mundial.

En México, la industria avícola es fundamental, ya que el país se posiciona como el mayor consumidor de huevo a nivel mundial, con un consumo per cápita de 22 kilos. Adicionalmente, la exportación de huevo representa un ingreso económico muy grande, al ser el cuarto productor de huevo a nivel mundial. Sin embargo, el sector avícola requiere muchos insumos para mantener su productividad, entre ellos los necesarios para controlar infecciones, algunas de ellas

recurrentes por las mismas prácticas productivas o por la evolución natural de los agentes infecciosos. Algunas de las principales infecciones de las aves de granja son producidas por bacterias de la familia Pasteurellaceae (El Huevo Mexicano, Un Alimento Muy Valioso | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | Gob. Mx, n.d.).

La Coriza infecciosa (CI)

La coriza infecciosa es una infección bacteriana, causada por *Avibacterium paragallinarum* situada en las vías respiratorias superiores de aves, que afecta principalmente a gallinas de postura y pollos de engorde.

La CI es una enfermedad de gran importancia en el sector avícola, cuyo impacto se ve reflejado en la disminución en la producción del huevo hasta en un 40% causando grandes pérdidas económicas. Asimismo, tiene presencia en países de todo el mundo como: Estados Unidos, India, China, Sudáfrica, Perú, Ecuador, Países Bajos, Alemania, Japón, España, Corea del Sur, Reino Unido y México, por mencionar algunos (Morales-Erasto et al., 2013).

La coriza infecciosa se caracteriza por presentar signos clínicos como la inflamación de vías respiratorias, secreción nasal, inflamación facial, lagrimeo, conjuntivitis o anorexia. También se manifiesta con otros signos no tan comunes, pero que también se pueden presentar principalmente en machos, como la inflamación en la cresta o barbilla (Xu et al., 2019).

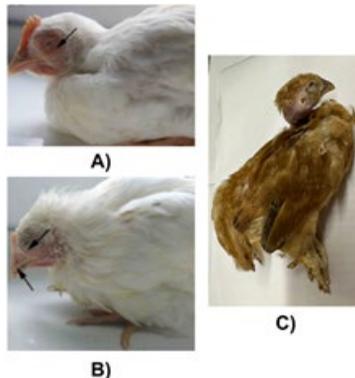


Figura 1. Fotografías de aves con síntomas como edema facial ligero A, edema facial severo B y C. Obtenida y modificada de (Guo et al., 2022).

En consecuencia, es una infección de periodo corto que puede variar entre dos y tres semanas, llegando a presentar complicaciones en la infección a causa de la presencia de otros microorganismos como *Mycoplasma gallisepticum*, *Mycoplasma synoviae* o *Gallibacterium anatis*, este último perteneciente a la misma familia de *A. paragallinarum* generando un cuadro complicado de sanar con mayor prolongación. Específicamente, en el caso de una infección por *Avibacterium paragallinarum* y *Gallibacterium Anatis* se tiene reporte de que además de agravar los signos patológicos podría llevar a la muerte de las aves (Paudel et al., 2016).

Generalidades de *Avibacterium paragallinarum* (Avpg)

Avibacterium paragallinarum es una especie bacteriana y agente causal de la coriza infecciosa perteneciente a la familia bacteriana Pasteurellaceae. Fue identificado como agente causal de la coriza en los años treinta donde se le llamó “*Bacillus Haemophilus coriza gallinarum*”, años más tarde se renombró a “*Haemophilus paragallinarum*” y así permaneció hasta la reclasificación del género en 2005 recibiendo el nombre “*Avibacterium*” como se le conoce hoy en día. Asimismo, el género *Avibacterium* comprende las siguientes especies: *Avibacterium paragallinarum*, *Avibacterium volantium* y *Avibacterium avium* (Blackall et al., 2005).

Crecimiento de *Avibacterium paragallinarum*

Avibacterium paragallinarum es una bacteria Gram negativa que posee algunas características como no formar esporas, su morfología bacteriana es coco bacilar y con tendencia a formar cadenas. El crecimiento

en placa de *A. paragallinarum* se presenta formando colonias pequeñas, circulares y lisas en forma de rocío, con un tiempo de incubación de 18 a 24 horas a 37 °C en medios de cultivo como cerebro corazón infusión (BHI) y agar sangre (Figura 2). Además, *Avibacterium paragallinarum* requiere de NAD (Nicotinamida adenina dinucleótido) un compuesto de gran importancia para el crecimiento y desarrollo de esta bacteria (Soriano-Vargas et al., 2013).

Es tal la importancia del NAD en *Avibacterium paragallinarum* que con base en ello se presentan dos biovariedades: primeramente, la biovariedad *Avibacterium paragallinarum* NAD-dependiente que representa la mayoría de los aislamientos reportados, los cuales requieren el suplemento de NAD para su crecimiento y este puede ser añadido directamente al medio o mediante la utilización de una cepa nodriza como *Staphylococcus epidermidis* por su habilidad de ser un microorganismo autosuficiente de NAD que le permite crecer a Avpg en el laboratorio (Soriano-Vargas et al., 2013).

Por otro lado, la serovariedad *Avibacterium paragallinarum* NAD-independiente es menos común y no requiere el suplemento de NAD para su desarrollo, lo cual genera especulación de que esta serovariedad podría tener diferencias importantes con las cepas típicas ya conocidas (Jeong et al., 2017).

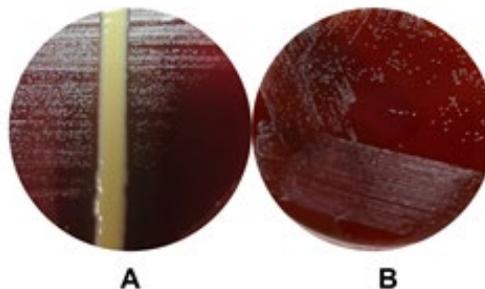


Figura 2. Biovariedades de *Avibacterium paragallinarum* en Agar sangre. A) *Avibacterium paragallinarum* NAD-dependiente con *S. epidermidis* como cepa nodriza. B) *Avibacterium paragallinarum* NAD-independiente. Elaboración propia con ayuda de la Dra. María Elena Cobos Justo del Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Seroclasificación de *A. paragallinarum*.

La seroclasificación de *Avibacterium paragallinarum* se basa principalmente en dos maneras: los esquemas de Kume y Page. El esquema de Page clasifica a esta bacteria en los serovares A, B y C mediante aglutinación en placa. Por otro lado, el esquema de Kume se conforma por los serogrupos I, II y III por el método de inhibición de la hemaglutinación en placa. En la actualidad se conocen tres serogrupos (A, B, C) con 9 serovares de *A. Paragallinarum* los cuales se enlistan a continuación: A-1, A-2, A-3, A-4, B-1, C-1, C-2, C-3 y C-4 (Blackall, 1999).

En México se han logrado identificar las serovariedades NAD- dependientes A-1, A-2, C-1, además, respecto a las NAD-independientes, solo han sido reportadas en pocos países como Sudáfrica, Perú o México, donde se han identificado las serovariedades B-1 y C-2. Lo anterior posiciona a México como el país con mayor número de serovariedades de *Avibacterium paragallinarum*, principalmente en estados con mayor producción de huevo a nivel nacional como Puebla, Jalisco o Sonora, este último con la presencia de los tres serogrupos (A, B y C) resaltando la necesidad del desarrollo de vacunas con la presencia los tres serogrupos que sean efectivas (Falconi-Agapito et al., 2015).

Características bioquímicas de *Avibacterium paragallinarum* y *G. anatis*

Características	<i>A. paragallinarum</i>	<i>G. anatis</i> (haemolytica)	<i>G. anatis</i> (anatis)
Catalasa	- (0/51)	+	+
Haemolysis	- (0/100)	+	-
Ornitina descarboxilasa	- (0/9)	-	-
L- arabinosa	- (0/100)	-	-
D- manitol	+ (96/100)	+	+
D- galactosa	- (0/100)	+	+
α -glucosidasa	- (0/51)	+	+

Tabla 1. Características bioquímicas del género *Avibacterium paragallinarum*, así como los biovares de *Gallibacterium Anatis*. Obtenida de (Blackall et al., 2005) y modificada por el autor.

Factores de virulencia de *Avibacterium paragallinarum*.

Avibacterium paragallinarum posee la capacidad de causar infección mediada por factores que se encuentran involucrados en distintos procesos. Primeramente, las fimbrias son compuestos de proteínas que forman parte de la estructura bacteriana que contribuyen a la adherencia en células del hospedero y juegan un papel importante en la virulencia (Liu et al., 2016).

De igual forma, la cápsula se encuentra en el exterior de las bacterias, principalmente formada de polisacáridos cuya función es la protección de la célula bacteriana de factores como la desecación o fagocitosis. Aunque las funciones de la cápsula de *A. paragallinarum* no se conocen a fondo, algunos ensayos reportan que la pérdida de la cápsula aumenta la actividad de hemaglutinación y adhesión, pero disminuye la virulencia, resaltando la importancia realizar mayor investigación en esta bacteria (Tu et al., 2014), (Wu et al., 2010).

Además, las toxinas RTX formadas por proteínas tienen la capacidad para formar poros con actividad hemolítica y citotóxica en las células del huésped como los macrófagos aviarios, por lo que desempeña un papel determinante en la infección de *Avibacterium paragallinarum* e incluso estas toxinas son candidatas para el diseño de vacunas contra enfermedades causadas por miembros de la familia Pasteurellaceae (Pan et al., 2012).

Características antigénicas de *Avibacterium paragallinarum*.

Avibacterium paragallinarum posee factores con gran potencial antigénico que podrían ser utilizados como un agente vacunal ante el creciente resurgimiento de infecciones y variaciones que ha presentado esta bacteria en los años recientes. Por tal motivo, la hemaglutinina (HA) es una pieza fundamental en la inmunogenicidad y serotipificación de *Avpg* considerada como uno de los factores más importantes. La proteína HMTp210 es una proteína altamente antigénica de membrana con un tamaño de 210 kDa codificada por el gen *hmtp210* (Wang et al., 2014).

Por otra parte, resulta interesante que la hemaglutinina puede tener regiones con más capacidad antigénica que otras zonas en diferentes serovares de *Avibacterium paragallinarum* lo que posiciona a esta proteína con grandes posibilidades de ser incluida en las vacunas resaltando la importancia de un estudio profundo de las regiones variables para comprender mejor su función (Araya-Hidalgo et al., 2017).

Avibacterium paragallinarum y la producción de OMVs.

Las OMVs o vesículas de membrana externa, son nanopartículas formadas por lípidos con una forma esférica, pueden llegar a medir de 20 a 300 nm (Ramón Rocha et al., 2006). Una característica importante es la semejanza a la membrana de la cual derivan y dentro pueden contener diversos compuestos como: lípidos, proteínas, ADN, ARN, además de otros componentes bacterianos.

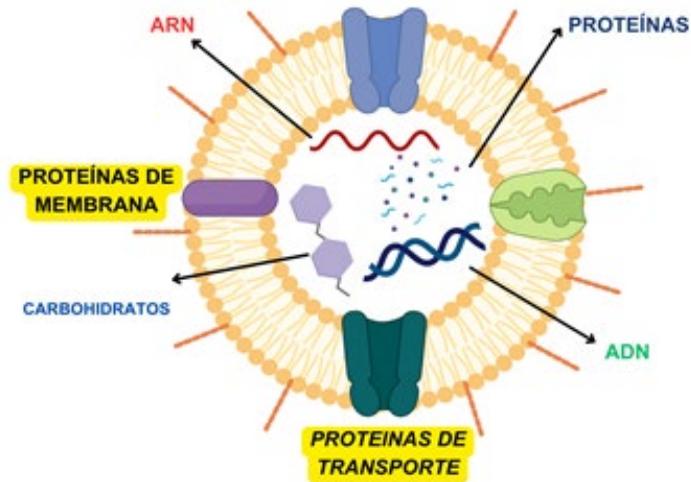


Figura 3. Estructura general de las vesículas de membrana externa.
Elaboración propia en BioRender.

Se ha comprobado que *Avibacterium paragallinarum* secreta vesículas de membrana externa donde se almacena ADN, enzimas, componentes estructurales y endotoxinas. Asimismo, el contenido proteico corresponde principalmente a endotoxinas y enzimas con funciones relacionadas al DNA, componentes estructurales como proteínas con función receptora e incluso proteínas con función desconocida (Mei et al., 2020).

Finalmente, la evaluación de las OMVs de *A. paragallinarum* como candidato vacunal obtuvo resultados interesantes al exponer a pollos sanos contra las OMVs de *Avibacterium paragallinarum* estos desarrollaron síntomas de la coriza infecciosa, incluso se comprobó que las OMVs provocan una respuesta inmune importante. Por tal motivo, las OMVs tienen gran potencial de utilidad para mediar la inmunidad gracias a las proteínas con capacidad antigénica de la superficie, lo que las postula para ser implementadas en la vacunación (Lieberman, 2022).

Además de *A. paragallinarum* existen otros microorganismos que habitan de manera normal en la microbiota de los pollos, pero que con ciertas condiciones específicas son capaces de causar infecciones, generando problemáticas muy importantes, un ejemplo es *Gallibacterium anatis*, de hecho, ambas bacterias pertenecen a la misma familia Pasteurellaceae y poseen una estrecha relación filogenética.

Gallibacterium anatis ¿Una bacteria oportunista?

Gallibacterium anatis es el agente causal de la infección llamada “Gallibacteriosis”, es una bacteria que pertenece a la familia bacteriana Pasteurellaceae y para muchos *G. anatis* es una bacteria oportunista, es decir, que solo en condiciones donde los pollos están inmunosuprimidos puede causar una infección. Sin embargo, en últimos años *G. anatis* se ha presentado con mayor prevalencia debido a su resistencia a los tratamientos disponibles y también tiene la capacidad de agravar una infección causada por otros microorganismos como *E. coli* o *Mycoplasma* (Driessche et al., 2020).

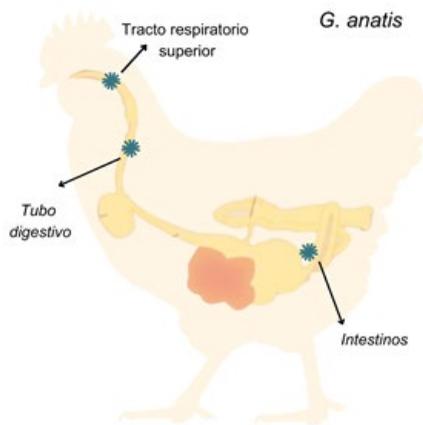


Figura 4. Localización de *G. anatis*. Elaboración propia.

En cuanto a la infección causada por *G. anatis* esta bacteria habita principalmente en el tracto respiratorio superior de aves principalmente pollos, sin embargo, se ha reportado su presencia en otras aves domésticas o silvestres como patos, palomas y también animales no aviares como conejos y vacunos. Aunque *G. anatis* no produce un cuadro clínico específico, es capaz de causar daños importantes como lograr una mala respuesta inmune del huésped para poder infectar, así como, lesiones del tracto respiratorio, inflamando el tubo digestivo e intestinos y el aparato reproductor (Abd El-Ghany et al., 2023).

Lo anterior resalta la importancia de que es más que una infección oportunista, así como el impacto económico generado por *G. anatis* que tiene relación directa con la disminución en la producción de huevos y aumento en las tasas de mortalidad de las gallinas (Driessche et al., 2020).

Generalidades de *Gallibacterium Anatis*

Gallibacterium anatis es una bacteria Gram negativa con morfología cocobacilar, encapsulada, capaz de causar hemólisis, así como aglutinación de glóbulos rojos. Dicha bacteria puede desarrollar colonias de 1 a 2 mm grisáceas, transparentes y circulares cuando se realiza el crecimiento en con alto contenido nutrimental y sangre al cabo de 24 horas a 37 °C, figura 5 (Persson y Bojesen, 2015).

G. anatis se puede dividir en dos principales biovars: *Gallibacterium anatis* no hemolítica y *Gallibacterium anatis haemolytica*, este último responsable de la infección en aves de corral, causada por la inflamación en el oviducto de las aves y el tubo digestivo generando como consecuencia reducción del rendimiento de las aves (Narasinakuppe Krishnegowda et al., 2020).

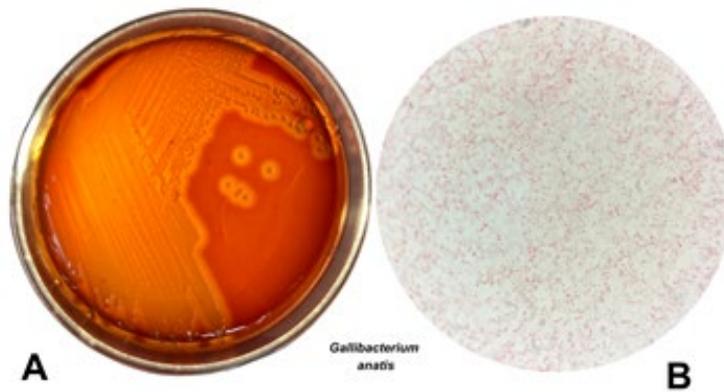


Figura 5. A) *Gallibacterium anatis* haemolytica en Agar gelosa sangre B) Tinción de Gram de *Gallibacterium anatis* haemolytica. Elaboración propia con ayuda de la Dra. María Elena Cobos Justo del Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Factores de virulencia de *Gallibacterium anatis*

Las toxinas RTX son descritas en miembros de la familia Pasteurellaceae y se abordaron previamente en este artículo. Hablando específicamente de *Gallibacterium anatis* haemolytica destaca su capacidad de hemólisis en placas de agar sangre, esto es gracias a la proteína llamada “GtxA” tiene como estructura 2038 aminoácidos con dos dominios responsables de sus funciones. Las funciones de esta proteína son dos, primeramente, causar la destrucción de eritrocitos y de igual forma se involucra en el ataque a células de defensa del huésped, específicamente los macrófagos aviares, que son las encargadas de eliminar agentes dañinos (Kristensen et al., 2010), (Tang et al., 2020).

Formación de biopelícula y fimbrias de *G. anatis*

Las biopelículas de microorganismos son comunidades de microorganismos que desarrollan su crecimiento pegados alrededor de una matriz extracelular producida por ellos mismos. La matriz extracelular se encuentra formada por exopolisacáridos o proteínas que le confieren la capacidad a las bacterias de adherirse a otras células o superficies. Con *Gallibacterium anatis* se ha observado su capacidad adhesiva a superficies y formación de biopelículas, lo cual destaca como una habilidad importante para la infección producida por este microorganismo (Sánchez-Alonso et al., 2023).

Para la formación de biopelícula se requiere la interacción de adhesinas con las células u órganos del huésped, *Gallibacterium anatis* posee estructuras similares a las fimbrias tipo F17 que son capaces de expresarse en microorganismos como *E. coli*. Específicamente en *G. anatis* estas estructuras permiten la unión a receptores en la superficie de células, principalmente relacionadas con mucosidad, por lo cual se estima que están directamente relacionadas con la unión a mucosas dentro del organismo del pollo (Persson y Bojesen, 2015).

Por otra parte, las fimbrias son parte de la estructura extracelular bacteriana, en otras palabras, son estructuras similares a los “pelos” que participan en la adherencia celular. *G. anatis* posee genes fimbriales que producen la proteína FliA una subunidad fimbrial que además de tener un efecto en la virulencia de esta bacteria, posee cualidades que podrían ser utilizadas en la inmunización (Bager et al., 2013).

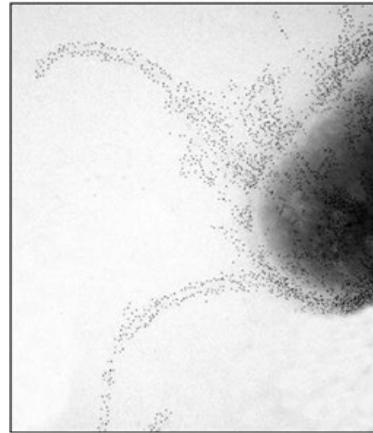


Figura 6. La fimbria FliA expuesta en *G. anatis* observada bajo microscopía electrónica, obtenida de (Persson y Bojesen, 2015).

Hemaglutinación, Metaloproteasas y Cápsula de *G. anatis*

Una habilidad característica de *G. anatis* su capacidad para aglutinar eritrocitos aviáres, esto relacionado con la producción de adhesinas. Las hemaglutininas son adhesinas que se unen a receptores en los eritrocitos de pollos, un ejemplo de lo anterior es una proteína aislada de *Gallibacterium anatis* capaz de aglutinar eritrocitos en otros animales, además de tener presencia en la formación de biopelícula por lo que podría tener un papel interesante entre la interacción de *G. anatis* y el organismo huésped durante la infección (Montes-García et al., 2016).

Por otro lado, las metaloproteasas son enzimas encargadas de realizar la hidrólisis de enlaces en las proteínas. Estas enzimas pueden realizar diversas funciones en bacterias como: participar en la colonización, adquisición de nutrientes y principalmente, la evasión de la respuesta inmune. De ahí que, *G. anatis* sea hábil para degradar las inmunoglobulinas de pollos, cuya función es proteger el organismo (García-Gómez et al., 2005).

Finalmente, la cápsula es una estructura superficial de las bacterias que la producen

y están compuestas por polisacáridos, forma parte de la estructura de bacterias Gram positivas y negativas. La cápsula de *Gallibacterium anatis* es un factor de virulencia interesante que participa en la adhesión celular e incluso la evasión del sistema inmune. Todavía existen algunas dudas respecto a la función específica de la cápsula de *Gallibacterium anatis* (Persson y Bojesen, 2015), pues en los cultivos primarios se observa la presencia de cápsula y en los subcultivos no es posible su visualización, lo cual despierta el interés para entender el comportamiento capsular de *G. anatis*, así como, estudiar la posibilidad de que la cápsula funcione como un componente antigénico como ocurre en las bacterias del género *Haemophilus*.

Conclusión

En definitiva, las infecciones causadas por *A. paragallinarum* y *G. anatis* afectan sectores muy importantes, su control podría hacerse por medio de la vacunación y así evitar otras problemáticas como la resistencia a antibióticos. No obstante, por la variabilidad de serovares que dificultan la prevención, es necesaria la constante actualización de antígenos vacunales. Lo anterior resalta la importancia de implementar nuevas alternativas para la prevención y el control, ya que las bacterias descritas en este artículo poseen características interesantes para utilizarse con los fines mencionados, destacando la importancia de realizar investigación cada vez más profunda enfocada al desarrollo de vacunas para el sector avícola para contribuir en el control de enfermedades en la crianza de los animales o en posibles zoonosis.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

El autor declara que no existe conflicto de intereses alguno.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos agradecimiento al CONAHCYT por la beca de estudios de posgrado, al PRODEP por el reconocimiento al CA-323, a la BUAP-VIEP por el apoyo al Cuerpo Académico CA-323 con proyecto 100103133-VIEP2023.

A la Dra. María Elena Cobos Justo por su apoyo para la elaboración de figuras.

REFERENCIAS

- Abd El-Ghany, W. A., Algammal, A. M., Hetta, H. F., & Elbestawy, A. R. (2023). Gallibacterium anatis infection in poultry: a comprehensive review. *Tropical Animal Health and Production*, 55(6), 383. <https://doi.org/10.1007/S11250-023-03796-W>
- Araya-Hidalgo, E., Gutiérrez-Jiménez, C., Chaves-Ramírez, M., Suárez-Esquivel, M., Guzmán-Verri, C., & Barquero-Calvo, E. (2017). Sequence analysis of the hypervariable region in hmp210 of Avibacterium paragallinarum. *The Journal of Veterinary Medical Science*, 79(7), 1210. <https://doi.org/10.1292/JVMS.16-0530>
- Bager, R. J., Nesta, B., Pors, S. E., Soriani, M., Serino, L., Boyce, J. D., Adler, B., & Bojesen, A. M. (2013). The Fimbrial Protein FlfA from Gallibacterium anatis Is a Virulence Factor and Vaccine Candidate. *Infection and Immunity*, 81(6), 1964. <https://doi.org/10.1128/IAI.00059-13>
- Blackall, P. J. (1999). Infectious Coryza: Overview of the Disease and New Diagnostic Options. *Clinical Microbiology Reviews*, 12(4), 627. <https://doi.org/10.1128/CMR.12.4.627>
- Blackall, P. J., Christensen, H., Beckenham, T., Blackall, L. L., & Bisgaard, M. (2005). Reclassification of Pasteurella gallinarum, [Haemophilus] paragallinarum, Pasteurella avium and Pasteurella volantium as Avibacterium gallinarum gen. nov., comb. nov., Avibacterium paragallinarum comb. nov., Avibacterium avium comb. nov. and Avibacterium volantium comb. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 55(1), 353–362. <https://doi.org/10.1099/IJS.0.63357-0/CITE/REFWORKS>
- Driessche, L. Van, Vanneste, K., Bogaerts, B., de Keersmaecker, S. C. J., Roosens, N. H., Haesebrouck, F., de Cremer, L., Deprez, P., Pardon, B., & Boyen, F. (2020). Isolation of Drug-Resistant Gallibacterium anatis from Calves with Unresponsive Bronchopneumonia, Belgium. *Emerging Infectious Diseases*, 26(4), 721. <https://doi.org/10.3201/EID2604.190962>
- El huevo mexicano, un alimento muy valioso | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx. (n.d.). Retrieved December 3, 2023, from <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-huevo-mexicano-un-alimento-muy-valioso>.
- Falconi-Agapito, F., Saravia, L. E., Flores-Pérez, A., & Fernández-Díaz, M. (2015). Naturally Occurring -Nicotinamide Adenine Dinucleotide-Independent Avibacterium paragallinarum Isolate in Peru. <https://doi.org/10.1637/10969-110314-CaseR>, 59(2), 341–343. <https://doi.org/10.1637/10969-110314-CASER>
- García-Gómez, E., Vaca, S., Pérez-Méndez, A., Ibarra-Caballero, J., Pérez-Márquez, V., Tenorio, V. R., & Negrete-Abascal, E. (2005). Gallibacterium anatis-secreted metalloproteases degrade chicken IgG. *Avian Pathology*, 34(5), 426–429. <https://doi.org/10.1080/03079450500267866>
- Guo, M., Liu, D., Chen, X., Wu, Y., & Zhang, X. (2022). Pathogenicity and innate response to Avibacterium paragallinarum in chickens. *Poultry Science*, 101(1), 101523. <https://doi.org/10.1016/J.PSJ.2021.101523>
- Jeong, O. M., Kang, M. S., Jeon, B. W., Choi, B. K., Kwon, Y. K., Yoon, S. Y., Blackall, P. J., Lee, H. S., Jung, S. C., & Kim, J. H. (2017). Isolation and characterization of Avibacterium paragallinarum with different nicotinamide adenine dinucleotide requirements. *Veterinary Microbiology*, 205, 62–65. <https://doi.org/10.1016/J.VETMIC.2017.05.005>
- Kristensen, B. M., Frees, D., & Bojesen, A. M. (2010). GtxA from Gallibacterium anatis, a cytolytic RTX-toxin with a novel domain organisation. *Veterinary Research*, 41(3), 25. <https://doi.org/10.1051/VETRES/2009073>

- Lieberman, L. A. (2022). Outer membrane vesicles: A bacterial-derived vaccination system. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1029146. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2022.1029146/BIBTEX>
- Liu, C. C., Ou, S. C., Tan, D. H., Hsieh, M. K., Shien, J. H., & Chang, P. C. (2016). The Fimbrial Protein is a Virulence Factor and Potential Vaccine Antigen of *Avibacterium paragallinarum*. <https://doi.org/10.1637/11410-031316-Reg.1>, 60(3), 649–655. <https://doi.org/10.1637/11410-031316-REG.1>
- Luna-Castrejón, L. P., Buter, R., Pantoja-Nuñez, G. I., Acuña-Yanes, M., Ceballos-Valenzuela, K., Talavera-Rojas, M., Salgado-Miranda, C., Heuvelink, A., De Wit, S., Soriano-Vargas, E., & Feberwee, A. (2020). Identification, HPG2 Sequence Analysis, and Antimicrobial Susceptibility of *Avibacterium paragallinarum* Isolates Obtained from Outbreaks of Infectious Coryza in Commercial Layers in Sonora State, Mexico. <https://doi.org/10.1637/Aviandiseases-D-20-00103>, 65(1), 95–101. <https://doi.org/10.1637/AVIANDISEASES-D-20-00103>
- Mei, C., Sun, A. H., Blackall, P. J., Xian, H., Li, S. F., Gong, Y. M., & Wang, H. J. (2020). Component Identification and Functional Analysis of Outer Membrane Vesicles Released by *Avibacterium paragallinarum*. *Frontiers in Microbiology*, 11, 518060. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2020.518060/BIBTEX>
- Montes-García, J. F., Vaca, S., Vazquez-Cruz, C., Soriano-Vargas, E., Aguilar-Romero, F., Blackall, P. J., & Negrete-Abascal, E. (2016). Identification of a Hemagglutinin from *Gallibacterium anatis*. *Current Microbiology*, 72(4), 450–456. <https://doi.org/10.1007/S00284-015-0969-5/FIGURES/5>
- Morales-Erasto, V., Fernández-Rosas, P., Negrete-Abascal, E., Salazar-García, F., Blackall, P. J., & Soriano-Vargas, E. (2013). Genotyping, Pathogenicity, and Immunogenicity of *Avibacterium paragallinarum* Serovar B-1 Isolates from the Americas. <https://doi.org/10.1637/10693-101513-ResNote.1>, 58(2), 293–296. <https://doi.org/10.1637/10693-101513-RESNOTE.1>
- Narasinakuppe Krishnegowda, D., Dhama, K., Kumar Mariappan, A., Munuswamy, P., Iqbal Yattoo, M., Tiwari, R., Karthik, K., Bhatt, P., & Reddy, M. R. (2020). Etiology, epidemiology, pathology, and advances in diagnosis, vaccine development, and treatment of *Gallibacterium anatis* infection in poultry: a review. *The Veterinary Quarterly*, 40(1), 16. <https://doi.org/10.1080/01652176.2020.1712495>
- Pan, Y. C., Tan, D. H., Shien, J. H., Liu, C. C., He, Y. S., Shen, P. C., & Chang, P. C. (2012). Identification and Characterization of an RTX Toxin-Like Gene and Its Operon from *Avibacterium paragallinarum*. <https://doi.org/10.1637/10047-122211-Reg.1>, 56(3), 537–544. <https://doi.org/10.1637/10047-122211-REG.1>
- Paudel, S., Hess, M., & Hess, C. (2016). Coinfection of *Avibacterium paragallinarum* and *Gallibacterium anatis* in Specific-Pathogen-Free Chickens Complicates Clinical Signs of Infectious Coryza, Which Can Be Prevented by Vaccination. <https://doi.org/10.1637/11481-081016-Reg>, 61(1), 55–63. <https://doi.org/10.1637/11481-081016-REG>
- Persson, G., & Bojesen, A. M. (2015). Bacterial determinants of importance in the virulence of *Gallibacterium anatis* in poultry. *Veterinary Research*, 46(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S13567-015-0206-Z/FIGURES/5>
- Ramón Rocha, M. O., García-González, O., Pérez-Méndez, A., Ibarra-Caballero, J., Pérez-Márquez, V. M., Vaca, S., & Negrete-Abascal, E. (2006). Membrane vesicles released by *Avibacterium paragallinarum* contain putative virulence factors. *FEMS Microbiology Letters*, 257(1), 63–68. <https://doi.org/10.1111/J.1574-6968.2006.00154.X>

- Sanchez-Alonso, P., Cobos-Justo, E., Avalos-Rangel, M. A., López-Reyes, L., Paniagua-Contreras, G. L., Vaca-Paniagua, F., Anastacio-Marcelino, E., López-Ochoa, A. J., Pérez Marquez, V. M., Negrete-Abascal, E., & Vázquez-Cruz, C. (2023). A Maverick-like cluster in the genome of a pathogenic, moderately virulent strain of *Gallibacterium anatis*, ESV200, a transient biofilm producer. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1084766. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2023.1084766/BIBTEX>
- Soriano-Vargas, E., Sánchez-Morales, J., Morales-Erasto, V., & García-Sánchez, A. (2013). Aislamiento e identificación de *Avibacterium paragallinarum* NAD independiente (serovariedad C-1) en gallinas de reemplazo con coriza infecciosa. *Veterinaria México*, 44(1), 57–62. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-50922013000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Tang, B., Pors, S. E., Kristensen, B. M., Skjerning, R. B. J., Olsen, R. H., & Bojesen, A. M. (2020). GtxA is a virulence factor that promotes a Th2-like response during *Gallibacterium anatis* infection in laying hens. *Veterinary Research*, 51(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/S13567-020-00764-2/FIGURES/7>
- Tu, T. Y., Hsieh, M. K., Tan, D. H., Ou, S. C., Shien, J. H., Yen, T. Y., & Chang, P. C. (2014). Loss of the Capsule Increases the Adherence Activity, but Decreases the Virulence of *Avibacterium paragallinarum*. <https://doi.org/10.1637/10937-091414-REG>, 59(1), 87–93. <https://doi.org/10.1637/10937-091414-REG>
- Wang, Y. P., Hsieh, M. K., Tan, D. H., Shien, J. H., Ou, S. C., Chen, C. F., & Chang, P. C. (2014). The haemagglutinin of *Avibacterium paragallinarum* is a trimeric autotransporter adhesin that confers haemagglutination, cell adherence and biofilm formation activities. *Veterinary Microbiology*, 174(3–4), 474–482. <https://doi.org/10.1016/J.VETMIC.2014.10.013>
- Wu, J. R., Chen, P. Y., Shien, J. H., Shyu, C. L., Shieh, H. K., Chang, F., & Chang, P. C. (2010). Analysis of the biosynthesis genes and chemical components of the capsule of *Avibacterium paragallinarum*. *Veterinary Microbiology*, 145(1–2), 90–99. <https://doi.org/10.1016/J.VETMIC.2010.03.002>
- Xu, Y., Cheng, J., Huang, X., Xu, M., Feng, J., Liu, C., & Zhang, G. (2019). Characterization of emergent *Avibacterium paragallinarum* strains and the protection conferred by infectious coryza vaccines against them in China. *Poultry Science*, 98(12), 6463–6471. <https://doi.org/10.3382/PS/PEZ531>

TRANSISTOR DE TUNELAMIENTO, EL FENÓMENO CUÁNTICO PRESENTE Y SU MEJORAMIENTO

TUNNELING TRANSISTOR: THE PRESENT
QUANTUM PHENOMENON AND ITS
ENHANCEMENT

*Mauricio Huixtlaca Quintana
José Joaquín Alvarado Pulido.

<http://orcid.org/0009-0009-9016-3316>
<http://orcid.org/0000-0001-7186-4429>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

Instituto de ciencias (ICUAP), Posgrado en dispositivos semiconductores, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Ecocampus Valsequillo, C.P. 72960 San Pedro Zacachimalpa. Puebla México.

mauricio.huixtlacaquí@alumno.buap.mx
joaquin.alvarado@correo.buap.mx

RESUMEN

¿Te has preguntado cómo funciona tu smartphone? Una pieza clave es el transistor de efecto túnel, basado en el fenómeno físico del mismo nombre. Este fenómeno permite que los electrones logren atravesar barreras de potencial, incluso si son más altas que la energía de los electrones. Para lograrlo en el transistor, se aplica una diferencia de potencial a la compuerta del transistor, logrando con esto que los electrones encuentren un camino estrecho el cual pueden saltar de un punto a otro como si se tratara de un túnel. La banda de conducción, donde se encuentran los electrones, se acerca a la banda de valencia, donde están los huecos. Cuando un electrón se acerca lo suficiente a un hueco, ocurre la recombinación, generando un átomo neutro y liberando energía, utilizable para generar corriente eléctrica. Este efecto túnel tiene diversas aplicaciones, como en los transistores de efecto túnel, que funcionan a altas velocidades y bajo consumo energético. También se utiliza en diodos túnel, capaces de generar oscilaciones de alta frecuencia. Este fenómeno, derivado de la mecánica cuántica, destaca, cómo los principios fundamentales pueden tener impacto en la tecnología cotidiana, mostrando que la física cuántica no es ajena a nuestro mundo pragmático. En resumen, el transistor de efecto túnel, aprovechando el fascinante efecto túnel cuántico, se posiciona como una tecnología clave en dispositivos electrónicos de alto rendimiento, subrayando la intersección entre la física teórica y la innovación tecnológica cotidiana.

Palabras clave: TFET, Subumbral, Heteroestructura

ABSTRACT

Have you ever wondered how your smartphone works? A key component is the tunneling transistor, based on the physical phenomenon of the same name. This phenomenon allows electrons to penetrate potential barriers, even if they are higher than the energy of the electrons. To achieve this in the transistor, a potential difference is applied to the transistor gate, causing the electrons to find a narrow path they can jump from one point to another as if it were a tunnel. The conduction band, where the electrons are located, approaches the valence band, where the holes are. When an electron gets close enough to a hole, recombination occurs, generating a neutral atom and releasing energy, which can be used to generate electric current. This tunneling effect has various applications, such as in tunnel effect transistors, which operate at high speeds and low energy consumption. It is also used in tunnel diodes, capable of generating high-frequency oscillations. This phenomenon, derived from quantum mechanics, highlights how fundamental principles can impact everyday technology, showing that quantum physics is not foreign to our pragmatic world. In summary, the tunneling transistor, harnessing the fascinating quantum tunneling effect, emerges as a key technology in high-performance electronic devices, underscoring the intersection between theoretical physics and everyday technological innovation.

Keywords: TFET, Subthreshold, Heterostructure.

INTRODUCCIÓN

Los transistores de efecto túnel (TFET Figura 1 (topología básica)) han aparecido como una alternativa a las tecnologías actuales debido a su velocidad de conmutación y a su ultra bajo consumo de energía, esto los convierte en la tecnología ideal para aplicaciones en cómputo y en electrónica portátil, gracias a su pendiente de la corriente de subumbral menor a 60 mV/década. En esta ocasión queremos mostrar el trabajo de diseño para la construcción de un transistor de efecto túnel mediante un simulador de dispositivos semiconductores usando nitruro de Galio (GaN) como material principal. Presentaremos las simulaciones de los resultados como un dispositivo funcional.

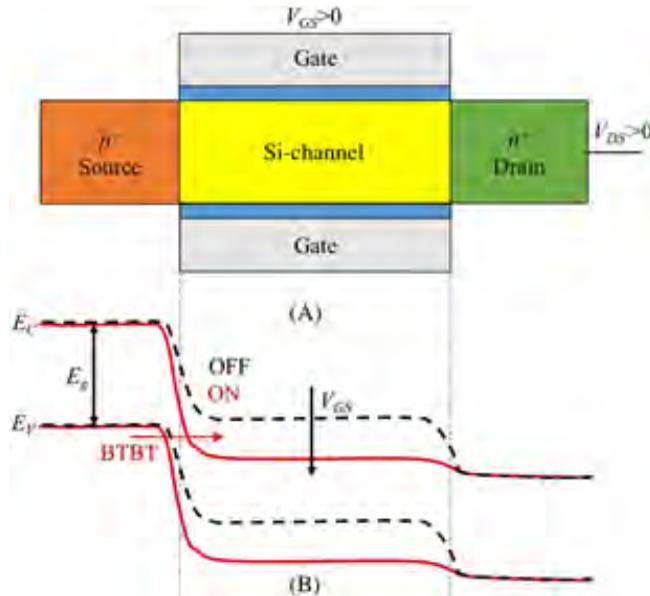


Figura 1 A) Esquema de la sección transversal de un nTFET (transistor de efecto túnel negativo). (B) Diagrama de bandas del nTFET a lo largo del canal en estados de encendido y apagado (Dubey, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813353-8.00002-6>, 2019).

La Figura 2 ilustra la evolución de diversas tecnologías y su tendencia hacia el año 2033, destacando cómo, la tecnología de los transistores TFET puede ser una alternativa futura gracias a sus características de velocidad de encendido y apagado (Balestra, 2017)

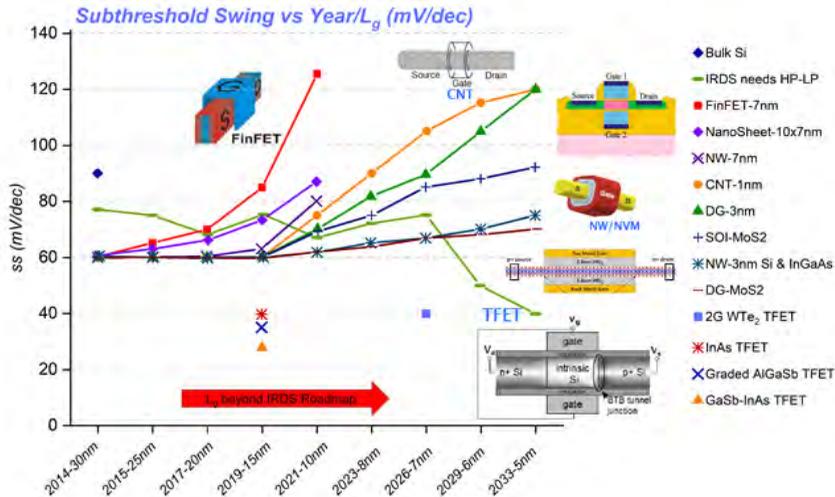


Figura 2 Ruta de las tecnologías actuales y la aparición de los transistores TFET para bajo consumo de energía (Balestra, 2017).

Comenzaremos con un repaso teórico para entender el efecto túnel y para entenderlo repasaremos algunos conceptos básicos de este fenómeno cuántico.

El diodo túnel se introdujo por primera vez en la década de 1950, siendo un avance significativo en la tecnología de semiconductores. En 1958, el físico japonés Leo Esaki descubrió el fenómeno del túnel cuántico y propuso la idea del diodo túnel, que posteriormente se conoció como el diodo Esaki. Este dispositivo, aprovechando el efecto túnel cuántico, ha encontrado aplicaciones en circuitos de alta frecuencia y comunicaciones (Esaki, 1958).

El diodo túnel, una variante de la unión PN, presenta características únicas debido a la alta concentración de portadores libres de ambas regiones P y N. En este dispositivo, el nivel de Fermi en el material tipo N se encuentra por encima del mínimo de la banda de conducción, mientras que, en el material tipo P, el nivel de Fermi está por debajo del máximo de la banda de valencia. La concentración de dopado en estas regiones es tan elevada que la región de carga espacial en la unión es extremadamente estrecha, generalmente midiendo menos de 10 nm. Para entender el fenómeno, podemos ver en la figura 2, como se da gráficamente el fenómeno de tunelamiento, para esto se deben cumplir lo siguiente.

1. La energía del electrón se debe conservar. En términos de un diagrama de bandas de energía, esta condición significa que un electrón cruce por tunelamiento de la región tipo N hacia la región tipo P en una trayectoria horizontal (figura 2A)
2. Debe haber estados ocupados del lado de la unión que emita electrones.

3. Deben existir estados vacíos permitidos del lado de la unión para recibir electrones debido a la condición (1), estos estados deben tener la misma energía que los estados en la condición (2) Figura 2B.

4. La altura de la barrera de potencial debe ser lo suficientemente baja y su ancho debe ser lo suficientemente delgado para que se produzca el tunelamiento.

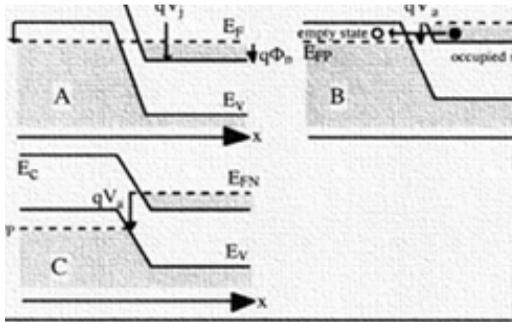


Figura 2 A: Sin potencial de polarización aplicado B: máxima corriente por tunelamiento C: corriente de tunelamiento atenuada (Colinge, 2005)

Teniendo en consideración las condiciones para lograr el tunelamiento, ahora podemos entender la figura 3 que corresponde a la curva de corriente característica de un diodo túnel.

A: Comencemos con un voltaje de polarización cero ($V_a = 0$). En este caso los niveles de Fermi se alinean, y como vemos en la Figura 3 A no hay estados disponibles del lado del material P y la corriente de tunelamiento es igual a cero.

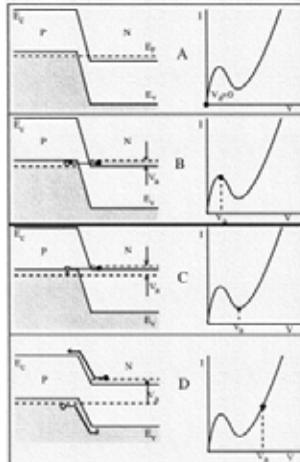


Figura 3 Curva de corriente del diodo túnel y sus bandas de conducción y valencia (Colinge, 2005)

B: Si una polarización directa, V_a , es aplicada, el nivel quasi-Fermi y las bandas de energía en la región tipo N, sube respecto a la región tipo P. Como resultado existen estados vacíos en el lado P de la banda de valencia, los cuales tienen la misma energía que los estados ocupados del lado N en la banda de conducción. Esta condición permite que se dé una corriente. Esta corriente incrementa cuando crece la polarización V_a , hasta un máximo alcanzado. La mayor corriente ocurre cuando el número de estados en la banda de conducción N tiene la misma energía que los estados vacíos en la banda de valencia, Figura 3 B.

C: Si el voltaje aplicado V_a , sigue incrementando, el número de estados de valencia vacíos disminuye, hasta que la corriente por tunelamiento se desvanece. Un valle en la Curva I-V es alcanzada cuando el tunelamiento cesa, Figura 3 C.

D: Como se observa en la figura 3 C, la corriente llega a un valor mínimo donde a la corriente por tunelamiento, se le suma la corriente por arrastre de una unión PN común, Figura (3 D), la cual aparece al superar el potencial de umbral del diodo.

Heteroestructura

Una heteroestructura es básicamente el arreglo de varias heterouniones de materiales con bandgaps distintos, lo cual se logra gracias a las técnicas de crecimiento epitaxiales, ya que, de esta forma se puede evitar los defectos que traigan consigo trampas energéticas en la interfaz de las heterouniones (Sze 2021).

Transistor Túnel Vertical.

En la estructura del transistor túnel de la Figura 4 encontrado en la literatura (Chaney, 2020), podemos ver las siguientes capas: 100nm de GaN tipo N(dopada con silicio) con una concentración de $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ correspondiente al drenador, 200 nm de GaN involuntariamente dopado, enseguida perteneciente al canal, después la región de In Ga_{1-x}N de 5 nm con una proporción x, entre 25% y 30%, que también forma parte del canal o compuerta, 100 nm de GaN tipo P (dopado con magnesio) con una concentración de $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ correspondiente a la fuente, seguida por una capa de 200nm de GaN tipo P con una concentración de $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, que también forma parte de la fuente, por último el sustrato de nitruro de galio, con galio polar n.

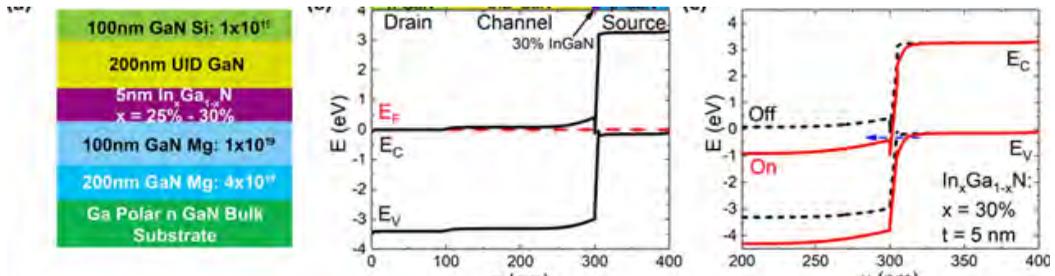


Figura 4 (a) Heteroestructura del transistor vertical TFET (b) Diagrama de bandas de dispositivo sin polarización (c) Dispositivo con y sin voltaje aplicado en compuerta (Chaney, 2020)

En el inciso (b) de la Figura 4, podemos ver el diagrama de bandas del transistor, de izquierda a derecha vemos las bandas de conducción y de valencia del drenador (zona verde), seguido por el canal con la región intrínseca (zona amarilla), que al ser involuntariamente dopada tipo N, sus bandas son muy parecidas a la región de drenador tipo N de la terminal de drenador, enseguida se observa un pico o pozo cuántico formado por el material ternario $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (zona violeta), y finalmente la fuente con el material tipo P (zona azul). En el inciso (c), se muestran las bandas sin polarización, con las líneas negras punteadas y con polarización con las líneas rojas, donde podemos observar que al polarizar y aplicar un potencial a la compuerta. Las bandas de conducción y de valencia se traslapan, entre la región del canal y la fuente, iniciando con el tunelamiento cuántico, el cual es mejorado por el valle o pozo, proporcionado por la heteroestructura.

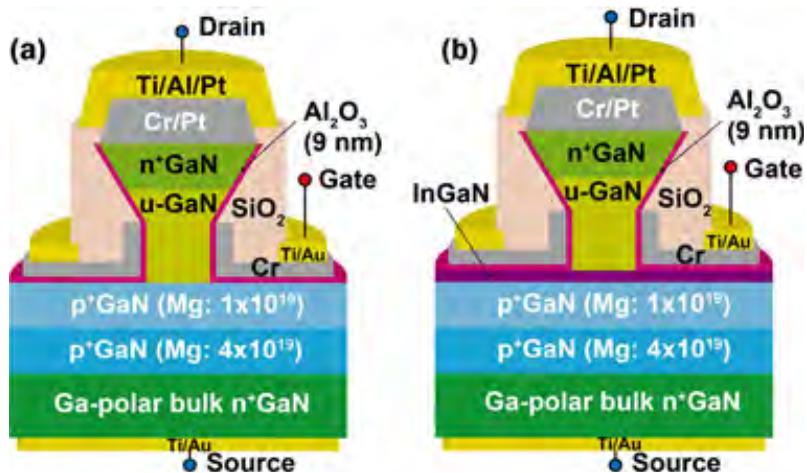


Figura 5 Incisos, (a) topología de construcción de un diodo túnel, (b) transistor túnel

En la Figura 5 vemos 2 topologías con la diferencia en que en la figura del inciso (b) podemos ver la región violeta correspondiente al material ternario InGaN entre la región intrínseca u-GaN y la fuente, lo que le da al dispositivo la característica de promover el tunelamiento, estas imágenes presentan un corte transversal y una disposición más descriptiva que muestra la forma final de construcción de un transistor vertical túnel FET.

Las aleaciones ternarias de los grupos III-V (de la zona violeta), están conformados por los elementos In, Ga, Al, del grupo III y N, P, As, Sb, del grupo V. Para conocer a estos semiconductores se debe estudiar su estructura de bandas (Doria, 2021), estos materiales se caracterizan por sus aplicaciones en dispositivos ópticos los cuales pueden operar longitudes de onda en el rango visible debido al bandgap de energía con la que cuenta, tal y como se puede ver en la figura 6. Estos materiales son fabricados en sustratos de zafiro entre otros (Yam, 2011)

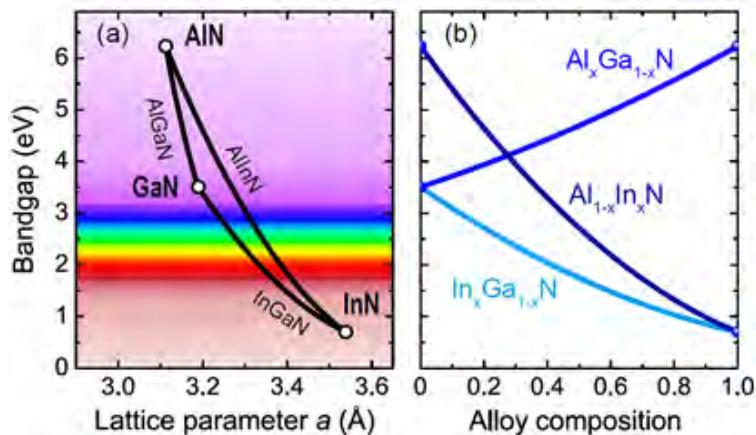


Figura 6 (a) Diagrama de la energía de la banda prohibida respecto al parámetro de red a (Å) (b) Energía de bandgap en función de la composición de nitruros de aluminio, galio e indio de las aleaciones ternarias (Malinberni 2015).

Como se pudo notar, en el valle formado (figura 4 (c)), debido al material ternario InGaN, este ayudaba en el tunelamiento de electrones y por ende en el aumento de la corriente.

Simulaciones

Se realizaron una serie de simulaciones de la estructura (figura 7A-1) para encontrar el valor de x que proporciona la mayor corriente para nuestro transistor, encontrando que el valor que mejoraba la corriente, era con un x del 30% de indio y un 70% de nitruro de galio (Figura 7 A-2). Lo que se hace al modificar la aleación es modificar el bandgap, del material produciendo que el valle de la región del material ternario quede por debajo del mínimo de la banda de conducción del material que pertenece a la fuente.

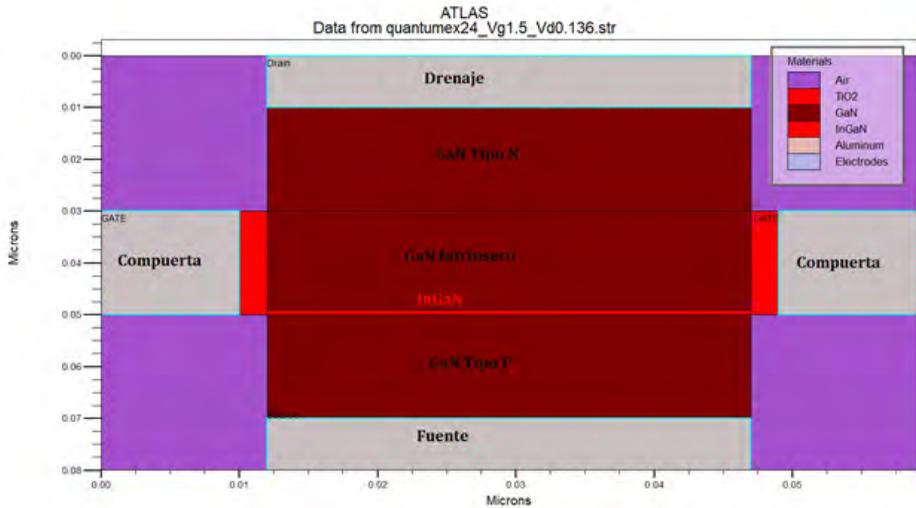


Figura 7 A-1 Estructura del transistor TFET con el material ternario InGaN color naranja.

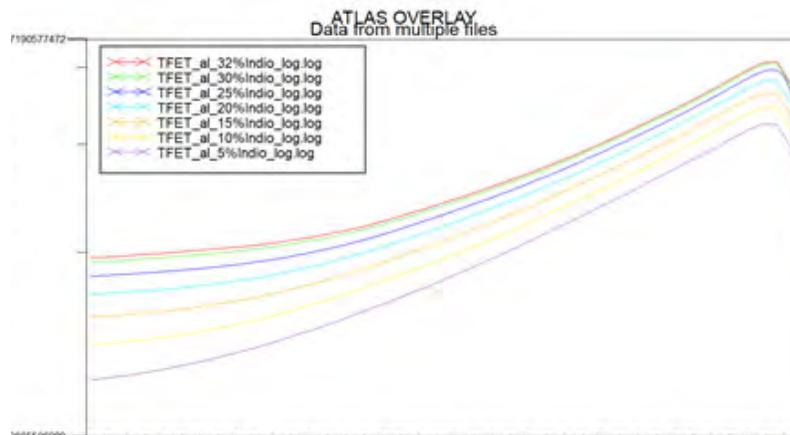


Figura 7 A-2 Respuesta de corriente en función de la concentración de indio en el $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

como podemos ver en el diagrama de bandas de la figura 8, se observa de izquierda a derecha los materiales GaN tipo P (zona roja), región de material GaN intrínseco (zona verde) y material GaN tipo N (zona violeta). Las líneas roja y verde corresponden a las bandas de conducción y de valencia respectivamente. Este doblamiento de bandas es sin polarización, sin embargo, podemos ver que se necesitará algo que mejore el acercamiento de las bandas para que se traslapen en la región entre la región intrínseca y la región de la fuente (GaN N) como más adelante veremos con el material ternario.

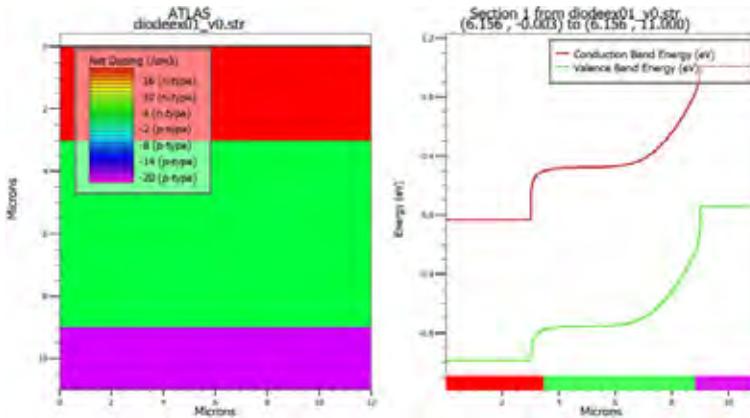


Figura 8 Estructura de un diodo PIN y su diagrama de bandas

En la Figura 2 se muestra la estructura final del transistor TFET que ofrece los mejores resultados de simulación. En la parte izquierda de la figura, podemos ver etiquetados los materiales de las diferentes regiones, y a la derecha vemos el diagrama de bandas de conducción y de valencia con la curva característica de la heterounión InGaN-GaN. Es importante hacer notar que es posible visualizar cómo las bandas de conducción y de valencia se traslapan a diferencia de la Figura 8.

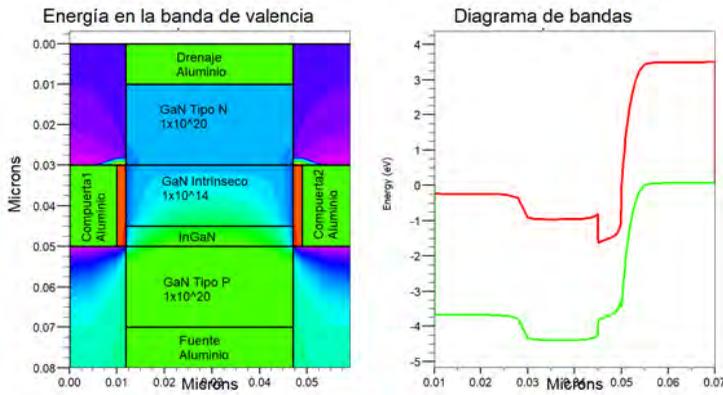


Figura 9 Estructura Final y diagrama de bandas del transistor TFET

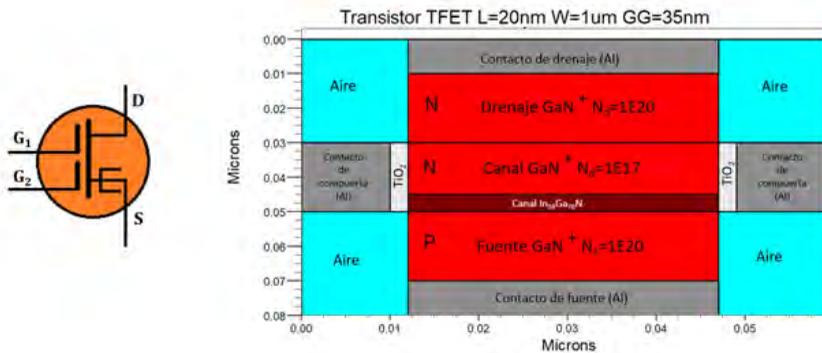


Figura 11 Símbolo y topología del transistor TFET final

Curva transferencial con SiO2

Para obtener las curvas transferenciales en general o como en este caso para un dieléctrico en específico, se realizó un barrido de voltaje a la compuerta del transistor, mientras se mantenía un voltaje constante entre el drenador y la fuente, como se muestra en la figura 11

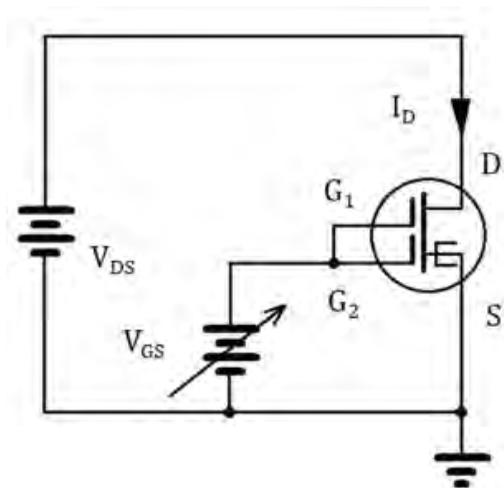


Figura 12 Diagrama del circuito de polarización para obtener las curvas transferenciales

A partir de la curva lineal $I_{DS} - V_{GS}$ (figura 12), se puede obtener más información, por ejemplo, la razón de cambio instantánea de la corriente respecto al voltaje nos da la transconductancia g_m , y a su vez la derivada de la transconductancia en su punto más alto, nos señala el voltaje de encendido el cual corresponde con el valor de voltaje de la coordenada x de dicho punto.

Después de estudiar los diferentes dieléctricos de compuerta como alúmina, óxido de silicio y óxido de titanio, decidimos realizar la futura fabricación con TiO_2 mostrando los resultados de la corriente transferencial en la figura 12, Con la reducción de la longitud de compuerta, el efecto de canal corto DIBL (Drain Induced Barrier Lowering) se hace obvio, lo cual produce la modulación de la barrera de potencial, debido no solo al voltaje en la compuerta si no por el voltaje de drenador.

Por esta razón, se realizaron simulaciones con distintas longitudes de canal, comenzando con una longitud de 20 nm. Como sabemos, el canal del transistor túnel está formado por 2 regiones, una con GaN de 15 nm y una región de $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ de 5 nm, esta última permanecerá constante debido a que es la longitud suficiente para su propósito como vimos anteriormente y entre las 2 regiones suman 20 nm., la corriente de swing de subumbral, es la pendiente de la región lineal existente entre la corriente de encendido y apagado del transistor.

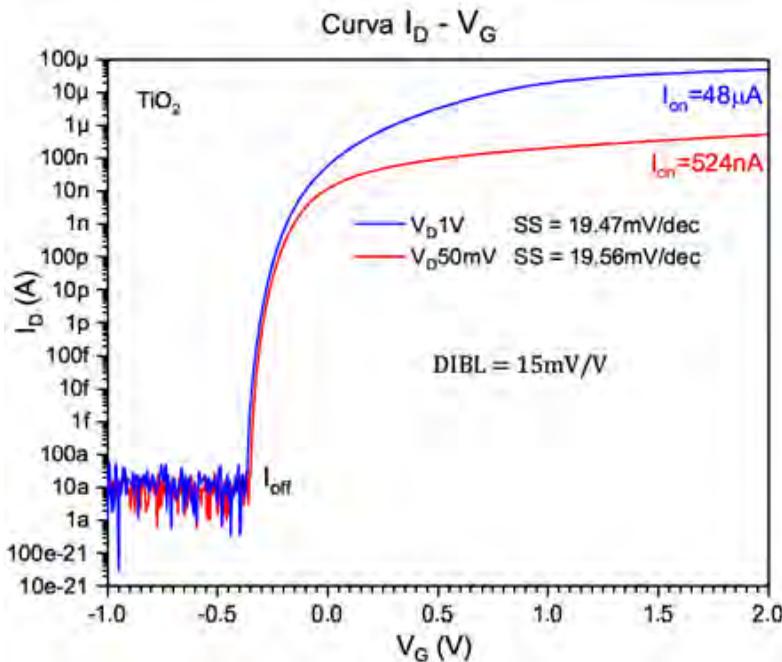


Figura 13 Curvas de corriente transferencial $I_D - V_G$, con V_D a 50mV y 1V, obteniendo corrientes de encendido y apagado I_{on} I_{off} , efecto DIBL y el swing de subumbral para un dieléctrico de compuerta de TiO_2 .

A partir de las curvas de corriente de salida podemos obtener más información. De la región de saturación podemos obtener la resistencia de salida, calculando la inversa de la pendiente, si prolongamos estas pendientes de cada curva de la región de saturación, vemos (figura 13) como tienden a converger en un punto, el cual es llamado Voltaje *Early*.

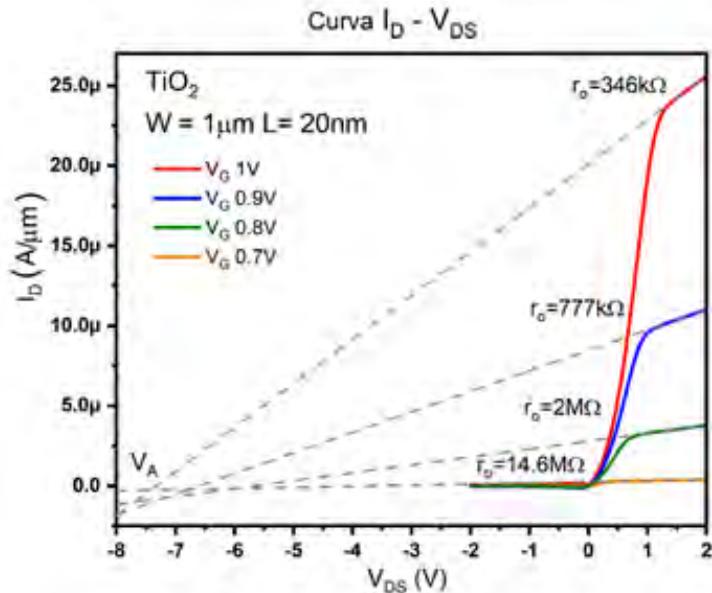


Figura 14 Curvas de corriente de salida I_{DS} - V_{DS} para varios voltajes V_G , obteniendo la resistencia de salida en saturación r_o y voltaje Early V_A para TiO_2 .

Conclusiones

En la búsqueda de mejorar la corriente de drenador en dispositivos electrónicos, se han llevado a cabo estudios exhaustivos centrados en el uso de GaN como material clave. Los resultados obtenidos revelan hallazgos significativos que tienen implicaciones importantes para la eficiencia y rendimiento de estos dispositivos.

La elección estratégica de los nitruros $InXGa_{1-X}N$ y $AlXGa_{1-X}N$ ha demostrado ser crucial para mejorar la colección de corriente mediante el tunelamiento de banda a banda. Después de exhaustivos barridos de concentración (X), se identificaron las combinaciones óptimas: $In_{0.3}Ga_{0.7}N$ y $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$. La modulación del ancho de la región de $InXGa_{1-X}N$, con un rango mínimo de 1 nm hasta un ancho suficiente de 5 nm, resultó ser determinante para alcanzar la máxima corriente.

El desafío de la corriente de encendido, que requería voltajes altos en compuerta, se abordó mediante la incorporación de dieléctricos de alta k. Tras considerar SiO_2 , Al_2O_3 y TiO_2 , se eligió TiO_2 como el aislante de compuerta más eficaz. La optimización de las dimensiones del dispositivo, inicialmente a $12\ \mu m$ y luego reducido a $35\ nm$ para agilizar los análisis, permitió verificar su funcionalidad sin comprometer su rendimiento.

El análisis detallado del dispositivo proporcionó una variedad de parámetros cruciales, incluyendo el Swing de subumbral (SS), DIBL, rout,

ron, transconductancia (g_m) y voltaje de encendido (V_{th}). Además, la variación de la longitud del canal compuesto por los materiales GaN/InGaN, desde 20 nm hasta 200 nm, arrojó valiosa información sobre cómo la longitud del canal afecta el DIBL y, por ende, el voltaje de encendido.

En resumen, estos hallazgos no solo contribuyen a mejorar la eficiencia de dispositivos basados en GaN, sino que también proporcionan información significativa para el diseño futuro de tecnologías electrónicas avanzadas. Este trabajo representa un paso relevante hacia la optimización de materiales y procesos en la búsqueda continua de dispositivos más eficientes y sostenibles.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo del Centro de Investigación BUAP-CA-96-Aplicaciones Tecnológicas de Semiconductores perteneciente al ICUAP, de la Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). M. Huixtlaca, estudiante de doctorado del “Programa de Doctorado en Dispositivos Semiconductores”, agradece al CONACYT la beca #409584 para el desarrollo de su proyecto de investigación, incluyendo la publicación de este artículo.

REFERENCIAS

- Balestra, F. (2017, September). NanoCMOS and Tunnel FETs for the end of the Roadmap. In Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy (Symposium and Summer School). https://nanoandgiga.com/ngc2017/documents/presentation_balestra.pdf
- Dubey, P. K. (2019). tunnel FET: Devices and circuits. In *Nanoelectronics* (pp. 3-25). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813353-8.00002-6>
- Esaki, L. (1958). New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions. *Physical Review*, 109(2), 603-604. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.109.603>
- Colinge, J. P., & Colinge, C. A. (2005). *Physics of Semiconductor Devices*. Springer Science & Business Media.
- A. Chaney, H. Turski, K. Nomoto, Z. Hu, J. Encomendero, S. Rouvimov, T. Orlova, P. Fay, A. Seabaugh, H. G. Xing, et al., "Gallium nitride tunneling field-effect transistors exploiting polarization fields," *Applied Physics Letters*, vol. 116, no. 7, p. 073502, 2020. <https://doi.org/10.1063/1.5132329>
- Doria Andrade, J. (2021). Estudio experimental de aleaciones ternarias semimagnéticas de (III-V) (Mn, Cr). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79705>
- Yam, F. K., Low, L. L., Oh, S. A., & Hassan, Z. (2011). Gallium nitride: an overview of structural defects. *Optoelectronics-Materials and Techniques*, 4, 99-136. DOI: 10.5772/19878
- Malinverni, M. (2015). Optimization of NH -MBE grown p-doped (Al) GaN layers and their implementation in long wavelength laser diodes and tunnel junctions (No. THESIS). EPFL. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-6747>
- Sze, S. M., Li, Y., & Ng, K. K. (2021). *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & sons.

CELDA SOLARES AVANZADAS: EL PAPEL CRUCIAL DE LAS TECNOLOGÍAS TÁNDEM.

ADVANCED SOLAR CELLS: THE CRUCIAL ROLE OF TANDEM TECHNOLOGIES

Dylan Tepatzi Xahuentitla (1*)
José Joaquín Alvarado Pulido(1)
Evelin Díaz Cruz(2)

<http://orcid.org/0000-0001-5336-1457>
<http://orcid.org/0000-0001-7186-4429>
<http://orcid.org/0000-0002-3219-129X>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP EP11-2024
FECHA DE RECEPCIÓN: 20. DICIEMBRE.2023
FECHA DE APROBACIÓN: 26. FEBRERO.2024
FECHA DE PUBLICACIÓN: 7 MARZO.2024

(1) Instituto de Ciencias (ICUAP), Posgrado en dispositivos semiconductores, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, ecocampus Valsequillo, C.P.72960. San Pedro Zacachimalpa, Puebla México.

(2) Instituto de Física “Luis Rivera Terrazas” Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ecocampus Valsequillo, C.P.72960. San Pedro Zacachimalpa, Puebla México.

dylan.tepatzix@alumno.buap.mx
joaquin.alvarado@correo.buap.mx
ediaz@ifuap.buap.mx

RESUMEN

Este artículo explora celdas solares avanzadas de nueva generación, con un enfoque destacado en las tecnologías tándem. Se presenta una investigación que abarca desde conceptos básicos hasta la actualidad y posibles materiales utilizados en estas innovadoras celdas solares. Las tecnologías tándem se destacan por su capacidad para mejorar la eficiencia en la conversión de energía solar mediante el uso de múltiples materiales teniendo diferentes sub-celdas que aportan al funcionamiento total. Se resaltan sus ventajas, como la alta eficiencia y el diseño centrado en el aumento de la absorción y eficiencia solar. A pesar de los avances, se mencionan desafíos asociados con su complejidad y costos. En última instancia, el artículo concluye enfatizando la importancia de abordar estos desafíos para lograr una adopción masiva de las celdas tándem, destacando su papel clave en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

Palabras clave: Celda tándem, Unión PN, Eficiencia, sub-celdas, absorción, celdas solares y Efecto fotovoltaico.

ABSTRACT

This article explores next-generation advanced solar cells, with a prominent focus on tandem technologies. It presents research ranging from basic concepts to current developments and potential materials used in these innovative solar cells. Tandem technologies stand out for their ability to enhance efficiency in solar energy conversion by using multiple materials, with different sub-cells contributing to overall functionality. Their advantages, such as high efficiency and design focused on increased absorption and solar efficiency, are highlighted. Despite advancements, challenges associated with their complexity and costs are mentioned. Ultimately, the article concludes by emphasizing the importance of addressing these challenges to achieve widespread adoption of tandem cells, underscoring their key role in transitioning towards more sustainable energy sources.

Keywords: Tandem cell, PN junction, Efficiency, sub-cells, absorption, solar cells, and Photovoltaic effect.

INTRODUCCIÓN

El suministro energético se ha consolidado como una necesidad esencial desde la aparición de las primeras máquinas eléctricas funcionales. Esto ha sido un impulsor clave del desarrollo tecnológico en una sociedad cada vez más dependiente de aparatos eléctricos como: Refrigeradores, Computadoras, Televisores, Teléfonos Celulares e Internet, entre otros. La importancia de generar grandes cantidades de energía a costos bajos y de manera no contaminante, se ha convertido en una tendencia dominante. Un hecho es que la Tierra recibe 173×10^{10} kWh de energía solar cada hora, lo equivalente a 12,000 veces la energía requerida para el consumo humano a nivel mundial evidenciando lo prometedora de esta fuente energética. No obstante, existen pérdidas energéticas durante la transmisión de la energía solar hacia la superficie terrestre. A pesar de ello, la potencia solar

constante alcanza los 0.1353 W/cm^2 (Richard 1995), lo que ha impulsado un crecimiento significativo en la adopción de celdas solares como tecnología tanto presente como futura. Estas celdas solares representan una solución fundamental para aprovechar de manera eficiente y sostenible la abundante fuente de energía solar disponible. Citando (Richard 1995), las celdas solares “no solo se caracterizan por ser respetuosas con el medio ambiente, sino que también ofrecen fuentes de energía eléctrica limpias, eficientes, confiables e ininterrumpidas”. Esta característica las posiciona como una alternativa sólida capaz de reemplazar a las fuentes de energía contaminantes, tales como la energía nuclear, el gas natural, el carbón y el petróleo. Este cambio hacia fuentes de energía más sostenibles refleja la creciente conciencia sobre la importancia de preservar el medio ambiente y buscar soluciones energéticas más responsables. Después de lo que se ha expuesto, hay una pregunta importante que aún no hemos respondido: ¿Qué es exactamente una celda solar? Bueno, las celdas solares son dispositivos electrónicos que convierten la luz del sol en electricidad. Funcionan gracias a algo llamado Efecto Fotovoltaico. Este proceso ocurre cuando la luz incide sobre un semiconductor y los fotones (partículas de luz) rompen enlaces de valencia de la estructura del material para liberar electrones, permitiéndoles moverse. Lo que hace un dispositivo fotovoltaico es aprovechar estos electrones libres para direccionarlos hacia los contactos metálicos y así fomentar un flujo de electrones a través del dispositivo, de manera que, siempre que esté iluminado el material este generará electricidad (Fonash 2020).

Propiedades de los materiales.

Ahora no todos los materiales responden de la misma forma al ser irradiados ¿Por qué? Para responder a ello, se tiene que conocer la naturaleza de la luz, lo que se conoce como dualidad onda-partícula, que es fundamental en la teoría cuántica. Este concepto nos dice que la luz, se comporta tanto como partícula como onda, de manera que los fotones son cuantos de energía electromagnética. Un aspecto importante es que estos fotones llevan considerada una cantidad discreta de energía que es proporcional a su frecuencia, teniendo así, que el espectro solar consta de un rango que va desde el ultravioleta (250 nm), rango del visible entre 350 nm a 730 nm hasta el infrarrojo (2500 nm). Como se observa en la Figura 1, la mayor intensidad (correspondiente a la mayor potencia solar), se encuentra en el rango del visible, por lo que podemos inferir que un material que es excitado por dicha longitud de onda tendrá mayor entrada de energía proveniente del sol y, por lo tanto, aprovechará mejor la luz solar.

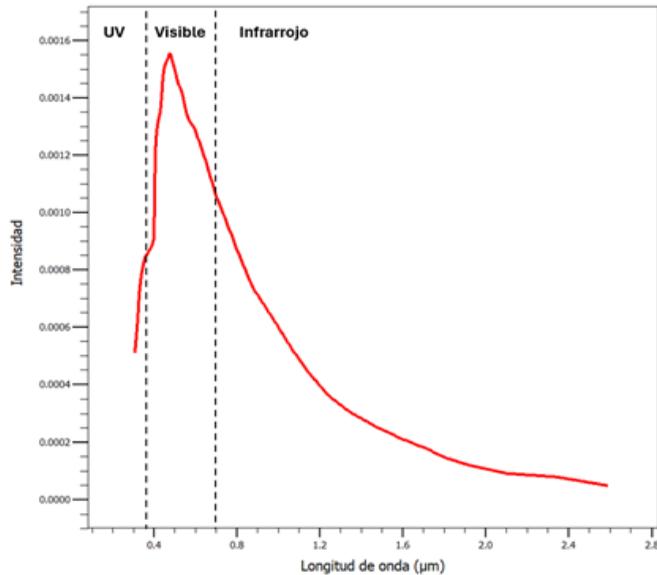


Figura 1. Espectro solar AM1.5

Los materiales que son óptimos para aplicaciones ópticas se pueden explicar a través de la teoría de los materiales semiconductores. Cada material semiconductor tiene una propiedad muy importante que es el ancho de banda. Esto es la energía necesaria para romper un enlace covalente de la estructura cristalina del material, y como la energía se relaciona con la longitud de onda por la ley de Broglie, ecuación 1:

$$E=hc/\lambda$$

Así que la energía de un fotón (partícula de luz) está relacionada con su longitud de onda λ , la constante de Planck h y la velocidad de la luz C . De esta forma, si se observa la figura 2, cada material semiconductor tiene un rango específico del espectro solar en el cual absorbe y si este está en el máximo de irradiancia, entonces en teoría sería más eficiente la CS, ya que tiene una mayor potencia disponible. Por lo que los mejores materiales estarán en 2.5 eV en energía o 430 nm en longitud de onda, sin embargo, no todos los semiconductores responden bien al irradiarse, a pesar de responder en el rango del visible, sino también influye si el semiconductor tiene propiedades ópticas. Esto es intrínseco de cada semiconductor. De acuerdo con la teoría de bandas se tiene:

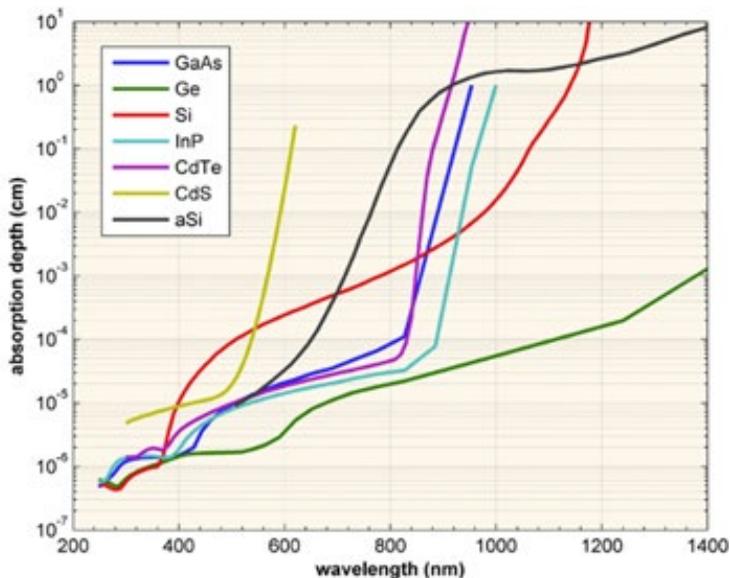


Figura 2. Representación de la estructura de una bacteria.
Elaboración propia en BioRender.com

Ancho de Banda Directo.

- En un material con un “Ancho de banda directo”, el nivel de energía del estado excitado (electrón en un nivel energético superior) es casi igual al nivel de energía del estado fundamental (electrón en el nivel más bajo). Esto significa que la transición electrónica que ocurre durante la absorción o emisión de luz implica un cambio directo en la energía sin necesidad de cambios en el momento de la red cristalina.

- Estos materiales tienden a tener una mayor eficiencia en la emisión y absorción de luz, lo que los hace útiles en aplicaciones fotónicas, como los diodos emisores de luz (LED) y láseres.

Ancho de Banda Indirecto:

- En un material con un “Ancho de banda indirecto”, la transición electrónica implica un cambio tanto en la energía como en el momento (momento) de la red cristalina. Esto significa que, para que ocurra la transición electrónica, es necesario un cambio adicional en el momento del electrón. Este tipo de transición suele requerir la participación de un tercer cuerpo (como un fonón) para conservar la cantidad de movimiento.

- Los materiales con ancho de banda indirecto tienden a ser menos eficientes en la emisión y absorción de luz en comparación con los materiales de ancho de banda directo.

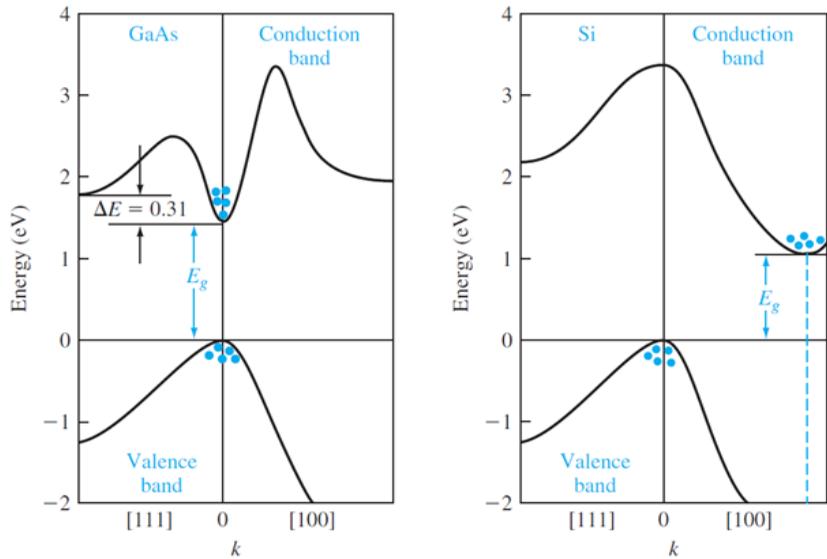


Figura 3. Diagrama de bandas a) Ancho de banda directo GaAs b) Ancho de banda indirecto Si (Neamen, 2012).

De manera que los materiales con mejores propiedades ópticas serán los que el momento es igual a cero y el máximo de la banda valencia coincide con el mínimo de la banda de conducción, simplemente una doble interacción durante el rompimiento del enlace covalente.

Una vez que contamos con materiales que exhiben propiedades ópticas favorables, el diseño preciso del dispositivo adquiere una importancia fundamental. En presencia de electrones libres, es esencial dirigir su movimiento, lo que subraya la relevancia del estudio de la física de los dispositivos semiconductores. Por ejemplo, en una celda solar convencional, se emplea una unión PN, lograda mediante la unión del dopado de dos semiconductores con elementos que aportan carga negativa por medio de electrones libres (tipo N) y otro que aporta carga positiva por medio de huecos libres (tipo P). Cuando estos semiconductores están en equilibrio, se forma una zona de deplexión. Las cargas negativas y positivas originadas por la difusión de los electrones y huecos originan un campo eléctrico interno que canaliza de manera precisa los portadores de carga hacia los contactos correspondientes. La estructura interna de las celdas solares PN, son formadas por 3 zonas importantes el emisor, la unión y la base (McEvoy et al., 2012), en la unión ocurre este proceso de discriminación de las cargas. Este proceso es esencial para el funcionamiento eficiente de la celda solar.

Funcionamiento de una celda solar

El proceso de convertir la energía solar en electricidad, se desarrolla a través de tres etapas clave, como se detalla en (Fonash 2020): Absorción, Conversión y Transporte. De manera simple, la celda solar utiliza un material específico que atrapa la luz solar en un rango particular del espectro solar. Luego, este material libera algunos electrones y los guía con la asistencia de un campo eléctrico interno formado por la unión de 2 semiconductores tipo P y tipo N (detalle visible en la figura 4). Este asombroso proceso culmina en la generación de una corriente eléctrica, y la cantidad de corriente producida está directamente vinculada a la intensidad de la luz solar que incide.

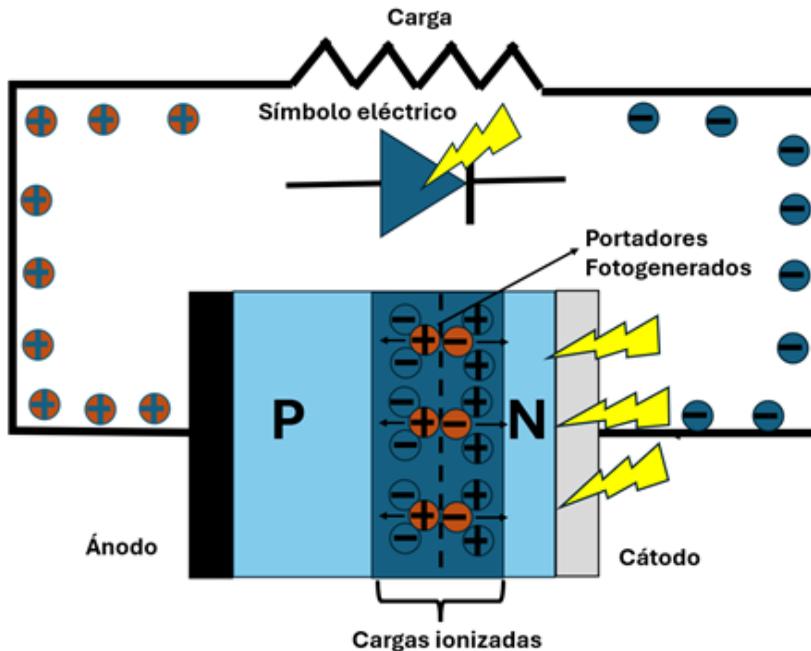


Figura 4. Representación gráfica de una celda solar y su composición interna. Elaboración propia.

Claves para la Excelencia en la Fabricación de Celdas Solares.

En el fascinante mundo de la fabricación de celdas solares, intervienen diversos elementos clave.

a) **Materiales Semiconductores:** La elección de materiales es fundamental.

Entre los semiconductores destacan el Silicio, Germanio, GaAs, GaN, Perovskitas y materiales orgánicos(Thomas Dittrich, (2014)).

b)Proceso de Fabricación: Aquí, nos sumergimos en los métodos para dar forma a los materiales semiconductores, utilizando procesos químicos, térmicos y físicos (Kern & Schuegraf, 2001). La precisión en estas etapas es crucial para garantizar la calidad y eficiencia.

c)Diseño: La configuración de la celda solar implica numerosos aspectos detallados. Estos abarcan el grosor de los materiales, el tipo de contacto utilizado, las capas absorbentes de luz, las capas ventanas transparentes, el tipo específico de celda solar, la disposición precisa de los materiales, la concentración de elementos clave y la implementación de superficies que optimicen la absorción de luz.

Estos elementos combinados contribuyen al desarrollo eficiente y efectivo de celdas solares, desempeñando un papel esencial en la obtención de energía a partir de fuentes sostenibles como la luz solar. Lo primordial al tomar en cuenta todos estos puntos es aumentar la eficiencia energética, lo que se traduce en ¿cuánta energía solar es aprovechada y convertida en energía eléctrica?

Progreso de las celdas solares

En la revista “Progress of photovoltaics”, se especifican cada año la eficiencia lograda y qué tecnología se utilizó para obtener dicho dispositivo. Desde el año de 1993 hasta el año 2023, en cuanto a la eficiencia, como se dice en (Green et al., 2023).

Como se especificó, las CS (celdas solares) que usan múltiples materiales III-V han alcanzado la mejor eficiencia por sus propiedades optoelectrónicas excelentes (gran absorción), además se muestra que ha habido un crecimiento en el interés de mejoramiento de las celdas solares convencionales y de nueva generación. Sin embargo, las celdas de silicio acaparan la mayor cuota de mercado por encima del 90% por su facilidad de fabricar , ya que son compatibles a la tecnología de chips CMOS (del inglés, Complementary Metal-Oxide-SEMICONDUCTOR) y a adaptación a la disponibilidad del material. Es por ello, que se han desarrollado las Celdas solares tipo tándem que como se menciona el autor (Wilson et al., 2020) “Ofrecen un margen mayor para alcanzar una eficiencia significativamente mayor”, además de que se pueden utilizar materiales económicos como el silicio o perovskita como tecnología base, para reducir los costos y que compitan con las celdas comerciales.

Celdas solares tipo tándem.

Las celdas tipo tándem surgen de la necesidad de mejorar significativamente la eficiencia fotovoltaica, reduciendo costos, pero ¿en qué consisten estos componentes revolucionarios? Las celdas tándem, son como las orquestas de la energía solar, donde cada “instrumento” o sub-celda trabaja en armonía para crear una sinfonía (ver figura 6). En esta ilustración, se muestra un ejemplo de lo que son las celdas tándem y cómo se verían transversalmente, cada color representa un material distinto que ayude al aporte de energía de la eléctrica, además podrás notar que cada sub-celda contribuye al funcionamiento general. Existen tres fascinantes diseños, los de 2, 3 y 4 terminales. Imagina que las celdas solares de dos terminales son como construir un sándwich, apilando capas una sobre otra. Por otro lado, las de 3 y 4 terminales son como una banda musical más versátil, donde cada miembro puede tocar su propia melodía sin afectar a los demás (figura 6). Esto permite fabricar cada sub-celda con diferentes procesos y materiales. Por ejemplo, podríamos combinar la experiencia de fabricación y lo barato del silicio con la excelente eficiencia de los materiales III-V.

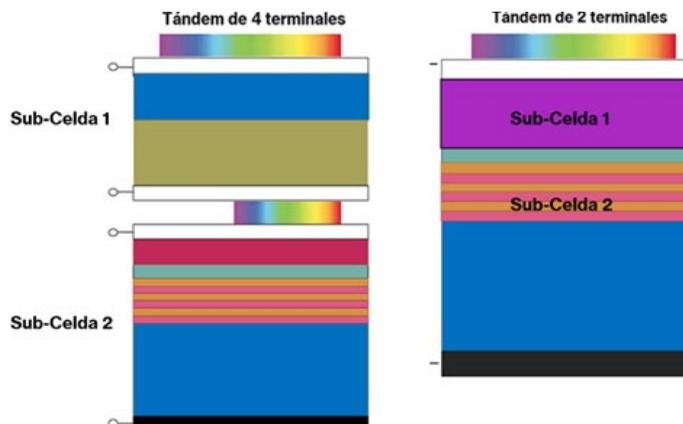


Figura 5. Celda solar tandem de 4 Terminales y 2 Terminales.

La magia radica en garantizar que cada sub-celda absorba la misma luz y genere electricidad al unísono. Para lograrlo, empleamos materiales transparentes, que actúan como ventanas que permiten que la luz fluya a través de cada sub-celda. Así que, en esencia, una celda tándem aprovecha las virtudes de cada sub-celda ampliando las posibilidades del uso de esta tecnología.

Materiales de Sub-celdas para celdas tándem.

Se ha hablado mucho de las celdas solares de siempre, las que usan Silicio por su bajo costo, disponibilidad, adaptación, fabricación y comercialización. Pero como se mencionó hay materiales nuevos que están causando sensación, como las perovskitas que están dando de qué hablar porque absorben la luz y producen energía eléctrica con buena eficiencia, son baratas de hacer y se pueden mezclar fácilmente con otras tecnologías, como las celdas solares de silicio (Lee et al., 2015), Luego tenemos otro material, el arseniuro de galio (GaAs), que suena complicado, pero es otro héroe en esto de la energía solar. Sus celdas solares son muy eficientes y han batido récords de eficiencia fotovoltaica. Estos materiales absorben la luz desde el visible hasta el infrarrojo, y aunque son un poco caras, algunos científicos están pensando en cómo combinarlas con celdas solares de silicio para hacerlas más accesibles. Otra alternativa a este material III-nitruros como base son los III-nitruro de galio indio , el cual ofrece uno de los mejores candidatos el nitruro de galio indio (InGaN) , ya que basados en su eficiencia teórica es el material con mayor proyección, aunque con varios retos que superar (Hamid Howlader et al., 2014; Huang et al., 2006; Jani et al., 2007; Wang et al., 2018). Además, hay otros materiales increíbles, como los compuestos GeSn que absorben diferentes tipos de luz invisible (la luz infrarroja) aunque no genera mucha electricidad aporta al rendimiento general del dispositivo (Wirths et al., 2015).

Existen muchos elementos que pueden ser utilizados como sub-celdas en la tabla se muestran qué materiales y el porqué de su posible uso. En esta tabla 1 destacan los materiales Silicio, Perovskitas y materiales III-V.

Material base	Ventajas	Desventajas	Eficiencia
Silicio	Disponibilidad y bajo precio	Baja eficiencia teórica.	26.7%
GaAs	Excelentes propiedades ópticas	Alto precio de fabricación y poca adaptabilidad a otros materiales	47.6%
Perovskita	Bajo costo	Degradación del material por la humedad y altas temperaturas	26.6%
InGaN	Excelente eficiencia teórica, altas propiedades ópticas, resistente a la radiación.	Separación de fases, alto costo, bajo dopado tipo P	3%

CIGS	Buenas propiedades ópticas, buena eficiencia	Falta de homogeneidad, fases secundarias bajo dopado	23.6%
------	--	--	-------

Tabla 1 comparativa de algunos materiales para celdas solares tándem.

La actualidad de las celdas tándem.

Las celdas solares tándem nos permite mejorar y optimizar las celdas solares existentes, empezando con las convencionales basadas en el elemento silicio y explorando otras sub-celdas con eficiencia similares perovskitas, CIGS (Wilson et al., 2020) y los dispositivos con el mayor rendimiento mostrado los semiconductores III-V (Kasap & Capper, 2006) , de las columnas III-V de la tabla periódica, entre otros. Las celdas tándem de Si/Perovskita por crecimiento monolítico han sido una realidad (Hossain et al., 2019) con una eficiencia de 32.2% pudiendo superar el rendimiento de las CS de unión simple.

Retos de estas celdas solares tipo tándem.

En el caso de CS no todo es la eficiencia, ya que a pesar de que la multifunción de los materiales III-V basados en el compuesto GaAs haya alcanzado una eficiencia de 47.6% no es la más comercial. Puesto que uno de los aspectos primordiales de las celdas solares, incluyendo la tecnología tándem, es la reducción de costos de vatio por watt, lo que lleva a que las celdas de silicio, a pesar de ser menos eficientes, acaparan el 90% del mercado global. Aquí es donde las CS tándem juegan un papel importante, debido a que se pueden adaptar sub-celdas comerciales a otras celdas con mayor eficiencia, por ejemplo las III-V buscando el aumento del rendimiento del dispositivo y reduciendo costos. Sin embargo, también estamos explorando formas de conectar eficientemente las capas superiores e inferiores de las celdas, utilizando enfoques innovadores como uniones túnel y óxidos conductores transparentes. Cuando se colocan capas adicionales sobre el silicio, como las llamadas celdas tándem, surgen nuevos desafíos. Por ejemplo, para las capas superiores, se necesita encontrar maneras de garantizar que los materiales alcancen su mejor rendimiento y, al mismo tiempo, no dañen el silicio. Esto es todo un reto debido a las diferentes necesidades de tratamiento para el silicio y las capas superiores. Se está trabajando duro para superar estos obstáculos y mejorar estas tecnologías.

Para las celdas tándem basadas en películas delgadas, como las de perovskita, queremos mejorar cómo capturan la luz en el infrarrojo cercano (Wilson et al., 2020). Esto es fundamental para lograr un rendimiento óptimo. Además, debemos asegurarnos de que las capas inferiores sean compatibles con el procesamiento de las capas superiores, especialmente para las celdas de perovskita.

Y eso no es todo, también estamos buscando maneras de hacer que las celdas solares sean más accesibles y asequibles. Para las capas superiores hechas de materiales como III-V, la reducción de costos es crucial. Estamos investigando nuevos métodos de deposición, sustratos y métodos de metalización para hacer que estas celdas sean más eficientes y económicas.

Ventajas y desventajas de la tecnología tándem.

Ventajas:

- Eficiencia Elevada: Las celdas tándem son prometedoras para lograr eficiencias altas en producciones a escala industrial, ofreciendo una mejora significativa.
- Diseño Centrado en la Absorción: La eficacia de las celdas tándem radica en igualar adecuadamente los espectros de absorción de las sub-celdas, maximizando así la recolección de energía solar.
- Configuración 2T: Las celdas tándem de 2 terminales (2T) ofrecen una integración más concisa en sistemas fotovoltaicos, requiriendo solo un electrodo transparente entre las capas superior e inferior y reduciendo costos.
- Efectividad en III-V/Si: Las celdas tándem basadas en III-V/Si, con métodos avanzados como el crecimiento epitaxial directo y el enlace de obleas, logran eficiencias extraordinarias en conversión de energía.

Desventajas:

- Complejidad en Configuración 4T: Aunque la configuración de 4 terminales (4T) es generalmente más simple, su diseño complejo puede aumentar los costos totales del sistema debido a gastos asociados con cables, mano de obra y otros aspectos.
- Retos Económicos: La complejidad de las celdas 4T puede ser un obstáculo para lograr reducciones significativas en los costos eléctricos en el futuro.
- Desafíos en Diseño de Cadenas: Para las celdas tándem, especialmente las de 4T, minimizar las pérdidas ópticas y de resistencia relacionadas con la recolección lateral de corriente desde contactos intermedios es un desafío clave.
- Costos Inherentes: Aunque las celdas tándem ofrecen eficiencias superiores, su costo es probablemente más alto que el de las celdas de un solo empalme, exigiendo eficiencias excepcionales para justificar la inversión.
- Consideraciones de Vida Útil: Lograr una vida útil extensa en módulos es crucial, y la tecnología tándem debe cumplir con estándares similares a las tecnologías convencionales, planteando desafíos en la estabilidad de las capas superiores de perovskitas.

Conclusiones

La evolución de las celdas solares, desde su surgimiento como respuesta a la creciente demanda energética hasta su posición actual como pilar de la transición hacia fuentes sostenibles, destaca la importancia de aprovechar la energía solar de manera eficiente y limpia. Las celdas solares, al convertir la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, ofrecen una solución crucial para reducir la dependencia de fuentes contaminantes. La introducción de nuevas tecnologías fotovoltaicas como las celdas tándem representa un hito significativo en este camino, empleando sub-celdas para mejorar la eficiencia y reducir costos. Aunque estas celdas prometen eficiencias elevadas, su adopción masiva enfrenta desafíos económicos

y técnicos que requieren atención. La constante búsqueda de nuevos materiales y su mejora en términos de estabilidad y reducción de costos subraya la innovación constante en este campo. Para alcanzar una transición energética completa, es relevante abordar desafíos específicos, como la complejidad de las celdas tándem, y garantizar su accesibilidad económica. En última instancia, el futuro de las celdas solares depende de la capacidad de la industria para equilibrar eficiencia, costo y sostenibilidad. Abordar estos desafíos allana el camino hacia un panorama energético más limpio y responsable, contribuyendo de manera significativa a la construcción de un futuro sostenible.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo del Centro de Investigación BUAP-CA-96-Aplicaciones Tecnológicas de Semiconductores, perteneciente al ICUAP, de la Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). D. Tepatzi, estudiante de doctorado del “Programa de Doctorado en Dispositivos Semiconductores”, agradece al CONACYT la beca #1041324 para el desarrollo de su proyecto de investigación, incluyendo la publicación de este artículo. EVELYN BETSABE DIAZ CRUZ agradece al CONAHCYT beca postdoctoral “Estancias Posdoctorales por México para la formación y consolidación de las y los Investigadores por México”.

REFERENCIAS

- Richard C. Neville Auth. - Solar Energy Conversion. The Solar Cell-Elsevier Science 1995.
- Thomas Dittrich—Materials Concepts for Solar Cells-Imperial College Press (2014).
- Fonash, S. J. (2010). Solar cell device physics (2nd ed). Academic Press/Elsevier.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefert, G., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (version 62). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(7), 651-663. <https://doi.org/10.1002/pip.3726>
- Hamid Howlader, Md. A., Saha, A. K., Hasan, Md. S., & Islam, Md. R. (2014). Analysis of phase separation in InGaN epitaxy for advanced solar cells. 2014 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICDRET.2014.6861728>
- Hossain, M. I., Qarony, W., Ma, S., Zeng, L., Knipp, D., & Tsang, Y. H. (2019). Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: From Detailed Balance Limit Calculations to Photon Management. *Nano-Micro Letters*, 11(1), 58. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0287-8>
- Huang, Y., Jani, O., Park, E. H., & Ferguson, I. (2006). Influence of Growth Conditions on Phase Separation of InGaN Bulk Material Grown by MOCVD. *MRS Proceedings*, 955, 0955-107-20. <https://doi.org/10.1557/PROC-0955-107-20>
- Jani, O., Yu, H., Trybus, E., Jampana, B., Ferguson, I., Doolittle, A., & Honsberg, C. (2007). EFFECT OF PHASE SEPARATION ON PERFORMANCE OF III-V NITRIDE SOLAR CELLS.
- Kasap, S. O., & Capper, P. (Eds.). (2006). Springer handbook of electronic and photonic materials. Springer.
- Kern, W., & Schuegraf, K. K. (2001). 1—Deposition Technologies and Applications: Introduction and Overview. En K. Seshan (Ed.), *Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques (Second Edition)* (Second Edition, pp. 11-43). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-081551442-8.50006-7>
- Lee, Y., Park, C., Balaji, N., Lee, Y., & Dao, V. A. (2015). High efficiency Silicon Solar Cells: A Review. *Israel Journal of Chemistry*, 55(10), 1050-1063. <https://doi.org/10.1002/ijch.201400210>
- McEvoy, A. J., Markvart, T., & Castañer, L. (Eds.). (2012). *Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications* (2nd ed). Academic Press.
- Neamen, D. A. (2012). *Semiconductor physics and devices: Basic principles* (4th ed). McGraw-Hill.
- Wang, K., Wang, Q., Chu, J., Xiao, H., Wang, X., & Wang, Z. (2018). Roles of polarization effects in InGaN/GaN solar cells and comparison of p-i-n and n-i-p structures. *Optics Express*, 26(22), A946. <https://doi.org/10.1364/OE.26.00A946>
- Wilson, G. M., Al-Jassim, M., Metzger, W. K., Glunz, S. W., Verlinden, P., Xiong, G., Mansfield, L. M., Stanbery, B. J., Zhu, K., Yan, Y., Berry, J. J., Ptak, A. J., Dimroth, F., Kayes, B. M., Tamboli, A. C., Peibst, R., Catchpole, K., Reese, M. O., Klinga, C. S., ... Sulas-Kern, D. B. (2020). The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(49), 493001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9c6a>
- Wirths, S., Geiger, R., Von Den Driesch, N., Mussler, G., Stoica, T., Mantl, S., Ikonic, Z., Luysberg, M., Chiussi, S., Hartmann, J. M., Sigg, H., Faist, J., Buca, D., & Grützmacher, D. (2015). Lasing in direct-bandgap GeSn alloy grown on Si. *Nature Photonics*, 9(2), 88-92. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.321>

Celda Solar de Bajo Costo Sensibilizada por Tinte

Low-Cost Dye-Sensitized Solar Cell

Marco Antonio Borja Tostado¹
Raquel Ramírez Amador^{1*}
Gildardo Tlapechco Meneses¹
Eduardo Mellado Hernández¹
Gustavo Méndez Pérez¹
Jair Cárdenas Flores¹

<https://orcid.org/0000-0003-5577-2337>
<https://orcid.org/0000-0003-0716-4596>
<https://orcid.org/0009-0005-8781-1969>
<https://orcid.org/0009-0008-5963-3195>
<https://orcid.org/0009-0003-0822-7826>
<https://orcid.org/0009-0006-5963-3195>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP

Recibido: 20/diciembre/ 2023

Aprobado: 26/febrero/ 2024

Publicado: 7/marzo/ 2024

¹División de Carrera de Mecatrónica, Universidad Tecnológica de Huejotzingo, Camino Real a San Mateo s/n, C.P:74169, Huejotzingo, Puebla, México.

²Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Puebla. Tercer Carril del Ejido, Serrano s/n, Cuanalá, 72640 Puebla, México.

³Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Apizaco, Carretera Apizaco-Tzompantepec, esq. con Av. Instituto Tecnológico S/N, Curbado Apizaco-Tzompantepec, Tlaxcala 90300, México
raqueamador23@gmail.com

RESUMEN

En la Universidad Tecnológica de Huejotzingo, alumnos de la carrera de Mecatrónica fabricaron una celda solar que convierte la luz del sol en electricidad. Para ello, utilizaron materiales simples y de bajo costo que tenían a la mano, como vidrio, óxido de zinc, jugo de zarzamoras, yodo y grafito. El proceso de fabricación fue sencillo: primero, los alumnos depositaron una capa de óxido conductor transparente (FTO) sobre el vidrio. Luego, aplicaron una capa de óxido de zinc. Después, sumergieron la celda en jugo de zarzamoras, que contiene un pigmento que absorbe la luz solar. A continuación, agregaron una solución de yodo, que actúa como electrolito. Por último, colocaron una capa de grafito, que ayuda a que la corriente eléctrica fluya. Los resultados de las pruebas mostraron que la celda solar tiene un voltaje máximo de 100 milivoltios y una corriente máxima de 0.45 miliamperes. Esto significa que la celda puede generar una pequeña cantidad de electricidad, suficiente para alimentar dispositivos electrónicos sencillos, como una calculadora o una linterna.

Palabras clave: celda solar, FTO, óxido de zinc, grafito.

INTRODUCCIÓN

El sol, por su naturaleza de estrella enana amarilla, brinda en forma de distintas longitudes de ondas energía a todo el conjunto de planetas, llamado sistema solar, mismas que dependiendo su longitud de onda, será la energía transmitida por esta (J.L., 2022).

Recordemos que cuando se habla de luz, es el término común de las ondas de radiación electromagnética, por ello es necesario saber y conocer cómo está conformada dicha radiación, puesto que es una onda, y por la relación de Max Planck, se deduce de la

ABSTRACT

At the Technological University of Huejotzingo, students from the Mechatronics program manufactured a solar cell that converts sunlight into electricity. To do this, students used simple and low-cost materials that they had on hand, such as glass, zinc oxide, blackberry juice, iodine, and graphite. The manufacturing process was simple: first, the students deposited a layer of transparent conductive oxide (FTO) on the glass. Then, they applied a layer of zinc oxide. Next, they immersed the cell in blackberry juice, which contains a pigment that absorbs sunlight. Then, they added a solution of iodine, which acts as an electrolyte. Finally, students placed a layer of graphite, which helps the electric current flow. The test results showed that the solar cell has a maximum voltage of 100 millivolts and a maximum current of 0.45 milliamperes. This means that the cell can generate a small amount of electricity, enough to power simple electronic devices, such as a calculator or a flashlight.

Keywords: solar cell, FTO, zinc oxide, graphite.

ecuación 1, que la energía de la onda, E , es directamente proporcional a la frecuencia de esta, f . Lo cual en términos digeribles nos indica que cuanto mayor sea la frecuencia, menos energía obtengamos de esta (J.L., 2022).

$$E=hf \text{ (1)}$$

La relación del sol es sumamente importante para todo organismo vivo dentro del planeta Tierra, ya que, sin ella no habría vida como la conocemos, ni marco alguno para el

surgimiento de los grandes ecosistemas. Es decir, cualquier afectación ocurrida dentro de la distancia recorrida entre el sol y la tierra o el cambio de frecuencia de la luz, haría de la tierra un lugar inhóspito, además de hostil a la vida (Sánchez A continuación, viene el meollo del asunto, la vida como tal, ha sido desarrollada en torno a dicha energía, por ejemplo, las plantas obtienen su fuente de alimentación de los nutrientes encontrados en el suelo del planeta, sin embargo, también obtienen energía del sol a través del famoso proceso químico llamado fotosíntesis, mediante el cual se convierte materia inorgánica en materia orgánica, aprovechando la energía solar para transformarla en energía química (Sánchez-Barajas, V., 2016).

¿Por qué es importante estudiar los procesos de las plantas? Las plantas son capaces de transformar la luz solar en energía química, que utilizan para crecer y reproducirse. Este proceso, llamado fotosíntesis, es uno de los más relevantes de la Tierra, ya que proporciona el oxígeno que respiramos y los alimentos que comemos. Los científicos están estudiando los procesos de las plantas para desarrollar nuevas tecnologías, como las celdas solares. Las celdas solares son dispositivos que convierten la luz solar en electricidad.

¿Qué relación tienen las plantas con las celdas solares? Las plantas utilizan pigmentos, como la clorofila, para absorber la luz solar. Estos pigmentos están presentes en las hojas de las plantas, que son los órganos responsables de la fotosíntesis. Las celdas solares también utilizan pigmentos para absorber la luz solar. Estos pigmentos están recubiertos sobre un material semiconductor, que es un material que conduce la electricidad de forma parcial. Cuando la luz solar incide en los pigmentos, estos liberan electrones. Estos electrones fluyen a través del material semiconductor, generando electricidad.

¿Cómo se relacionan las plantas de frutos rojos con las celdas solares sensibilizadas por tinte? Las plantas de frutos rojos, como las frambuesas, las moras y las zarzamoras, contienen pigmentos que son muy eficientes en la absorción de la luz solar (Pezzotti-Escobar G, 2015). Estos pigmentos se pueden utilizar para fabricar celdas solares sensibilizadas por tinte. Las celdas solares sensibilizadas por tinte son un tipo de celda solar que utiliza pigmentos para absorber la luz solar.

¿Qué son las celdas solares sensibilizadas por tinte? Las celdas solares sensibilizadas por tinte DSSC (Dye Sensitized Solar Cell), son un tipo de celda solar que utiliza pigmentos para absorber la luz solar. El pigmento está recubierto sobre un material semiconductor, que es un material que conduce la electricidad de forma parcial. Cuando la luz solar incide en los pigmentos, estos liberan electrones. Estos electrones fluyen a través del material semiconductor, generando electricidad. Las celdas solares sensibilizadas por tinte son una tecnología relativamente nueva, pero tienen el potencial de ser más baratas y eficientes que las celdas solares tradicionales.

METODOLOGÍA

Una celda solar DSSC, está conformada por una variedad de capas de diversos materiales, las cuales fueron depositadas de diversas formas. En el primer momento de la fabricación de las celdas solares sensibilizadas por colorante, se requieren de dos conductores depositados sobre vidrio, los cuales, van a servir como electrodos, estos van a estar separados por una capa de óxido de zinc (ZnO) (Pezzotti-Escobar G, 2015). Ver Figura 1.

El óxido de zinc (ZnO) y el dióxido de titanio (TiO₂) son dos materiales que se utilizan para fabricar celdas solares sensibilizadas por tinte. Ambos materiales tienen la capacidad

de absorber la luz solar, pero el ZnO tiene una ventaja importante sobre el TiO₂: es un mejor semiconductor.

Los semiconductores son materiales que pueden conducir electricidad, pero no tan bien como los metales. Esta propiedad es fundamental para las celdas solares sensibilizadas por tinte, ya que permite que los electrones generados por la luz solar fluyan a través del material y generen electricidad.

El TiO₂ es un semiconductor, pero no tan bueno como el ZnO. Esto se debe a que el TiO₂ tiene una banda prohibida más grande que el ZnO. La banda prohibida es una región de energía que existe entre los niveles de energía de los electrones de conducción y los niveles de energía de los electrones de valencia. Cuanto más grande sea la banda prohibida, más difícil será para los electrones pasar de los niveles de energía de valencia a los niveles de energía de conducción.

En consecuencia, el ZnO es un semiconductor más eficiente que el TiO₂. Esto significa que las celdas solares sensibilizadas por tinte que utilizan ZnO pueden generar más electricidad que las celdas solares sensibilizadas por tinte que utilizan TiO₂ (Pezzotti-Escobar G, 2015) (Carbó-Vela P.C, 2012).

Además de su mejor rendimiento como semiconductor, el ZnO también es más barato y fácil de fabricar que el TiO₂. Por estas razones, el ZnO es el material preferido para fabricar celdas solares sensibilizadas por tinte.

Otro componente esencial para nuestra celda solar es el tinte, que puede obtenerse a partir de jugo de moras, frambuesas, manzanas, peras, uvas, zarzamoras y ciruelas. Estos frutos contienen una molécula clave llamada antocianina, que posee grupos -OH que se adhieren al óxido de zinc. Este tinte realiza la transferencia de electrones al óxido de zinc al absorber fotones de luz solar.

El electrolito en este proceso es el yodo, un elemento que permite que los electrones se desplacen a través de la celda solar. Cuando una molécula de tinte es impactada por un fotón de luz solar, emite un electrón. Este electrón se desplaza a través del electrolito hasta llegar a la capa de grafito, donde se pierde debido a la oxidación. El electrón perdido es reemplazado por otro proveniente de la capa de zinc. Este ciclo puede repetirse indefinidamente, lo que permite que la celda solar genere electricidad (Carbó-Vela P.C, 2012) (Rafael, Formentín-Vallés, 2013).

Para completar la construcción de la celda solar, es crucial que uno de los electrodos se recubra con un catalizador de grafito. Este catalizador facilita la reducción del mediador yoduro-triyoduro (Rafael, Formentín-Vallés, 2013), asegurando un funcionamiento eficiente y sostenible de nuestra innovadora tecnología solar.

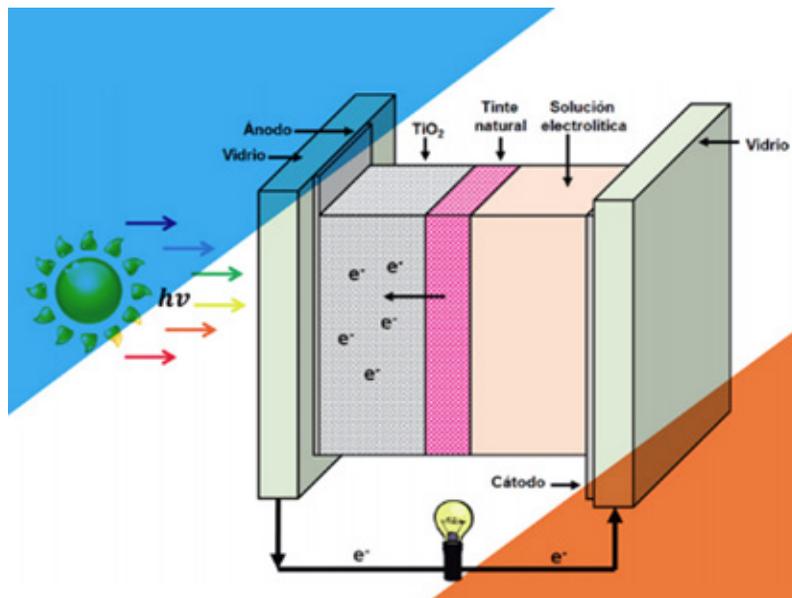


Figura 1. Partes de una celda solar sensibilizada por colorante (Pezzotti-Escobar G, 2015) <https://revista.cidet.org.co/revistas/revista-12/celdas-solares-dssc-tecnologia-prometedora-para-la-produccion-de-electricidad-a-bajo-costo/>

DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO

Una celda solar es un dispositivo fotovoltaico que convierte la luz en electricidad. Utiliza colorantes orgánicos para absorber la luz solar, generando corriente eléctrica. En primer lugar, el proceso comienza con el colorante entrando en un estado excitado (D^*) al absorber luz visible en su banda de absorción, cuyo punto máximo se ubica en 535 nm. En segundo lugar, el colorante libera electrones en la banda de conducción del ZnO , adquiriendo una carga positiva (D^+). Estos electrones viajan a través de la red nano-cristalina del ZnO hasta alcanzar el sustrato conductor, donde acceden al circuito externo.

Simultáneamente, el colorante regresa a su estado original al capturar electrones de los iones I^- presentes en el electrolito, formando

así I_3^- . Estos iones I_3^- se regeneran en el contraelectrodo, una reacción catalizada por la presencia de un recubrimiento FTO en el ánodo, cerrando de esta manera el circuito. Estas transferencias de carga son posibles gracias a las diferencias en los niveles energéticos de los componentes de la celda.

Es importante destacar que, a diferencia de las celdas solares convencionales basadas en uniones P-N de silicio, en las celdas semiconductoras con colorante, los procesos de absorción y transporte electrónico ocurren en regiones separadas de la celda, operando de manera independiente (Carbó-Vela P.C, 2012) (J.A, 2012). Este enfoque novedoso contribuye a la eficiencia y versatilidad de nuestra tecnología solar.

DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Los electrodos fueron preparados mediante la técnica de rocío pirolítico ultrasónico utilizando como sustrato vidrios conductores recubiertos con una película de óxido de estaño dopado con flúor ($\text{SnO}_2:\text{F}$), (dichas películas fueron caracterizadas previamente) (Ramírez-Amador R, 2019) (Malik O, 2015). Sobre la cual se depositó una capa de 5-10 micras de grosor de ZnO . Sobre la superficie del semiconductor se encuentra absorbido un colorante natural a base de zarzamora. Se ha reportado pinturas orgánicas que contienen la molécula conocida como antocianina extraída de la pigmentación de las frambuesas, manzanas, peras, uvas, zarzamosas, ciruelas, y semillas de granada: también de flores, como la jamaica y rosas, verduras, como col y maíz morados, y de las hojas verdes de los cítricos de donde se extrae la clorofila, cabe recalcar que no todo lo que tiene pintura orgánica, como las fresas contienen esta molécula. El electrodo se encuentra sumergido en un electrolito que, siendo líquido, puede embeber completamente la estructura porosa del óxido, por último, el contra electrodo es otro sustrato conductor cubierto por una película delgada de grafito (Rica, 2022).

En la figura 2 se muestran los materiales empleados para la construcción de la celda solar sensibilizada por tinte, como son sustratos de vidrio con películas de FTO, pasta de Lassar para obtener el óxido de zinc, zarzamosas para el colorante, tintura de yodo para formar el electrolito y para obtener el catalizador fue con grafito.



Figura 2. Materiales empleados para la fabricación de la celda solar sensibilizada por tinte. Elaboración propia.

Los distintos elementos que conforman esta celda DSSC se pueden visualizar en la Figura 2. Mediante el uso de la instrumentación, específicamente hablando de electricidad, se procedió a realizar la caracterización de nuestros resultados finales, es decir se realizaron mediciones de diferencia de potencial, intensidad eléctrica, potencia eléctrica en función del tiempo, con el fin de poder analizar cómo se comporta la celda solar, así como afirmar o refutar el éxito conseguido.

En la Figura 3, se observa la celda DSSC con diámetro aproximado de 3 x 2.5 cm, de la cual fue posible obtener los resultados de la caracterización que se presentan en la tabla 1, donde se mide el voltaje y corriente generada con ésta en el transcurso del día (figura 4 y figura 5). En las tablas 1, y 2 y figuras 5,6, y 7 es posible apreciar la cantidad de voltaje y corriente generada por la celda a diferentes horas del día, donde se puede apreciar que obtenemos mayor cantidad de voltaje y corriente durante el cenit y poco después de éste (12 – 1:30 pm), ya que es el lapso de tiempo del día con mayor potencia de radiación solar.

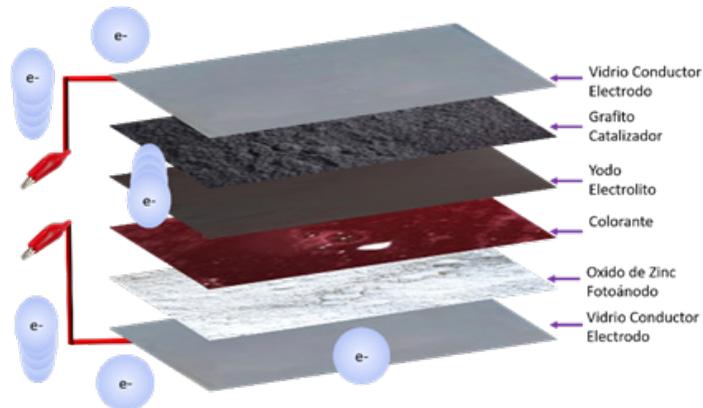


Figura 3. Proceso de elaboración de la celda solar sensibilizada por tinte.



Figura 4. Celda solar obtenida. Fotografía de la medición. Elaboración propia

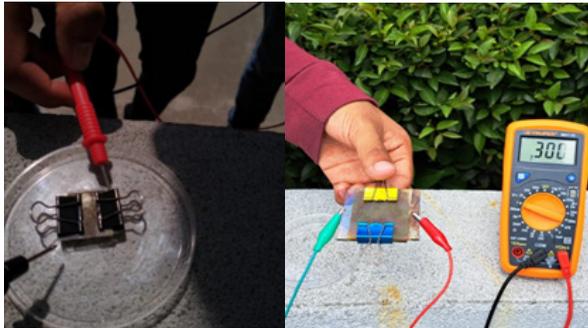


Figura 5. Mediciones de la celda solar a diferentes horas del día. Por Los autores

Hora	Voltaje placa DSSC (Volts)	Corriente(mA)
12:00	0.1	0.0001
01:30	0.104	0.0005
02:30	0.071	0.00045
03:30	0.06	0.0003
04:30	0.07	0.0001

Tabla 1. Mediciones de voltaje contra la hora de medición.



Figura 6. Gráfica de voltaje contra la hora de medición.

Hora	Potencia(Watts)
12:00	0.00001
01:30	0.000052
02:30	0.00003195
03:30	0.0000018
04:30	0.000007

Tabla 2. Mediciones de corriente contra la hora de medición.



Figura 7. Gráfica de corriente contra la hora de medición.

Figura 8. Gráfica de la potencia obtenida contra la hora de medición.

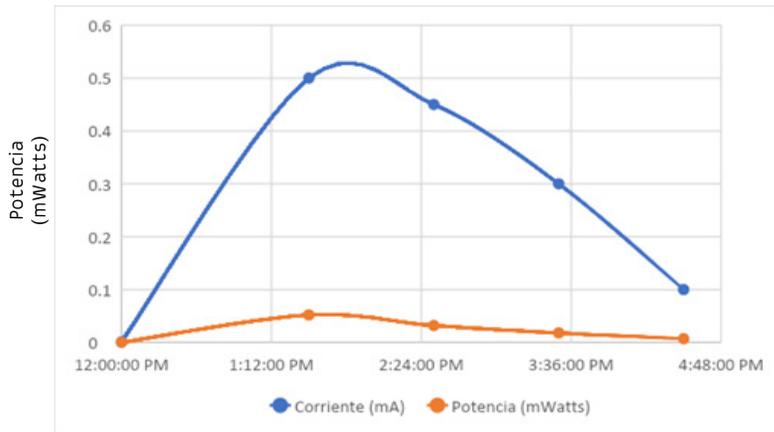


Figura 9. Gráfica de potencia contra corriente generada por la celda.

Conclusiones

El presente trabajo se centra en reemplazar la energía no limpia con alternativas. Al explorar estudios previos, se descubren diversas posibilidades. Para lograr un progreso óptimo, es esencial observar, experimentar, probar, medir y analizar, generando así conclusiones objetivas y comprobables que guiarán el desarrollo del prototipo final.

En una primera etapa, se recopiló información; ahora, nos enfocamos en la creación de un prototipo funcional, dando paso a la siguiente etapa: la experimentación. Durante la creación del prototipo, se enfrentaron desafíos prácticos no anticipados en la fase teórica, como la sensibilidad de los materiales. A pesar de conocer la fragilidad del material de trabajo, se produjeron daños, algunos irreparables, convirtiendo conocimiento intangible en una experiencia tangible.

Este trabajo revela dos factores clave en las celdas solares tipo DSSC, directamente relacionados con la eficiencia de un sistema completo. La información sobre las DSSC, su relación con la fotosíntesis natural de las plantas verdes, y la combinación de semiconductor y electrolito, permitió la creación de una celda solar fotoelectroquímica. Este enfoque ofrece una forma más práctica y sencilla de conversión fotovoltaica en comparación con otros métodos. En resumen, estamos abriendo nuevas posibilidades en la generación de energía limpia mediante un proceso innovador y eficiente.



Figura 10. Grupo de participantes del trabajo aquí presentado

En la fotografía, se muestra a los estudiantes que realizaron el proyecto de celda solar sensibilizada por tinte de bajo costo, la cual fue fabricada en el laboratorio de películas delgadas de la carrera de Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Huejotzingo, el nombre de cada uno de los participantes es: Marco Antonio Borja Tostado, Jair Cárdenas Flores, Gustavo Méndez Pérez, Raquel Ramírez Amador, Gildardo Tlapechco Meneses, Brandon Orduño Zambrano y Eduardo Mellado Hernández (de izquierda a derecha).

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros. Así como, los datos de este artículo y los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.⁴

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue asesorado por la investigadora Raquel Ramírez Amador y se contó con el apoyo de los Doctores Salvador Alcántara Iniesta y José Joaquín Alvarado Pulido del Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores perteneciente al ICUAP, quienes nos brindaron su apoyo para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Biblioteca, U. (2020). BiblioGuías. (Universidd Autónoma de Madrid) Recuperado el 08 de 2021, de https://biblioguias.uam.es/citar/estilo_apa_7th_ed
- Cárbo Vela, P. C., & Rocha Rangel, E. (2012). Proceso electroquímico en celdas solares sensibilizadas. *Investigación y Ciencia*, 20(56), 3-10.
- Carbó-Vela P.C, R.-R. E. (2012). Proceso electroquímico en celdas solares sensibilizadas con un colorante natural. *Investigación y Ciencia*, 3-10.
- El Blog de Franz. (4 de Abril de 2022). El sol y su importancia. Obtenido de El sol y su importancia: <https://acolita.com/el-sol-y-su-importancia/>
- intruments, N. (26 de 09 de 2021). ¿Qué es LabVIEW? Obtenido de <https://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>: <https://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>
- J.A, D.-R. (Septiembre de 2012). Construcción de una celda solar tipo Grätzel empleando electrodos de TiO₂ nanoparticulado entintados con extracto de fruto garambullo. Obtenido de Construcción de una celda solar tipo Grätzel empleando electrodos de TiO₂ nanoparticulado entintados con extracto de fruto garambullo: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/309/1/Construcci%C3%B3n%20de%20una%20celda%20solar%20tipo%20Gratzel%20empleando%20electrodos%20de%20TiO2%20nanoparticulado%20entintados%20con%20extracto%20de%20fruto%20de%20garambullo%20%28M>
- J.L., F. (4 de Abril de 2022). La Luz como Onda Electromagnética. Obtenido de La Luz como Onda Electromagnética: <https://www.fisicalab.com/apartado/luz-y-ondas-em>
- Malik O, D. I.-W. (2015). Fluorine-doped tin oxide films with a high figure of merit fabricated by spray pyrolysis. *Journal of Materials Research*, 2040-2045.
- Pezzotti-Escobar G, A.-A. C.-T.-V.-C.-A. (2015). Celdas Solares DSSC, tecnología prometedora para la producción de electricidad a bajo costo. *Revista CIDET*, 55-66.
- Rafael, Formentín-Vallés. (2013). “Estudio de las características electrónicas de dispositivos fotovoltaicos moleculares: células Gratzel. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/36015/MEMORIA.pdf?sequence=>
- Ramírez-Amador R, F.-C. G.-I.-G.-T.-A.-O. (2019). Structural, morphological, optical, and electrical characterization of fluorine doped tin oxide thin films synthesized by PSP. In *Solid State Phenomena*, 64-71.
- Sánchez-Barajas, V. (2016). Importancia de La Fotosíntesis para la Vida en la Tierra.
- Rica, U. d. (Dirección). (2022). Creación de Celdas Solares [Película].
- SPIE. (2020). SPIE proceedings manuscript sample. SPIE, 1-5.
- UAM, B. (2020). BiblioGuías. (Universidad Autónoma de Madrid) Recuperado el 8 de 2021, de https://biblioguias.uam.es/citar/estilo_ieee

LA SIGATOKA, UNA AMENAZA PARA EL CULTIVO DE PLÁTANO Y BANANO EN MÉXICO

SIGATOKA, A THREAT TO PLANTAIN AND BANANA FARMING IN MÉXICO

María Fernanda Galindo Hernández¹
Alexa Limón Bonilla¹
Luisa Renata López Lobato¹
Yesmin Panecatí Bernal²
José Joaquín Alvarado Pulido^{3*}

<http://orcid.org/0009-0002-7842-288X>
<http://orcid.org/0000-0001-8013-628X>
<http://orcid.org/0009-0005-7715-6630>
<http://orcid.org/0000-0001-9330-4123>
<http://orcid.org/0000-0001-7186-4429>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

¹Licenciatura en Biotecnología. Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias Biológicas.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, CU, Puebla, Pue., C.P. 72592

²Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Puebla. Tercer Carril del Ejido, Serrano s/n, Cuanalá, 72640 Puebla, México.

³Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores y Posgrado en Ciencias en Energías Renovables, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

maria.galindohe@alumno.buap.mx

alexa.limon@alumno.buap.mx

luisa.lopezlo@alumno.buap.mx

yesmin.panecat1369@uppuebla.edu.mx

*Autor de correspondencia: joaquin.alvarado@correo.buap.mx

RESUMEN

El cultivo del banano y plátano es una importante fuente de ingresos para los productores mexicanos, pero se enfrenta a una seria amenaza: el complejo de enfermedades de la Sigatoka. Este conjunto de afecciones fúngicas puede causar graves pérdidas económicas, ya que reduce el rendimiento y la calidad de las frutas.

Los pesticidas químicos son el método de control más utilizado, pero tienen una serie de inconvenientes, como la contaminación del medio ambiente y el riesgo de toxicidad para los seres humanos.

En este trabajo, se revisan las diferentes alternativas conscientes que se están desarrollando para controlar la Sigatoka. Estas herramientas ofrecen un enfoque más sostenible para proteger el cultivo del banano y plátano, la salud de los agricultores y los consumidores. Del mismo modo se dan a conocer, algunas recomendaciones que buscan ayudar a los productores de banano y plátano.

Palabras clave: alternativas naturales, banano, cultivo, pesticidas, plátano, riesgo ambiental, Sigatoka

ANTECEDENTES

El plátano es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, con una producción anual de 90 millones de toneladas, siendo los países de América Latina los principales exportadores de fruta fresca hacia los Estados Unidos y Europa (Mazo Sánchez, 2005). El plátano tiene varias vitaminas, potasio, calcio, nitrógeno, fósforo que son benéficas para la salud humana. Previene varias enfermedades como la disentería, úlceras, bronquitis, diabetes, la lepra, la histeria, la fiebre, trastornos digestivos, hemorragia, epilepsia, hemorroides y picaduras de insectos, ya que químicamente la savia del plátano tiene propiedades astringentes (Blasco-López, 2014).

ABSTRACT

Banana and plantain cultivation is an important source of income for Mexican producers, but it faces a serious threat: the Sigatoka disease complex. This set of fungal diseases can cause significant economic losses, as it reduces crop yields and fruit quality.

Chemical pesticides are the most widely used control method, but they have a number of drawbacks, such as environmental pollution and the risk of toxicity to humans.

In this paper, it is reviewed the different environmentally conscious alternatives that are being developed to control Sigatoka. These tools offer a more sustainable approach to protecting banana and plantain cultivation, the health of farmers and consumers. Similarly, some recommendations are made that seek to help banana and plantain producers.

Keywords: Banana, Cultivation, Environmental Risk, Natural Alternatives, Pesticides, Plantain, Sigatoka

Los desechos del plátano tienen diversas aplicaciones como composta, bioetanol, biogas, biodiesel, hidrógeno, biochar, biofiltro, coagulante, carbón activado, adsorbente, membrana cerámica, bioplástico (Alzate-Acevedo, 2021).

Sin embargo, este cultivo se enfrenta a una seria amenaza: el complejo de enfermedades de la Sigatoka. Este conjunto de afecciones fúngicas puede causar graves pérdidas económicas, ya que reduce el rendimiento y la calidad de las frutas.

La Sigatoka es causada por el hongo *Mycosphaerella fijiensis*, el cual tiene un alto

nivel de diversidad genética. Esto se debe a su reproducción sexual y asexual, así como a su ciclo de vida corto, lo cual le permite generar numerosas generaciones por año. Esta diversidad genética hace que el hongo sea muy adaptable a diferentes condiciones ambientales y a las variedades de plátano.

El complejo de enfermedades de la Sigatoka afecta las hojas de las plantas de plátano, produciendo manchas oscuras que pueden cubrir toda la superficie foliar. Esto reduce la capacidad fotosintética de las plantas, lo que afecta el rendimiento y la calidad de los frutos (Caffarra, 2022). Los frutos afectados por la Sigatoka pueden madurar prematuramente, tener un menor tamaño y peso, y presentar manchas y deformaciones.

La Sigatoka se identificó por primera vez en las islas Fiji en 1963. Se extendió rápidamente a otras partes del mundo, llegando a América Latina en 1972. En México, se identificó por primera vez en 1981 en los estados de Chiapas y Tabasco (Orozco-Santos & Orozco-Romero, 2004).

Este complejo de enfermedades es particularmente problemático en las regiones tropicales y subtropicales, donde las condiciones climáticas son favorables para el crecimiento del hongo. El hongo puede sobrevivir a temperaturas entre 15 y 35 °C, y prefiere condiciones húmedas con una humedad relativa del 70% o superior.

La Sigatoka representa una grave amenaza para la producción de plátano. Se estima que causa pérdidas anuales de 35 a 45% del total de costos de producción. En México, las pérdidas por la Sigatoka se estiman en al menos 500 millones de pesos anuales. Pese a que el plátano y el banano provienen de la familia de las Musáceas, existen diferencias entre ellos. De acuerdo con la dispersión geográfica, el plátano se refiere a la variedad genética procedente de las Islas Canarias, mientras que la banana se cultiva principalmente en Sudamérica, Centroamérica y África (Nadal-Medina, n.d.).

La clasificación morfológica de plátano y banano se fundamenta principalmente en 100 características distintivas, tales como la forma, la banana es más larga y curva, mientras que el plátano es más pequeño y curvo. El tamaño de la banana es más reducido, con un peso medio de 237.7 gramos y una longitud media de 20.5 cm, mientras que el plátano presenta un peso medio de 135.5 gramos y una longitud media de 15.7 cm.

Estas características morfológicas existen debido a la interacción del genotipo con el ambiente, lo que las hace inestables y variables entre años y en localidades geográficas diferentes. Gracias a estas diferencias tenemos las principales variedades genéticas de plátano y banano:

Variedades genéticas de plátano:

- AAB: Dominico, Enano gigante, Macho, Manzano, Morado, Pera, Tabasco
- AAA: Cavendish, Gran Nain, Williams

Variedades genéticas de banano:

- AAA: Cavendish Enano, Gros Michel, Williams
- AAB: Chinese Cavendish o Chica, Pelipita, Tiparot
- ABB: Bluggoe o Chato, Maricongo, Saba

Vale la pena recalcar que, cada variedad genética tiene sus propias características en cuanto a sabor, tamaño, forma y uso culinario (Nadal-Medina, n.d.).

Sigatoka

Como se mencionó anteriormente, la enfermedad de la Sigatoka (ver Figura 1) es causada por un hongo patógeno, *Mycosphaerella*, el cual pertenece a la familia *Mycosphaerellaceae*, pudiendo corresponder a la especie *M. M. fijiensis* o *M. musicola* (Chillet et al., 2009), presentes en la mayoría de las regiones que cultivan plátanos y de las cuales estaremos hablando más adelante. Esta afección es un estrés añadido al cultivo, el cual puede reducir el tiempo de vida verde del plátano, evitando el proceso de fotosíntesis (Bennett, R.S. & P.A. Arneson. 2003).

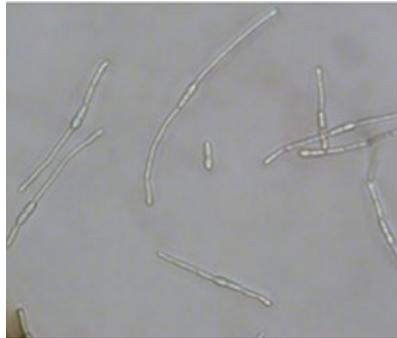


Figura 1. Vista al microscopio de la Sigatoka negra (America, C. L. 2017).

Signos y síntomas

En el cultivo, hay una decoloración en la parte inferior de las hojas del banano. Esta decoloración puede cambiar de color amarilla a marrón y tomar un color más oscuro. Esto se puede ver en la parte superior de la hoja, como se ve en la Figura 2a. Conforme la enfermedad va avanzando, las manchas pueden tornarse de distintas formas y llegan a tener un color negro (Figura 2b). Como se observa en la Figura 2c, cuando se presenta un estado severo de la enfermedad, la hoja del banano está totalmente decolorada y con una apariencia húmeda o mojada, lo cual representa la pérdida total de la hoja, así como del plantío (Figura 2d). (Bennett, R.S. & P.A. Arneson. 2003).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2. Etapas de afectación de la Sigatoka en banano y plátano, primera etapa (a), segunda etapa (b), tercera etapa (c) y afectación en plantío (d), (Bennett, R.S. & P.A. Arneson. 2003).

Tipos de Sigatoka

Existen dos principales tipos de Sigatoka; la Sigatoka amarilla (*Mycosphaerella musicola*) y la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*), esta última descubierta por primera vez en 1964 y apareciendo como una variante de la primera (Bennett, R.S. & P.A. Arneson. 2003). Una de las características más notorias en sus diferencias, es que la Sigatoka negra no presenta el perímetro amarillo alrededor de la mancha negra, mientras que la Sigatoka amarilla si lo tiene. A continuación, presentamos una tabla comparativa entre estas dos especies.

Comparación de la Sigatoka Negra y Amarilla	
Sigatoka Negra	Sigatoka Amarilla
Formación del hongo	
<ul style="list-style-type: none"> • Se forma uno solo. • Forma torcida o recta, estrechos de la base y se ramifican ocasionalmente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se forman en grupos. • Forma recta, grosor uniforme y no ramificados.
Hospederos	
<ul style="list-style-type: none"> • Bananos (AAB), (ABB). 	<ul style="list-style-type: none"> • Bananos (AAA), (AAB), (ABB).

Síntomas y ambiente	
<ul style="list-style-type: none"> • Mancha inicial color marrón oscuro. • Ambientes cálidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mancha inicial color amarillo pálido. • Ambientes frescos.

Tabla 1. Comparación de la Sigatoka Negra y Amarilla. Elaboración propia tomada de (Bennett, R.S. & P.A. Arneson. 2003).

Ciclo de la enfermedad

También es importante conocer cómo se replica la enfermedad de la Sigatoka. Para una mejor descripción podemos ver en la Figura 3 que existen dos vías de replicación, la asexual y la sexual. La vía de replicación asexual consiste en la formación del hongo debido a la alta exposición a la humedad, lo que daría como consecuencia una propagación de la enfermedad entre las hojas del banano o plátano, produciendo un tipo de autoinfección. La replicación sexual, es en la que, mediante ráfagas de viento, pueden dispersarse las esporas del hongo, llegando a infectar cultivos sanos, dando como resultados las lesiones ya mencionadas.

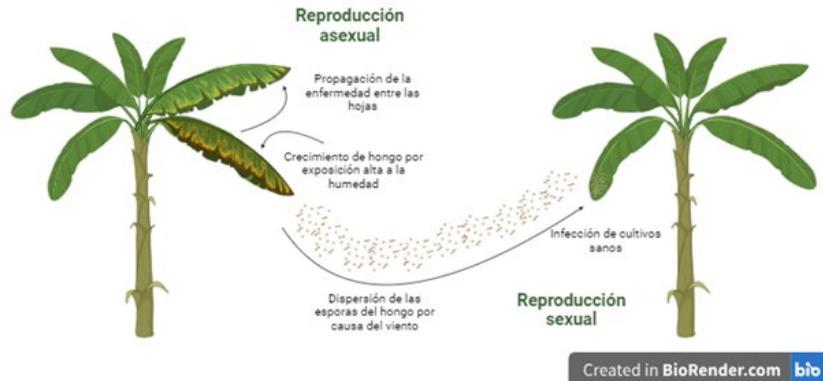


Figura 3. Ciclo de la enfermedad de la Sigatoka elaboración propia tomada de (FitoAgro, 2015).

Afectación en la producción del plátano y banano por la Sigatoka

La Sigatoka se considera como la enfermedad más dañina y costosa que afecta al cultivo de bananos y plátano (*Musa spp.*). Este patógeno destruye el tejido foliar, como consecuencia se reduce la fotosíntesis, se afecta el crecimiento de la planta y por lo tanto la producción. Su control químico representa el 27% de los costos totales de producción. Y con la ausencia

de medidas para combatirlo la enfermedad puede reducir hasta en un 50% el peso del racimo y causar pérdidas del 100% debido al deterioro en la longitud y grosor del fruto. Se ha estimado que la enfermedad causa más del 38% de pérdida en el rendimiento del banano y plátano que ocurre como resultado de la maduración prematura de la fruta. (Martínez, I, et al. 2011).

En 2020 la producción de banano y plátano en México fue de más de 2 millones de toneladas, el precio medio por tonelada fue de \$3,818.00 por lo que el valor de la producción fue de 9,409 millones de pesos. (Axayacatl, O. 2012). El estado de Chiapas fue el principal productor de banano y plátano, seguido por Tabasco y Veracruz, representando el 66% de la producción nacional. (Secretaría de Economía, 2012)

La presencia de Sigatoka en México ocasionó graves pérdidas en todas las regiones productoras de Musáceas, ya que modificó el manejo de las plantaciones principalmente los programas de aspersión de fungicidas. Esto trajo como consecuencia el incremento en los costos de producción. (Orozco-Santos, 2001).

Productos comerciales existentes para combatirla

En la actualidad existen una gran cantidad y variedad de productos comerciales que combaten la Sigatoka, los cuales se aplican mediante técnicas de aspersión, en las cuales el producto es esparcido a manera de simular una lluvia. A continuación, enlistaremos algunos de los más reconocidos.

–Siganex®: desarrollado por Bayer de México S.A de C.V, siendo un fungicida sistémico local de aplicación foliar, controlando la Sigatoka negra sin manchar la fruta (Bayer. 2020).

–Cumora®: desarrollado por BASF, siendo un fungicida sistémico que previene y cura la enfermedad de la Sigatoka, inhibiendo el proceso de respiración celular (BASF SE. 2023).

–OS.60® SC, Lanzador®, Mastercop®: desarrollados por grupo ADAMA, son fungicidas y bactericidas a base de Cobres, Azufres y Folpet que impiden el crecimiento de patógenos (ADAMA. 2023).

Alternativas para el combate a la Sigatoka

En los últimos años, se han desarrollado una serie de opciones menos contaminantes o naturales para combatir al hongo de la Sigatoka. Estas opciones ofrecen un enfoque más sostenible para proteger el cultivo del plátano y banano, sin comprometer la seguridad alimentaria. A continuación, se mencionan las más importantes:

1) Biocontrol

El biocontrol es el uso de organismos vivos para controlar plagas y enfermedades. En el caso del hongo de la Sigatoka, se han desarrollado una serie de hongos antagonistas que pueden competir con el hongo patógeno por los recursos. También, se han desarrollado bacterias que producen sustancias antifúngicas. Entre los antagonistas más estudiados se encuentran la *Trichoderma harzianum* y *Metarhizium anisopliae* (Xiao et al., 2023), los cuales se pueden observar en las Figuras 4 y 5, respectivamente. Estos hongos pueden además producir sustancias antifúngicas. Por otra parte, se ha reportado el uso de bacterias *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus subtilis*, las cuales producen sustancias antifúngicas que pueden ayudar a controlar la infección por el hongo de la Sigatoka (Bubici et al., 2019).

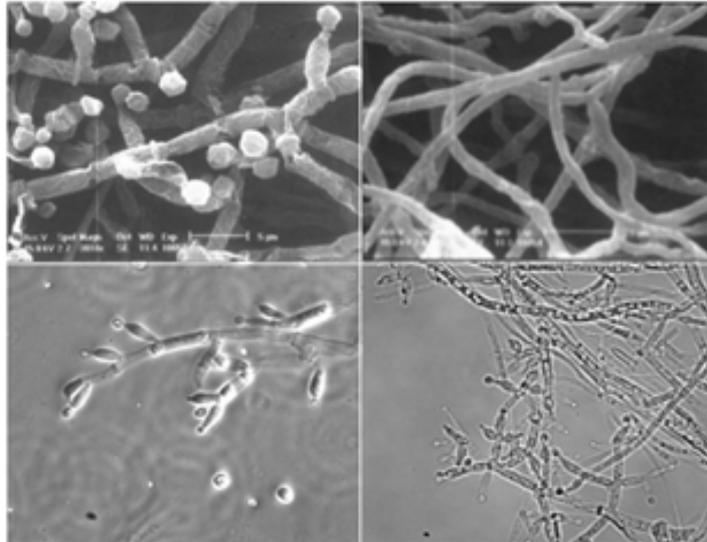


Figura 4. *Trichoderma harzianum* microscopía electrónica (arriba) y óptica (abajo). (Benítez, 2004).

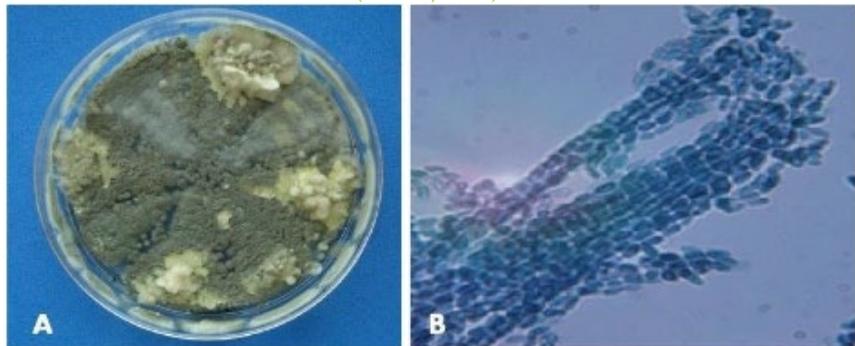


Figura 5. Características macroscópicas y microscópicas de *Metarhizium anisopliae*. (Padilla, 2022)

La resistencia varietal es la capacidad de las plantas para resistir la infección por plagas y enfermedades. En el caso del hongo de la Sigatoka, se han desarrollado una serie de variedades de plátano que son resistentes a la infección por el hongo. Entre las variedades de plátano y banano resistentes al hongo de la Sigatoka más importantes, se puede mencionar a la FHIA-18, FHIA-21 y FHIA-25 (Brenes-Gamboa. et al, 2017).

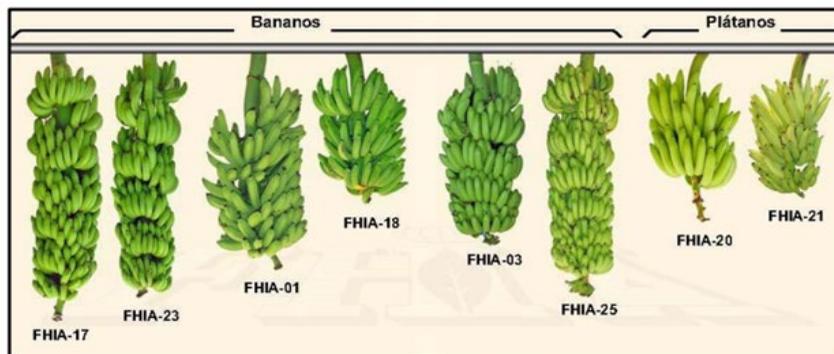


Figura 6. Híbridos de banano y plátano (Pacheco, s. f.)

4) Manejo integrado de plagas

El manejo integrado de plagas (MIP) es un enfoque holístico que combina diferentes métodos para controlar plagas y enfermedades. En el caso del hongo de la Sigatoka, el MIP puede incluir técnicas como la rotación de cultivos, el control biológico y el uso de fungicidas químicos de forma selectiva (L-Pérez, et al., 2021).

5) Biopesticidas

Los biopesticidas, son productos naturales que se utilizan para controlar las plagas y enfermedades. Los biopesticidas pueden ser extractos de plantas, microorganismos o sustancias sintéticas (Anak Agung Ketut Darmadi. et al., 2019). Estos pueden también contener nanopartículas para potenciar su efecto inhibitorio, ya que gracias a su tamaño (1 a 100 nanómetros), cuentan con propiedades únicas que les hacen adecuadas para su uso en pesticidas ya que pueden proporcionar:

- Mayor Eficiencia. Las nanopartículas pueden mejorar la eficiencia de los pesticidas al aumentar su solubilidad, permeabilidad y biodisponibilidad. Las nanopartículas que han sido reportadas con mayor efectividad son de plata (Mahfouze, 2020).
- Esto significa que se necesita una menor cantidad de pesticida para lograr el mismo efecto, lo que reduce el impacto ambiental.
- Mayor especificidad. Las nanopartículas pueden ser diseñadas para que sean más específicas para los objetivos deseados, como por ejemplo combatir a la Sigatoka, lo que reduce el riesgo de dañar a otros organismos, como los insectos polinizadores.

•Mayor duración. Las nanopartículas pueden ser diseñadas para liberar el pesticida de forma controlada, lo que prolonga su efecto y reduce la necesidad de aplicaciones frecuentes.

6) Mezcla Botánica

Se realizan mezclas de varias plantas botánicas como ajo, cempasúchil, jengibre, nimbo de la India, cálamo aromático, cúrcuma y madre de cacao para el combate de la Sigatoka (Dissanayake M, 2023).

Estas opciones están todavía en desarrollo, pero ofrecen un potencial para reducir el impacto ambiental del cultivo del plátano y mejorar la seguridad alimentaria.

Recomendaciones para los productores de banano y plátano

De acuerdo con (Pacheco, n.d.) se pueden dar las siguientes recomendaciones:

- 1.Desarrolle habilidades para reconocer los síntomas de la enfermedad, aplicar medidas de control y realizar un pronóstico de su evolución.
- 2.Estar informado sobre la necesidad de aplicar un fungicida, preferentemente de origen natural. Existen metodologías que utilizan fungicidas, independientemente de su origen, en función de la evaluación del riesgo y los resultados del monitoreo de los indicadores biológicos y climáticos.
- 3.Es importante que los productores de banano y plátano, sean orgánicos o convencionales, realicen las labores de manejo culturales de manera conjunta (deshoje y biselado), no de forma individual.
- 4.En zonas productoras compartidas por varias asociaciones, los productores deben aplicar fungicidas de manera conjunta y en el mismo momento, en función de la evaluación del pronóstico biológico. De lo contrario, las infecciones y la producción de esporas de las fincas no tratadas atacarán las plantaciones que se hayan tratado con productos orgánicos y/o químicos.
- 5.Realice periódicamente (por lo menos dos veces al año), análisis de suelo y foliar, manejo de raíces y de plagas de suelo, para aumentar la resistencia natural de la planta, ante el ataque de la enfermedad.
- 6.Una plantación es menos susceptible a ser atacada por la Sigatoka cuando el productor tiene un buen manejo de los siguientes aspectos:
 - a.Fertilización de los suelos y nutrición de las plantas
 - b.Uso del agua con un riego adecuado y a tiempo.
 - c.Monitoreo de la Sigatoka
 - d.Despunte, deshoje y biselado de las partes afectadas y/o necrosadas

de las hojas

e. Buen mantenimiento de los drenajes

f. Programa de aplicación de fungicidas

Conclusiones

La presencia de la Sigatoka en México ha causado grandes pérdidas en las regiones productoras de plátano. En la actualidad el combate de la enfermedad depende del uso de productos químicos que tienen un impacto ambiental negativo y causan problemas a la salud humana, debido a la técnica de aspersión, que, del mismo modo, suele contaminar cuerpos de agua y productos alimenticios causando toxicidad e interfiriendo con funciones neuroendocrinas en los organismos. Es por ello que consideramos de suma importancia el dar a conocer ciertas alternativas para combatir el hongo de la Sigatoka, en las que se busca no dañar el medio ambiente, la salud de los productores y consumidores, ayudando a mantener la producción de este producto tan importante en nuestro país. Finalmente, exhortamos a la comunidad científica a continuar con las investigaciones relacionadas al desarrollo de nuevos productos que puedan contribuir a combatir esta enfermedad.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

AGRADECIMIENTOS:

D-A. Granada-Ramírez agradece al CONAHCyT por la beca posdoctoral de “Estancias Posdoctorales por México para la Formación y Consolidación de las y los Investigadores por México” y a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (VIEP-BUAP).

REFERENCIAS

- Alzate Acevedo, S., Díaz Carrillo, Á. J., Flórez-López, E., & Grande-Tovar, C. D. (2021). Recovery of banana waste-loss from production and processing: A contribution to a circular economy. *Molecules* (Basel, Switzerland), 26(17), 5282. <https://doi.org/10.3390/molecules26175282>
- America, C. L. (2017). Sigokota negra en plátano: ciclo de vida, nombre científico y fungicidas - Croplife Latin America. *Croplifela.org*. <https://croplifela.org/es/plagas/listado-de-plagas/sigatoka-negra>
- ANA L. PADILLA-GONZÁLEZ, A. LAURA FLORES-VILLEGAS, BERENICE JIMÉNEZ-SANTIAGO, CONCHITA TORIELLO, MARTHA BUCIO-TORRES, PAZ MARÍA SALAZAR-SCHETTINO, MAURO O. VENCES-BLANCO Y MARGARITA CABRERA-BRAVO. (s/f). Chinchas besuconas contra hongos come insectos: una batalla biológica. *Cicy.mx*. Recuperado el 3 de marzo de 2024, de https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2022/2022-07-07-Padilla-et-al.-Las-chinchas-besuconas.pdf
- Benítez, T., Rincón, A., Limón, M., & Codón, A. C. (2004). Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International microbiology: the official journal of the Spanish Society for Microbiology*, 7(4), 249–260. <https://doi.org/10.2436/IM.V7I4.9480>
- Black sigatoka (Sigatoka negra - Español). (2003). Black Sigatoka (Sigatoka Negra - Español). <https://www.apsnet.org/edcenter/disandpath/fungalasco/pdlessons/Pages/BlackSigatokaEspanol.aspx>
- Brenes-Gamboa, S. (2017). Parámetros de producción y calidad de los cultivares de banano FHIA-17, FHIA-25 y Yangambi. *Agronomía mesoamericana: organo divulgativo del PCCMCA, Programa Cooperativo Centroamericano de Mejoramiento de Cultivos y Animales*, 28(3), 719. <https://doi.org/10.15517/ma.v28i3.21902>
- Bubici, G., Kaushal, M., Prigigallo, M. I., Gómez-Lama Cabanás, C., & Mercado-Blanco, J. (2019). Biological control agents against Fusarium wilt of banana. *Frontiers in microbiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00616>
- Caffarra, A. (2022, mayo 30). Sigatoka negra del banano: síntomas, control e indicadores. *itk - Predict and Decide; itk*. <https://www.itk.fr/es/noticias/cercosporiose-noire-du-banancier-symptomes-controle-et-indicateurs/>
- Cañada, O. A. B. (2018, febrero 2). Estadísticas de producción de plátano en México. *Blog Agricultura*. <https://blogagricultura.com/estadisticas-platano-mexico/>
- Chillet, M., Abadie, C., Hubert, O., Chilin-Charles, Y., & de Lapeyre de Bellaire, L. (2009). Sigatoka disease reduces the greenlife of bananas. *Crop Protection* (Guildford, Surrey), 28(1), 41–45. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.08.008>
- Cumora® - fungicida para banano: Ficha técnica. (2023). *Basf.com*. <https://agriculture.basf.com/mx/es/proteccion-de-cultivos-y-semillas/productos/cumora.html>
- Darmadi, A. A. K., Sudirga, S. K., Suriani, N. L., & Wahyuni, I. G. A. S. (2019). Antifungal Activities Of Cinnamon Leaf Extracts Against Sigatoka Fungus (*Pseudocercospora Fijiensis*). *IOP conference series. Earth and environmental science*, 347(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/347/1/012051>
- de Economía, S. (2012). Monografía del sector plátano en México: Situación actual y oportunidades de mercado. *Gob.mx*. https://www.economia.gob.mx/files/Monografia_Platano.pdf
- Dissanayake, M., Herath, H., Jayasekara, H. M., & Abeywickrame, P. D. (2023). Efficacy of botanical mixture and fungicides to combat sigatoka disease in banana cultivation. *Asian journal of mycology*. <https://doi.org/10.5943/ajom/6/2/2>
- FITOPATOLOGÍA GENERAL: ENFERMEDADES EN EL CULTIVO DE BANANO. (2015). *Blogspot.com*. <https://fitoagro.blogspot.com/2015/09/fitopatologia-general-enfermedades-en.html>

- Gilberto Manzo Sánchez, Salvador Guzmán González, Cecilia Mónica Rodríguez García, Andrew James, Mario Orozco Santos. (2005). *BIOLOGÍA DE MYCOSPHAERELLA FIJIENSIS MORELET Y SU INTERACCIÓN CON MUSA SPP.* Repositorioinstitucional.mx. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1397/1/id38740_Gilberto_Manzo.pdf
- La nueva alternativa contra la Sigatoka. Bayer. (2023). <https://www.micultivo.bayer.com.mx/es-mx/productos/product-details.html/fungicidas/siganex.html#:~:text=Signanex%C2%AE%20es%20un%20fungicida,resistencia%20cruzada%20con%20otros%20productos>
- La Sigatoka negra en bananos y plátanos: (2004). Repositorioinstitucional.mx. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1002/1/PCB_M_Tesis_2014_Jose_Cruz_Gutierrez.pdf
- Luna, V., & Elizabeth, M. (2019). “Manejo y prevención de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) en el cultivo de banano, en la hacienda Banaloli 1, zona de Babahoyo. Babahoyo: UTB, 2019.
- Mahfouze H.A, El-DougDoug N.K, Mahfouze S.A. (2020). https://www.researchgate.net/publication/347348176_virucidal_activity_of_silver_nanoparticles_against_banana_bunchy_top_virus_bbtv_in_banana_plants. Researchgate.net. https://www.researchgate.net/publication/347348176_Virucidal_activity_of_silver_nanoparticles_against_Banana_bunchy_top_virus_BBTV_in_banana_plants
- Martínez, I., Villalta, R., Soto, E., Murillo, G., & Guzmán, M. (2011). Manejo de la Sigatoka negra en el cultivo del banano. Corbana.co.cr. <https://www.corbana.co.cr/wp-content/uploads/HD-n.%C2%B0-2-2011-Manejo-de-la-Sigatoka-negra.pdf>
- Nadal-Medina, R., Manzo-Sánchez, G., Orozco-Romero, J., Orozco-Santos, M., & Guzmán-González, S. (2009). DIVERSIDAD GENÉTICA DE BANANOS Y PLÁTANOS (*Musa* spp.) DETERMINADA MEDIANTE MARCADORES RAPD. *Revista fitotecnia mexicana*, 32(1), 1–7. <https://doi.org/10.35196/rfm.2009.1.1-7>
- Pacheco, A. R. (2021, enero 1). Programa de Banano y Plátano, Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. Org.hn. http://www.fhia.org.hn/html/Programa_de_Banano_y_Platano.html
- Parra Pachón, O. J., Cayón Salinas, D. G., & Polanía Vorenber, J. (2009). Descripción morfoagronómica de materiales de plátano (*Musa* AAB, ABB) y banano (*Musa* AAA) cultivados en San Andrés Isla. *Acta agronomica*, 58(4), 292–298. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169916220009>
- Propiedades funcionales del plátano (*Musa* sp). (2014). [www.uv.mx](http://www.uv.mx/rm/num_anteriores/revmedica_vol14_num2/articulos/propiedades.pdf). https://www.uv.mx/rm/num_anteriores/revmedica_vol14_num2/articulos/propiedades.pdf
- Protección contra Sigatoka Negra. (2023, mayo 31). ADAMA América Central y Caribe. <https://www.adama.com/central-america/es/articulo/proteccion-contra-sigatoka-negra>
- Ricardo, F. Á. S., & Vicente, L. F. P. (2021). Tacticas estrategicas para el manejo integrado de plagas y enfermedades en banano / Strategic tactics for the integrated management of pests and diseases in banana. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 4(4), 4973–5000. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n4-014>
- Vasco, E. D. (2023, febrero 27). ¿En qué se diferencian un plátano y una banana? *El Diario Vasco*. <https://www.diariovasco.com/gastronomia/despensa/diferencian-platano-banana-20230220114456-nt.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.diariovasco.com%2Fgastronomia%2Fdespensa%2Fdiferencian-platano-banana-20230220114456-nt.html>
- Xiao, Z., Zhao, Q., Li, W., Gao, L., & Liu, G. (2023). Strain improvement of *Trichoderma harzianum* for enhanced biocontrol capacity: Strategies and prospects. *Frontiers in microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1146210>

NANOMATERIALES DE CARBONO PARA LIBERACIÓN DE FÁRMACOS.

CARBON NANOMATERIALS FOR PHARMACY LIBERATION.

Daladier Alonso Granada Ramírez 1
Yesmin Panecatl Bernal²
Miguel Angel Méndez Rojas³
José Joaquín Alvarado Pulido1(*)

<http://orcid.org/0000-0001-9933-4921>
<http://orcid.org/0000-0001-9330-4123>
<http://orcid.org/0000-0002-4758-3763>
<http://orcid.org/0000-0002-4758-3763>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

¹ Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores, Instituto de Ciencias, ICUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. 14 Sur y Av. San Claudio, Col. San Manuel, Puebla, Puebla, C.P. 72560, México.

² Universidad Politécnica de Puebla, Ingeniería Industrial, Tercer Carril del Ejido, Serrano s/n, Cuanalá, 72640 Puebla, México

³ Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de las Américas Puebla, EXHda. Sta. Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, 72810 Puebla, México.

col537329@colaborador.buap.mx
yesmin.panecatl369@uppuebla.edu.mx
miguela.mendez@udlap.mx

joaquin.alvarado@correo.buap.mx

(*) Autor de correspondencia

RESUMEN

En los últimos años, el avance alcanzado en el desarrollo de las aplicaciones biomédicas se ha dado de forma significativa, debido principalmente, al gran esfuerzo que ha tenido la comunidad científica internacional en temas relacionados a la nanociencia y nanotecnología, en especial en el estudio y desarrollo de nanopartículas, las cuales son estructuras que tienen tamaños menores a los 100 nanómetros. Las nanopartículas están conformadas por unos pocos cientos de átomos, lo que genera que sus propiedades sean únicas y cambien considerablemente a nivel macrométrico. Dentro de la familia de materiales nanoestructurados, con propiedades únicas se encuentran las nanopartículas de carbono, las cuales son muy versátiles debido a que presentan diferentes tipos de estructuras, lo que las convierte en extraordinarias opciones para su uso como transportadores de fármacos, lo cual las hace una prominente opción para su uso en el área oncológica, en especial para los tratamientos contra cáncer. En este trabajo exploramos el fascinante mundo de los nanomateriales, con propiedades excepcionales para la liberación de fármacos. Tales como las sorprendentes nanoestructuras de carbono, compuestas por nanotubos y grafeno, con resistencia y biocompatibilidad ideales para aplicaciones biomédicas. La importancia principal es que estos avances prometedores anticipan una revolución en el diagnóstico, tratamiento y prevención de enfermedades, lo cual en un futuro puede llegar a redefinir el futuro de la medicina.

Palabras clave: Nanomateriales, liberación de fármacos, carbón, grafeno.

INTRODUCCIÓN

¿Cómo influye la forma de liberación de fármacos en el cuerpo?

Actualmente, una problemática que existe en el área de fármacos son los efectos adversos de los medicamentos, una causa puede ser la forma de liberación del fármaco en el cuerpo. De acuerdo con Daphne E. y cols. (2023) la inadecuada liberación de fármacos puede causar toxicidad o sobredosis. En la vanguardia de la nanotecnología, se ha despertado un considerable interés

ABSTRACT

In recent years, significant progress has been made in the development of biomedical applications, primarily due to the tremendous effort of the international scientific community in nanoscience and nanotechnology, especially in the study and development of nanoparticles, which are structures with sizes smaller than 100 nanometers. Nanoparticles are composed of a few hundred atoms, which makes their properties unique and considerably different at the macroscopic level. Among the family of nanostructured materials with unique properties are carbon nanoparticles, which are very versatile due to their various structures, making them exceptional options for use as drug carriers. This makes them a prominent choice for oncological applications, especially in cancer treatment. In this work we explore the fascinating world of nanomaterials with exceptional properties for drug delivery. such as the surprising carbon nanostructures, composed of nanotubes and graphene, with resistance and biocompatibility ideal for biomedical applications. The main importance is that these promising advances anticipate a revolution in the diagnosis, treatment and prevention of diseases, which in the future may redefine the future of medicine.

Keywords: nanomaterials, drug delivery, carbon, graphene.

científico en crear tecnologías innovadoras para el tratamiento de enfermedades. De acuerdo con la Agenda 2030 esta investigación aporta a la ODS 3 Salud y Bienestar

¿Cuáles son las diferentes formas de liberación de un fármaco?

Existen diferentes formas de liberación de fármacos tales como los mostrados en la figura 1. La forma de liberación acelerada consiste en una disolución rápida del fármaco sin necesidad de administración de líquidos, es decir son los comprimidos efervescentes en contacto con la saliva como la aspirina. La diferencia con la liberación diferida es que evita la gastrolesividad (sangrado, perforación o úlcera del intestino) del fármaco debido a que tienen una cubierta gastrorresistente, la cápsula contiene una recubierta de una membrana polimérica y su liberación es pulsátil como omeprazol. Sin embargo, en el sistema de liberación prolongada se libera inicialmente en proporción suficiente para producir su efecto, y después, de manera lenta con una velocidad constante, manteniendo la concentración eficaz durante más tiempo, por ejemplo medicamento para enfermedades cardiovasculares como metoprolol succinate. Finalmente, el sistema flotante y bioadhesivos consiste en aumentar el período de residencia gástrico a través de matrices poliméricas biodegradables como las cápsulas Madopar que son para la enfermedad de mal de Parkinson. Caracuel A. M., (2020).

Figura 1. Representación esquemática de las diferentes formas de liberación de fármacos, fuente propia.

¿Cuáles son los materiales que se usan para los sistemas de liberación de fármacos?

Comúnmente los materiales que se ocupan para la liberación de fármacos son polímeros. Sin embargo, con la nanotecnología han encontrado diversos nanomateriales para el sistema de liberación de fármacos como son: nanopartículas orgánicas como polímeros e inorgánicas como metales, cerámicos y óxidos

de carbono. Además, nanopartículas híbridas, es decir tienen una parte orgánica e inorgánica. Así, como hidrogeles. Contreras-Camach M y cols (2023) y Rojas-Aguirre Y. (2016).

Ante este escenario, los nanomateriales de carbono como grafeno, grafito, fullerenos, nanotubos de carbono, puntos cuánticos de carbono desempeñan un papel crucial como acarreadores de fármacos (drug delivery), debido a que han ganado prominencia en diversas investigaciones. Estos nanomateriales de carbono pueden usarse en la liberación de fármacos debido a que no modifican las características fisicoquímicas del fármaco y son resistentes a la degradación durante el tránsito por el interior del cuerpo, Loera-Serna y cols. (2021).

Los nanomateriales de carbono tienen aplicaciones en el área de biomedicina para la liberación de fármacos, debido a sus propiedades que poseen como alta área superficial, excelentes propiedades mecánicas y eléctricas, ver Figura 2. A continuación se mencionan algunos autores como Parand R. y cols. (2021)., Maiti D., y cols. (2019), Zahra S. (2021) que han realizado investigación en esta área. Mahor A y cols (2021).

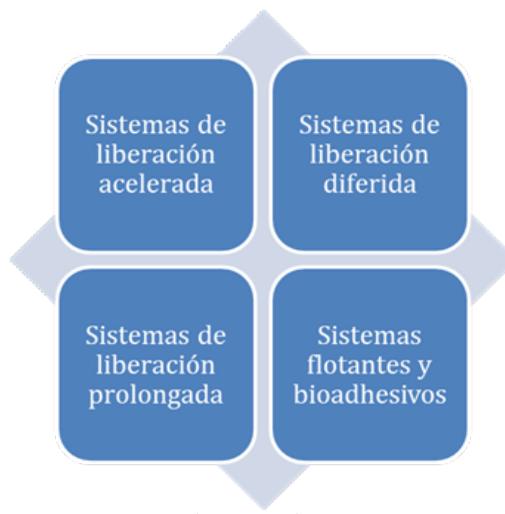


Figura 1. Representación esquemática de las diferentes formas de liberación de fármacos, fuente propia.

Liberación de Fármacos

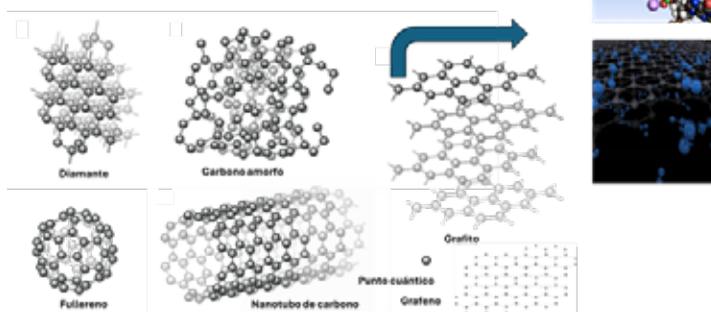


Figura 2. Representación esquemática de nanomateriales de carbono para liberación de fármacos. Fuente propia.

Estos nanomateriales emergen como potenciales transportadores de fármacos, capaces de dirigirse con mayor precisión a diversos puntos de interés. Su tamaño y forma permiten la reducción de dosis, mitigando así efectos secundarios. Esto los postula como sustitutos no tóxicos y más eficientes que las opciones actuales en el mercado. En la actualidad, las nanopartículas de carbón se presentan como una alternativa a los métodos convencionales en los tratamientos contra el cáncer basado en quimioterapia, conocido por su alta toxicidad y mayores efectos secundarios Hua X.W., y cols. (2017),

Bao Y.W., y cols. (2018), Deng T., y cols. (2018). A continuación, ahondaremos en las características clave, métodos de síntesis y posibles aplicaciones como acarreadores de fármacos en algunos tipos de nanopartículas de carbono. Los nanotubos de carbono fueron descubiertos por primera vez por Lijima S. (1991), se caracterizan por ser láminas de grafeno enrolladas en forma de un cilindro. De acuerdo con Ali, y cols. (2021) estos materiales se clasifican además en tres tipos según el número de capas que contienen, Single-walled CNTs (SWCNTs), Multi-walled CNTs (MWCNTs) and Double-walled CNTs (DWCNTs).

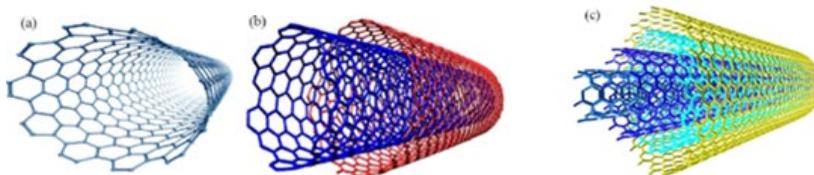


Figura 3. Estructura de los SWCNTs, MWCNTs y DWCNTs Irum R. y cols. (2016), <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1070874>

Los SWCNTs están compuestos por una estructura tubular hecha de una sola hoja de grafeno y tienen un diámetro entre 0.4 nm y 2 nm y una longitud de 0.2 nm a 5 µm. Los MWCNTs están hechos de dos o más cilindros coaxiales, cada uno formado por una sola lámina de grafeno que rodea un núcleo hueco, su diámetro exterior oscila entre 2 y 100 nm, mientras que el diámetro interior está en el rango de 0.4 a 2 nm, y su longitud es de 0.2 nm a varios micrómetros. Los DWCNTs son nanotubos muy similares a los anteriores con

la diferencia que están constituidos por dos, tres o más capas concéntricas que encierran su tubo cilíndrico interior dentro de su tubo exterior ver figura 3. En la actualidad los nanotubos de carbono como transportadores de fármacos se presentan como una alternativa a los métodos convencionales en tratamientos contra el cáncer basados en quimioterapia, los cuales presentan alta toxicidad y mayores efectos secundarios, Vázquez-Hernández, y cols. (2018).

¿Cómo se sintetizan las nanoestructuras de carbono?

Como lo hemos mencionado anteriormente los nanotubos de carbono tienen un tamaño y forma ideales para el transporte, ubicación y reducción en la concentración de los fármacos en las aplicaciones en nanomedicina. Se debe tener en cuenta que las propiedades de los nanotubos de carbono dependen directamente del método de síntesis utilizado, cuya elección está fuertemente influenciada por la aplicación deseada. En particular Granada-Ramirez D.A., y cols. (2018) hace mención sobre algunos otros métodos de síntesis de estos materiales son el método de descarga por arco, el método de ablación por láser y el método de deposición química de vapor (CVD), Vázquez-Hernández, y cols. (2018) y Granada-Ramirez D.A, y cols. (2018). Debido al gran avance en la tecnología en la actualidad existen otros métodos de síntesis adicionales muy importantes tales como:

•**Método de síntesis de llama (Flame synthesis method):** En este método de síntesis son necesarios tres componentes, una fuente de carbono, partículas de catalizador metálico los cuales pueden ser metales de transición como Fe o Ni y una fuente de calor. Durante el proceso de síntesis se genera una combustión de hidrocarburos y diminutos catalizadores metálicos en aerosol en un entorno de llama controlada. Para llevar a cabo dicho proceso, se necesita una llama rica en combustible es un entorno rico en carbono y de alta temperatura, el cual favorece las reacciones de deposición

de carbono que con la ayuda de un catalizador proporcionar sitios de reacción para la deposición de carbono negro sólido, Vander Wal RL, y cols. (2000).

•**Método de solución de silano (Silane solution method):** Este método consiste en que un sustrato el cual puede ser (papel carbón o malla de acero inoxidable) se sumerge en una solución de silano con un catalizador metálico (Co:Ni), en una proporción de 1:1, al cual se inserta un gas de alimentación que contiene una fuente de carbono (etileno), el cual pasa a través del sustrato, depositando el catalizador en el mismo a medida que se proporciona calentamiento al sustrato utilizando una corriente eléctrica, Jashandeep K., y cols. (2019).

•**Método de pirólisis por pulverización nebulizada (Nebulized spray pyrolysis method):** Este método utiliza un nebulizador ultrasónico, el cual rocía ferroceno (catalizador) y etanol (como solvente y fuente de carbono) en un horno tubular a una temperatura fija de 800 °C bajo un flujo de argón de 1 L/min. En este caso el etanol se usa como solvente y como fuente de carbono, Rao C., y cols. (2004)

Antes de usar las nanoestructuras de carbono para una aplicación específica como la liberación de fármacos se deben de eliminar impurezas principalmente, carbono amorfo, se realiza un proceso de purificación que a continuación se menciona cómo se realiza:

Métodos de purificación de nanoestructuras de carbono

Posterior al proceso de síntesis de las nanoestructuras, existen diferentes métodos de purificación de las nanoestructuras de carbono. Esto se debe principalmente a que, durante los diferentes procesos de síntesis de los SWCNTs, MWCNTs and DWCNTs, se produce una descomposición catalítica de compuestos generando con ello una gran variedad de impurezas tales como partículas metálicas, grafito, carbono amorfo, fullerenos entre otros. Por lo tanto, se hace necesario eliminar todas las impurezas presentes y así poder aislar los los SWCNTs, MWCNTs and DWCNTs según sea el caso para así poder ser usados en posibles aplicaciones en nanomedicina, Vázquez-Hernández, y cols. (2018) y D. A. Granada-Ramírez, y cols. (2018). En la actualidad se han establecido algunos métodos de purificación para las Nanoestructuras de carbono particularmente D. A. Granada-Ramírez hace referencia a algunos en su trabajo, Vázquez-Hernández, y cols. (2018) y D.A Granada-Ramírez, y cols. (2018), adicionalmente en la actualidad existen algunos otros métodos que son usados con mayor frecuencia tales como:

•**Tratamiento con ácido:** El objetivo de este método es el de eliminar el catalizador metálico utilizado en el proceso de síntesis. Para ello se genera un proceso de oxidación o sonicación sobre la superficie del metal; posteriormente el catalizador metálico se expone a un ácido (ácido nítrico) y se solvata, generando de esta manera que los SWCNT permanecen en suspensión, lo que permite que posteriormente la recolección de estos, Rummeli M., y cols. (2005).

•**Purificación magnética:** es un proceso en el cual se eliminan mecánicamente las partículas ferromagnéticas de las capas de grafito, generando con ello que las partículas catalíticas se eliminan, Paliwal S., y cols. (2020)

•**Cromatografía de exclusión por tamaño:** Este método consiste en la separación de SWCNT semiconductores y metálicos, por medio de la cromatografía de exclusión por tamaño de nanotubos de carbono dispersos por DNA (DNA-SWCNT), Huang X. y cols. (2005)

A continuación, se muestran algunos reportes de algunos autores acerca de la aplicación de las nanoestructuras de carbono para la liberación de fármacos:

Aplicaciones de síntesis de nanoestructuras de carbono

Una vez obtenidas y purificadas las Nanoestructuras de carbono, se proceden a ser usadas en diferentes ámbitos, las cuales van desde las aplicaciones en biomedicina, optoelectrónica, dispositivos neuromórficos entre otras. En particular para nuestro caso la mayor expectativa científica gira en torno a los nanomateriales de carbono con sus posibles aplicaciones en nanomedicina, especialmente para el transporte de fármacos. A continuación mencionaremos algunas de las aplicaciones más relevantes:

•**Aplicaciones de los CNT como portadores de fármacos:** En el caso de nanotubos de carbono

la aplicabilidad biomédica de los mismos está limitada por su baja solubilidad en disolventes orgánicos acuosos y no polares; la solubilidad acuosa es esencial para su uso en sistemas biológicos. Por esta razón, los CNT deben modificarse químicamente para lograr esta propiedad. Actualmente, la funcionalización de la superficie de los nanotubos de carbono es una de las técnicas más prometedoras que se utilizan. La funcionalización reduce la toxicidad causada por las superficies altamente hidrofóbicas de los CNT. Esta ventaja es posible gracias a la adición de diferentes grupos funcionales a las paredes de los nanotubos de carbono, lo que hace

que las estructuras tubulares sean solubles en soluciones acuosas y menos dañinas para las células y, por lo tanto, biocompatibles, Hahm M., y cols. (2011). Existen dos métodos de funcionalizar los nanotubos de carbono: la funcionalización covalente y la funcionalización no covalente. La funcionalización covalente modifica las paredes de los nanotubos utilizando grupos funcionales que contienen oxígeno (como ácido carboxílico, acetona, alcohol y éter) seguido de un tratamiento oxidativo para eliminar el carbono amorfo,

las partículas de catalizador metálico y los tubos con diámetros más pequeños que los requeridos. La funcionalización no covalente utiliza diferentes tipos de interacciones no covalentes, incluido el apilamiento π , las fuerzas de van der Waals y las interacciones hidrofóbicas, para funcionalizar los CNT Xia Q., et al (2020). Los CNT como sistemas de administración de fármacos se han estudiado ampliamente en los últimos años para su uso en la terapia del cáncer Xia Q., y cols. (2020) ver Fig. 4.

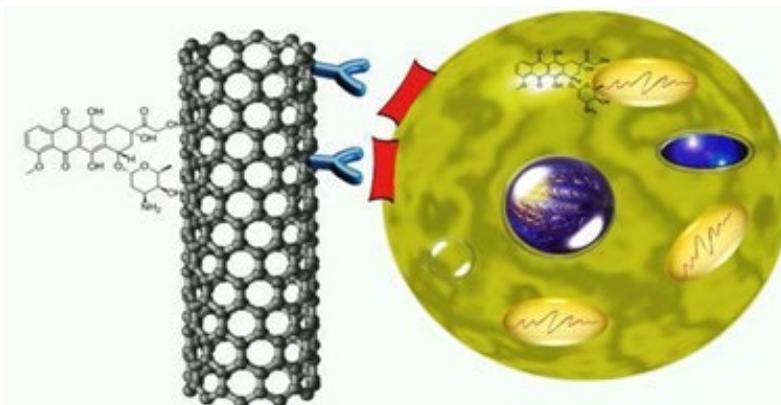


Figura 4. Representación esquemática de los un SWCNT funcionalizado anclado a un fármaco para la administración de fármacos a las células, Xia Q., et al (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108231>

Se han llevado a cabo varios estudios que exploran el potencial de carga de nanotubos de carbono con diferentes fármacos para el uso de la terapia contra el cáncer Chuyi H., y cols. (2021), Otros fármacos que se están utilizando actualmente con nanotubos de carbono en tratamientos contra el cáncer son la doxorubicina y paclitaxel, Lyra K., y cols. (2021). Otros compuestos utilizados son los droxidopa, Yoosefian M., y cols. (2019). Sin embargo, el uso de nanotubos de carbono como portadores de fármacos presenta varias desventajas que deben abordarse antes del uso clínico, incluida una menor retención en las células cancerosas y la resistencia emergente a múltiples fármacos, Zhang C., y cols. (2021).

•Aplicaciones de grafeno como portadores de fármacos: El grafeno se compone de una capa individual de átomos de carbono organizados en un patrón regular hexagonal con hibridación sp^2 densamente empaquetados, el descubrimiento de dicho material se debe a GeimK. S., y cols. (2004). Una de las mayores ventajas que presenta el grafeno desde el punto de vista de las aplicaciones en nanomedicina, son su forma y que se puede funcionalizar químicamente, logrando con esto la posibilidad de dispersarse en diferentes disolventes tales como el agua entre otro, lo que nos permite ser usado como un posible acarreador de medicamento a escala nanométrica, además que presenta una gran conductividad eléctrica y térmica, Wang Z., y cols. (2017) ver Fig. 5.

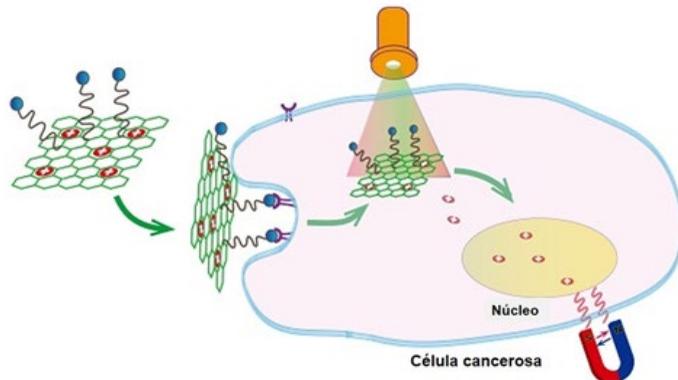


Figura 5. Representación esquemática de grafeno sensibles a estímulos para la administración controlada de moléculas terapéuticas, Wang Z., et al (2017). <https://doi.org/10.3390/app7111175>.

En la actualidad los científicos de todo el mundo han encontrado para el grafeno varias aplicaciones en la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades, lo que implica un campo de acción gigante en la nanomedicina, Juan P. G, et al (2022). Dentro de las aplicaciones como transportador de fármacos para el grafeno se destacan las siguientes investigaciones, Gu Z., y cols. (2019).

•**Aplicaciones de los fullerenos como portadores de fármacos:** La familia de los fullerenos es la tercera forma alotrópica de carbono, Vázquez-Hernández, et al (2018)

y D.A Granada-Ramirez, y cols. (2018). Estos materiales se particularizan de moléculas compuestas exclusivamente por átomos de carbono. Los fullerenos se pueden clasificar en tres categorías según su forma, Vázquez-Hernández, y cols. (2018) y D.A Granada-Ramirez, y cols. (2018): Fullerene C60 tiene forma esférica y está compuesto por 60 átomos de carbono. Las láminas de grafeno tienen una forma plana alargada entre otros. Dentro de las aplicaciones de los fullerenos como portadores de fármacos más sobresalientes se encuentran las siguientes investigaciones, Shi J., y cols. (2013) ver Fig. 6.

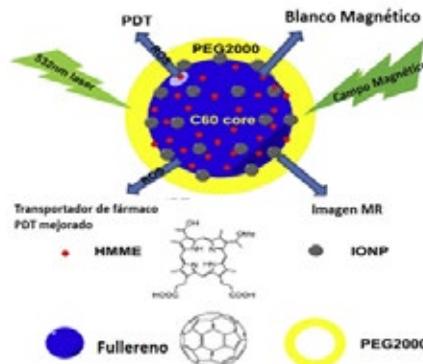


Figura 6. Esquema de C60-IONP-PEG/HMME y sus biofunciones, Shi J., et al (2013), <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2013.08.049> administración controlada de moléculas terapéuticas, Wang Z., et al (2017). <https://doi.org/10.3390/app7111175>.

•**Otras estructuras:** Adicionalmente existen otras nanoestructuras llamados puntos cuánticos de grafeno (GQDs) y carbon dots (CDs), los cuales son usados también como transportadores de fármacos, ver Fig. 7. Los puntos cuánticos de carbono y grafeno (CQD y GQD), conocidos como nanomateriales de dimensión cero (0D), han generado una gran expectativa científica en cuanto a aplicaciones biomédicas se refiere, debido

principalmente a sus múltiples propiedades entre las que se encuentran, excelentes propiedades electrónicas, fluorescentes, fotoluminiscentes, quimioluminiscentes, electroquimioluminiscencia, Nayab A., y cols. (2021) baja toxicidad intrínseca, alta solubilidad en muchos solventes, gran área de superficie, abundantes sitios de borde para la funcionalización y gran biocompatibilidad Wu H., y cols. (2021).

Conclusiones

Las nanoestructuras de carbono como los nanotubos de carbón, grafeno, fullerenos, puntos cuánticos de carbono (carbon quantum dots) y carbón dots son materiales especiales y especiales. Tienen muchas formas, tamaños y estructuras diferentes. Estos materiales pueden ser modificados por la funcionalización química en diferentes formas dependiendo del tipo de nanoestructura.

Una vez se realizó el proceso de funcionalización de las diferentes nanoestructuras de carbono, estas se acoplan a un medicamento anticancerígeno que a su vez es dirigido a la parte del cuerpo donde se desea que llegue dicho medicamento, este proceso de transporte de fármaco a nivel nanométrico generan una reducción en la dosis del fármaco anticancerígeno usado y, en consecuencia puede llegar a disminuir, sus efectos secundarios y aumentar su eficiencia. Por esta razones, las nanoestructuras de carbono son una gran alternativa a los métodos convencionales utilizados en los tratamientos contra el cáncer basados en quimioterapia y se convierte en una excelente posibilidad de mejorar los tipos de tratamientos oncológicos que existen en la actualidad.

Por tanto, los nanomateriales de carbono son una gran alternativa a los métodos convencionales empleados en los tratamientos oncológicos basados en quimioterapia, entre otras.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

AGRADECIMIENTOS:

D-A. Granada-Ramírez agradece al CONAHCyT por la beca postdoctoral de “Estancias Posdoctorales por México para la Formación y Consolidación de las y los Investigadores por México” y a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (VIEP-BUAP).

REFERENCIAS

- Ali, N., Bahman A.M., Aljuwayhel, N.F., Ebrahim, S.A., Mukherjee, S., Alsayegh, A. (2021). Carbon-Based Nanofluids and Their Advances Towards Heat Transfer Applications—A Review. *Nanomaterials* 11 (1628). <https://doi.org/10.3390/nano11061628>.
- Adrita, S.H.; Tasnim, K.N.; Ryu, J.H.; Sharker, S.M. (2020). Nanotheranostic Carbon Dots as an Emerging Platform for Cancer Therapy. *J. Nanotheranostics*. 1 (58-77). <https://doi.org/10.3390/jnt1010006>.
- Contreras-Camach M., Martínez-Luevanos A.,Perez-Berumen C. M., Estrada-Flores S., (2023) Avances en el desarrollo de nanopartículas transportadores de fármacos para el tratamiento de cáncer, *CienciAcierta*, 74. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/cc74/CC%2374completo.pdf>
- Bao Y.W., Hua X.W., Li Y.H., Jia H.R., Wu F.G. (2018). Hyperthermia-Promoted Cytosolic and Nuclear Delivery of Copper/Carbon Quantum Dot-crosslinked Nanosheets: Multimodal Imaging-guided Photothermal Cancer Therapy, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 10 (1544e1555), <https://doi.org/10.1021/acsami.7b15332>.
- Chuyi H., Xianming Z., Fan W., Qinghua Y., Feng C., Di S., Zhangyou Y., Tingting W., Mingyue J., Tao D., Chao Y. (2021). Duplex Metal Co-Doped Carbon Quantum Dots-Based Drug Delivery System With Intelligent Adjustable Size As Adjuvant For Synergistic Cancer Therapy, *Carbon* 183 (789-808), <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.07.063>.
- Daphne E. S. M., Pharm D., B.C.-ADM, CDCES. (2023). University of Illinois at Chicago College of Pharmacy.
- Deng T., Wang J., Li Y., Han Z., Peng Y., Zhang J., Gao Z., Gu Y., Deng D. (2018). Quantum Dots-Based Multifunctional Nano-Prodrug Fabricated by Ingenious Self-Assembly Strategies for Tumor Theranostic, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 10 (27657e27668). <https://doi.org/10.1021/acsami.8b08512>.
- Granada-Ramírez D.A., Arias-Cerón J.S., Rodríguez-Fragoso P., Vázquez-Hernández F., Luna-Arias J.P., Herrera-Pérez J.L., Mendoza-Álvarez J.G. Capítulos 16 y 20 (2018) in *Quantum dots for biomedical applications, Nanobiomaterials*, chapter 16 (411-436), Ed. Roger Narayan, Woodhead publishing, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100716-7.00016-7>
- Geim K. S., , Morozov A. K., , Jiang S. V., Zhang, D., , Dubonos Y., , Grigorieva S.V., , I. V. Firsov, A. A. (2004) Electric Field Effect In Atomically Thin Carbon Films, *Science* 306(5696): 666-669, <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/0410631>.
- Gu Z., Zhu S., Yan L., Zhao F., Zhao Y. (2019). Graphene-Based Smart Platforms For Combined Cancer Therapy. *Adv Mater* 31(1-27).
- Hahm M., Hashim D., Vajtai R., Ajayan P. (2011). A Review: Controlled Synthesis Of Vertically Aligned Carbon Nanotubes. *Carbon Lett.* 12(185). <https://doi.org/10.5714/CL.2011.12.4.185>.
- Huang X., Mclean R., Zheng M. (2005). High-Resolution Length Sorting And Purification Of DNA-Wrapped Carbon Nanotubes By Size-Exclusion Chromatography. *Anal Chem* 77(19) 6225-6228. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.3c07668>
- Hua X.W., Bao Y.W., Chen Z., Wu F.G., (2017). Carbon Quantum Dots With Intrinsic Mitochondrial Targeting Ability for Mitochondria-Based Theranostics, *Nanoscale* 9 (10948e10960). <https://doi.org/10.1039/c7nr03658b>.
- Irum R., Ayesha K., Zanib A, Bakhtiar M. (2016). Exploration of Epoxy Resins, Hardening

- Systems, and Epoxy/Carbon Nanotube Composite Designed for High Performance Materials: A Review, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(3) 312-333. [https://doi: 10.1080/03602559.2015.1070874](https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1070874)
- Juan P. G., Esdras A. Z.-M, Lourdes R.-F. (2022). Chapter, *Advances in Graphene Platforms for Drug Delivery in Cancer and Its Biocompatibility*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.103688>.
- Jashandeep K., Gurlal S. G., Kiran J. (2019). *Characterization And Biology Of Nanomaterials For Drug Delivery*, chapter 5, *Applications of Carbon Nanotubes in Drug Delivery: A Comprehensive Review*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814031-4.00005-2>.
- Lyra, K., Kaminari, A., Panagiotaki, K.N., Spyrou, K., Papageorgiou, S., Sakellis, E., Katsaros, F.K., Sideratou, Z. (2021). Multi-Walled Carbon Nanotubes Decorated With Guanidinylated Dendritic Molecular Transporters: An Efficient Platform For The Selective Anticancer Activity Of Doxorubicin, *Pharmaceutics*. 13(858). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13060858>.
- Lijima S. (1991). Helical Microtubules of Graphitic Carbon. *Nature* 354, (6348-56). [https://doi: 10.1038/354056a0](https://doi:10.1038/354056a0).
- Loera-Serna S, Ruiz-Angeles J, Flores-Moreno J, Soto-Portas L. (2012). Protegiendo fármacos con nanomateriales inteligentes. *Mundo Nano*. 5. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912012000100059
- Maiti D., Tong X., Mou X., Yang K. (2019) Carbon-based Nanomaterials for Biomedical Applications: a Recent Study. *Front Pharmacol*, 9,(1-16). <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01401>
- Mahor A., Singh P.P., Bharadwaj P., Sharma N., Yadav S., Rosenholm J.M , Bansal K.K, (2021), Carbon-based nanomaterials for delivery of biologicals and therapeutics: A cutting-edge technology, *Journal of Carbon Research*, 7, 19. <https://doi.org/10.3390/c7010019>
- Mohd N. N., Asyraf, M.R.M., Khalina, A., Abdullah, N., Sabaruddin, F.A., Kamarudin, S.H., Ahmad, S., Mahat, A.M., Lee, C.L., Aisyah, H.A. (2021). Fabrication, Functionalization, And Application Of Carbon Nanotube-Reinforced Polymer Composite: An Overview. *Polymers* 13(1047). <https://doi.org/10.3390/polym13071047>
- Caracuel A. M., (2020) *Sistemas de liberación controlada de fármacos obtenidos por impresión 3d. Mecanismos de liberación y factores que influyen*, [Tesis de licenciatura, Universidad de Sevilla]. Deposito de investigación Universidad de Sevilla. <https://hdl.handle.net/11441/103272>
- Nayab A., Murtaza N. A., Tooba J. K. (2021). Carbon Quantum Dots For Biomedical Applications: Review And Analysis, *Front. Mater.* 8 <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.700403>.
- PALIWAL S., PANDEY K., PAWAR S., JOSHI H., BISHT N. (2020). A Review On Carbon Nanotubes: As A Nano Carrier Drug Delivery System, *Indian J Pharm Sci.* 82(5):766-772.
- Parand R. R., Roger J. N. (2021). Recent Advances in Carbon Nanomaterials for Biomedical Applications: A Review. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 17(100262), <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100262>.
- Rao C., Govindaraj A., Gundiah G., Vivekchand S. (2004). Nanotubes And Nanowires. *Chem Eng Sci.* 59(4665). <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.07.067>.
- Rojas-Aguirre Y., Aguado-Castrejón K., González-Méndez I., (2016) La nanomedicina y los sistemas de liberación de fármacos: ¿la revolución de la terapia contra el cáncer?, *Educación Química*, 27, 286-291. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2016.07.002>

- Rummeli M., Borowiak-Palen E., Gemming T., Pichler T., Knupfer M., Kalbac M., Dunsch L., Jost O., Silva S., Pompe W., Buchner B. (2005). Novel Catalysts, Room Temperature, And The Importance Of Oxygen For The Synthesis Of Single-Walled Carbon Nanotubes. *Nano Lett* 5(7) 1209-1215. [https://doi: 10.1021/nl050692v](https://doi.org/10.1021/nl050692v)
- Shi J., Xiaoyuan Y., Lei W., Yan L., Jun G., Jing Z., Rou M., Ruiyuan L., Zhenzhong Z. (2013). Pegylated Fullerene/Iron Oxide Nanocomposites For Photodynamic Therapy, Targeted Drug Delivery And MR Imaging. *Biomaterials* 3437(9666-9677). <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2013.08.049>
- Vander Wal RL, Tichich TM, Curtis VE.(2000). Diffusion Flame Synthesis Of Single-Walled Carbon Nanotubes. *Chem Phys Lett.* 323(217-223). [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(00\)00522-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(00)00522-4).
- Vázquez-Hernández F., Granada-Ramírez D.A., Arias-Cerón J.S., Rodríguez-Fragoso P., Mendoza-Álvarez J.G., Ramón-Gallegos E., Cruz-Orea A., Luna-Arias J.P., (2018). Use Of Nanostructured Materials In Drug Delivery, chapter 20, *Nanobiomaterials* <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100716-7.00020-9>
- Wang Z., Colombi C. L., Wei G. (2017). Recent Advances In The Synthesis Of Graphene-Based Nanomaterials For Controlled Drug Delivery. *Applied Sciences.* 7(11) 1175. <https://doi.org/10.3390/app7111175>.
- Wu H., Su W., Xu H. (2021). Applications Of Carbon Dots On Tumour Theranostics. *VIEW.* 2(20200061). <https://doi.org/10.1002/VIW.20200061>.
- Xia Q., Zhang Z., Liu Y., Leng J. (2020). Buckypaper And Its Composites For Aeronautic Applications, *Composites Part B: Engineering*, 199 (108231). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108231>
- Yoosefian M., Jahani M. (2019). A Molecular Study On Drug Delivery System Based On Carbon Nanotube For The Novel Norepinephrine Prodrug, Droxidopa. *J Mol Liq.* 284:258–264. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.04.016>
- Zahra S. (2021). *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 66 (102790) <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102790>.
- Zhang C., Wu L., de Perrot M., Zhao X. (2021). Carbon Nanotubes: A Summary Of Beneficial And Dangerous Aspects Of An Increasingly Popular Group Of Nanomaterials, *Front. Oncol.* 11(693814). doi: 10.3389/fonc.2021.693814.

DE HÉROE A VILLANO: GADOLINIO EN EL DIAGNÓSTICO DE VANGUARDIA COMO REDENCIÓN, A UNA EMERGENTE CONTAMINACIÓN

FROM HERO TO VILLAIN: GADOLINIUM IN
THE AVANT-GARDE DIAGNOSTIC FOR THE
REDEMPTION OF AN EMERGING POLLUTION

Edith Alejandra Alvarez Aguiñaga *
María de la Paz Elizalde González
Lidia Esmeralda García Díaz

<https://orcid.org/0000-0002-3014-1272>
<https://orcid.org/0000-0001-6339-2679>
<https://orcid.org/0000-0002-0193-6519>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

Centro de Química del Instituto de Ciencias
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Ciudad Universitaria, Av. San Claudio, Jardines de San Manuel,
C.P. 72570 Puebla Pue. México

*edith.alvarez@alumno.buap.mx, maria.elizalde@correo.buap.mx,
esmeralda.garcia@correo.buap.mx

RESUMEN

Los complejos de gadolinio son los agentes de contraste más utilizados en estudios de imagenología por resonancia magnética. Estos compuestos son excretados sin metabolizar a través de la orina y circulan en el drenaje donde son propensos a experimentar cambios en su estructura química que propician la liberación del ion gadolinio, que es altamente tóxico. Sin embargo, en forma de complejo o de ion es considerado un contaminante emergente en los cuerpos de agua. El objetivo de esta contribución es evidenciar la problemática ambiental que representa la disposición inadecuada de los agentes de contraste basados en gadolinio.

Palabras claves: Contaminante emergente, agente de contraste basado en gadolinio, imagenología por resonancia magnética.

ABSTRACT

Gadolinium complexes are the most used contrast agents in magnetic resonance imaging diagnostics. These compounds are excreted unmetabolized in urine and flow through drainage. There, contrast agents can undergo chemical reactions that lead to gadolinium ion release, which is highly toxic. However, as a complex or as an ion it is an emerging water pollutant. This contribution aims to spotlight the environmental problem caused by the inadequate disposal of gadolinium-based contrast agents.

Keywords: Emerging pollutant, gadolinium-based contrast agent, magnetic resonance imaging..

INTRODUCCIÓN

Los últimamente llamados contaminantes emergentes hacen referencia a sustancias de naturaleza diversa que recientemente se han detectado en el agua y que pueden causar efectos graves para la salud humana y el ecosistema en general. Sin embargo, no existe una legislación que indique las concentraciones permitidas de estas sustancias para mantener la calidad del agua y no se cuenta con información sobre su toxicidad o está incompleta. En consecuencia, no hay regulaciones para controlar la recurrencia de estos compuestos en los efluentes de las plantas de tratamiento, aguas residuales industriales y domésticas, e incluso en los cuerpos de agua superficiales como lagos, ríos, mares y acuíferos subterráneos. Este conjunto de contaminantes incluye disruptores endocrinos (compuestos con actividad hormonal), compuestos farmacéuticamente activos (medicamentos), productos de cuidado personal, aditivos industriales y pesticidas (Birch et al., 2015).

En el caso particular de los compuestos farmacéuticamente activos, imaginemos que adquirimos un medicamento prescrito por un médico para un padecimiento específico. Evidentemente, se conocen los efectos que tendrá en el organismo, la dosis requerida y el tiempo del tratamiento. Sin embargo, al ser excretado o en un panorama más angustiante, al caducar y

no ser recolectado correctamente, este fármaco puede llegar a organismos acuáticos y de manera casi segura, regresar a nosotros mediante una vía de consumo o exposición indirecta. De esta manera, el efecto sobre todo el ecosistema es incierto, aunado a una dosis desconocida y en la mayoría de los casos una exposición prolongada.

En este contexto, los hospitales son una alarmante fuente de descarga de contaminantes emergentes al medio ambiente y contribuyen considerablemente a la presencia de compuestos farmacéuticamente activos en cuerpos de agua superficiales y efluentes tratados (Kuroda et al., 2016). Particularmente, la imagenología por resonancia magnética (IRM) es una de las técnicas más utilizada actualmente en diagnósticos clínicos. Durante una valoración por IRM se emplean agentes de contraste que se clasifican de acuerdo con su composición química, vía de suministro, distribución en el organismo o el efecto sobre la imagen obtenida (Elizalde-González et al., 2017; Xiao et al., 2016).

Los agentes de contraste basados en gadolinio (ACBGs) son los medios de contraste más utilizados en IRM, por lo que su demanda se ha incrementado exponencialmente en las últimas décadas (Rogowska et al., 2018). Una vez que el ACBG es suministrado al paciente (Figura 1), el compuesto es excretado en orina y heces. Este hecho está estrechamente relacionado con el aumento de la concentración de gadolinio antropogénico (resultante de actividades humanas) en el agua (Brünjes & Hofmann, 2020). Esto evidencia que los procesos de tratamiento de agua convencionales no están diseñados para eliminación de este contaminante y revela un área de oportunidad para el desarrollo de procedimientos que mitiguen la contaminación del agua con gadolinio.

Imagenología por Resonancia Magnética: la panacea en la diagnosis vanguardista

No hay nada más estresante que atravesar una etapa de enfermedad sin un diagnóstico preciso. Con frecuencia, los médicos se apoyan en técnicas de última generación para identificar afecciones de manera oportuna y certera. Con esto, los pacientes se sienten tranquilos al saber que existen metodologías e instrumentos que permiten conocer el origen de sus padecimientos, muchos de ellos diagnosticados por técnicas de imagenología.

Específicamente, la IRM produce imágenes anatómicas tridimensionales detalladas, es una técnica no invasiva y que no requiere del uso de radiación dañina (Lohrke et al., 2016). Hasta hace poco tiempo, la cantidad y calidad de los detalles observados en las imágenes de IRM no eran una realidad. Afortunadamente, el desarrollo de los ACBGs lo han hecho posible. Desgraciadamente, estos fármacos se han convertido en un problema de contaminación del agua (Rogowska et al., 2018) y evidencia

de esto, son los crecientes reportes donde el gadolinio ha sido detectado en cuencas completas e incluso en agua potable; sobre todo en Europa y zonas donde el uso de la IRM es extensivo (Brünjes & Hofmann, 2020).

Agentes de contraste basados en gadolinio: El caballito de batalla de la IRM

El gadolinio es un elemento del grupo de los lantánidos que en disolución acuosa existe como ion (partícula con carga eléctrica, Gd^{3+}) y está rodeado por aproximadamente nueve moléculas de agua. Es estable y tiene siete electrones desapareados que le otorgan propiedades paramagnéticas (Le Fur & Caravan, 2019). Estas complejas características químicas lo hacen el candidato ideal en la preparación de agentes de contraste para la IRM. Los ligantes (moléculas que atrapan al ion para evitar su toxicidad) utilizados en la preparación de ACBGs se caracterizan por formar complejos de Gd^{3+} estables e inertes en condiciones fisiológicas que se excretan rápidamente sin metabolizar (Xiao et al., 2016).



Figura 1. Ciclo de vida de un agente de contraste basado en gadolinio (Infografía con mención honorífica en el “PRIMER CONCURSO DE INFOGRAFÍAS Y PODCAST DE DIVULGACIÓN DEL ICUAP”, celebrado el 14 de octubre de 2022). Autoría propia.

En un diagnóstico rutinario por IRM, el ACBG es inyectado vía intravenosa y una vez diseminado en organismo, este es estimulado por un campo electromagnético que equivale a 15 mil veces el campo magnético de la tierra (1.5 T). Los protones de los átomos en los tejidos se alinean con el campo magnético y acumulan energía que los obliga a alinearse. Cuando se interrumpe el campo, los protones liberan diferente cantidad de energía en función del tipo de tejido en que se encuentran. Finalmente, la energía que se recolecta adecuadamente produce las imágenes del órgano/tejido analizado. Gracias a este desarrollo científico es posible diagnosticar desde la ruptura de un ligamento hasta tumores, lo cual ha convertido al gadolinio en “el héroe de la salud” (Liang & Lauterbur, 2000).

Patologías asociadas al uso de ACBGs: el talón de Aquiles de los primeros agentes de contraste

Durante la implementación de la IRM como herramienta de diagnóstico, el desafío primordial era obtener agentes de contraste que proporcionaran imágenes de alta resolución. Una vez que la técnica se estableció y se perfeccionó, surgieron nuevos retos como el desarrollo de fármacos que además de producir imágenes de la mejor calidad fueran fácilmente expulsados del organismo. Debido a esto, los ACBGs se posicionaron como la opción más viable y prometedora (Kim et al., 2018). Sin embargo, años después surgieron innumerables casos de pacientes cuyas patologías fueron directamente asociadas al uso de un grupo específico de estos fármacos ACBGs de cadena abierta (Figura 2) (Bao et al., 2018). En la actualidad, se sabe que el gadolinio Gd³⁺ es altamente tóxico y puede causar fibrosis sistémica nefrogénica (FSN), sobre todo en pacientes con insuficiencia renal. La toxicidad se atribuye a dos propiedades: la insolubilidad del gadolinio en pH fisiológico y la competencia biológica con el calcio. El bloqueo de los canales de calcio puede inhibir la contracción cardíaca o la coagulación sanguínea, funciones vitales (Bao et al., 2018; Le Fur & Caravan, 2019; Rogowska et al., 2018). En la última década, la legislación sobre el uso de ciertos ACBGs fue modificada y la aplicación de algunos complejos de cadena abierta fue suspendida o restringida a diagnósticos en órganos específicos (Brünjes & Hofmann, 2020). En consecuencia, el compuesto macrocíclico Dotarem (gadoterato de meglumina,) se ha posicionado como el agente de contraste líder en México y Europa (Alvarez-Aguiñaga et al., 2022; Rogowska et al., 2018).

Incremento de gadolinio antropogénico en el agua: crónica de una problemática medioambiental anunciada

Análogamente a los reportes de pacientes con secuelas por el uso de ACBGs, investigadores de todo el mundo comenzaron a reportar concentraciones anómalas de gadolinio en aguas superficiales de distinta naturaleza (Brünjes & Hofmann, 2020; Ebrahimi & Barbieri, 2019; Le Fur & Caravan, 2019). La problemática del sector salud fue atendida rápidamente y para solucionarla se desarrollaron nuevos ACBGs que disminuían drásticamente los efectos secundarios de su uso, ACBGs macrocíclicos (Figura 2). Desgraciadamente, el aumento de gadolinio antropogénico en agua no ha sido gestionado, solo evidenciado en países altamente desarrollados.

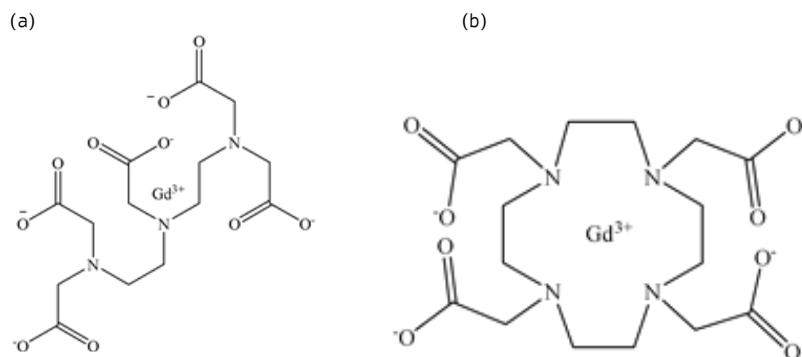


Figura 2. Ejemplos de agentes de contraste basados en gadolinio del tipo (a) cadena abierta (Magnevist®) y (b) macrocíclico (Dotarem®). Autoría propia.

Desde que, en 1972 el primer equipo de IRM fue desarrollado por el Dr. Raymond, su innovación y uso han crecido de manera exponencial (Figura 3). Para tener una idea clara, en 2019 Japón contaba con 55 instrumentos de IRM por cada millón de habitantes. Mientras que, Canadá tenía 10 y en los países de la OCDE el promedio era de 9.8 aparatos por cada millón de personas (Ernie Tretkoff, 2024). El Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) reconoció que el país tenía un alto rezago en técnicas de diagnóstico, pues en 2020 había 1.5 equipos de IRM por cada millón de mexicanos. Sin embargo, hoy en día la mayoría de los hospitales y laboratorios particulares ofrecen análisis de resonancia magnética como uno más de sus servicios. El precio del estudio oscila entre \$1,500 y \$7,000 pesos mexicanos, dependiendo de los requerimientos médicos, lo que lo posiciona como una técnica asequible para más personas, pues el costo disminuye cuando la oferta incrementa.

Ahora, la balanza se inclina hacia un panorama donde el gadolinio se posiciona como “el villano del medio ambiente” pues el manejo inapropiado

de los residuos generados en estudios por IRM, ha incrementado la presencia de gadolinio en aguas residuales (Rogowska et al., 2018). De acuerdo con la posología del fármaco, una persona de 70 kg de peso requiere de 1.1 g de gadolinio para un solo estudio de IRM. La Unidad de Resonancia Magnética del Laboratorio Nacional de Imagen por Resonancia Magnética en México, ha realizado más de 56,000 análisis durante los últimos 15 años, si suponemos al paciente de peso promedio mencionado, un solo centro podría contribuir con 4 kg de gadolinio administrado cada año (Álvarez Aguiñaga, 2023). En países como Alemania, donde se realizan cerca de 150 análisis por cada 1000 habitantes al año, significa que se administran alrededor de 13,500 kg de gadolinio al año, siendo uno de los países donde más se utiliza la IRM. Es imperativo aclarar que los ACBGs y el propio gadolinio iónico no pueden ser eliminados en las plantas de tratamiento de agua convencionales, pues no están diseñadas con esa finalidad. Las plantas de tratamiento convencionales tienen el objetivo de degradar la materia orgánica y eliminar patógenos del agua. La eliminación o recuperación de contaminantes recalcitrantes como los agentes de contraste, los metales (gadolinio) y los fármacos en general, requieren de tecnología especial para su íntegro tratamiento.

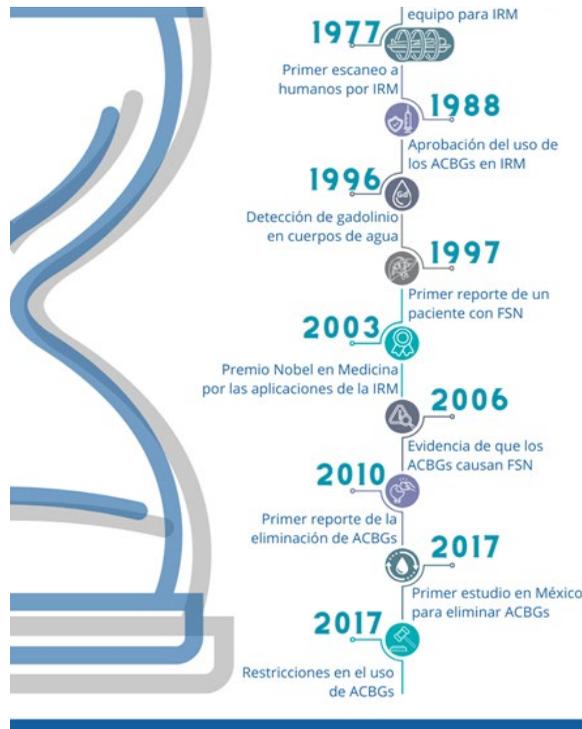


Figura 3. Hechos importantes en el desarrollo y aplicación de la Imagenología por Resonancia Magnética. IRM: Imagenología por Resonancia Magnética. ACBGs: Agentes de contraste basados en gadolinio. FSN: Fibrosis sistémica nefrogénica. Autoría propia.

Panorama actual: Un llamado a los equipos de investigación multidisciplinarios

Particularmente, en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) el grupo de investigación “Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencia de Materiales” liderado por la Dra. María de la Paz Elizalde González del Instituto de Ciencias, ha demostrado que el gadolinio proveniente del Dotarem puede liberarse al exponerse a radiación ultravioleta mediante reacciones de transmetalación que básicamente consisten en que otro metal (como el hierro) tome el lugar del gadolinio en el fármaco, liberando al gadolinio iónico (Alvarez-Aguiñaga et al., 2022).

De acuerdo con la publicación del grupo, los agentes de contraste desechados por los pacientes están expuestos a las condiciones climáticas de temperatura, radiación solar y pH del agua que los transporta. Las fotorreacciones (mediadas por la luz) que ocurren en presencia de materiales que contienen hierro, dan origen a la transmetalación del gadolinio, lo que es preocupante pues el hierro es un elemento abundante en los lechos de los ríos y todo tipo de cuerpos de agua. En consecuencia, la liberación de gadolinio iónico por transmetalación es altamente factible.

A pesar de lo anterior expuesto, la IRM no contempla la orina de los pacientes como un residuo biológico-peligroso a tratar, pues “el fin justifica los medios” y la obtención de imágenes que conduzcan a un mejor diagnóstico médico es prioridad.

Sin embargo, detectamos una omisión/área de oportunidad de desarrollo tecnológico importante al respecto. Se sabe que el Dotarem es eliminado por vía renal en las primeras 24 horas después de su aplicación, lo que posibilita la recolección y el tratamiento de la orina de los pacientes (2 L por día). Esto evitaría que el agente de contraste y sus derivados estén en el medio ambiente.

En el Laboratorio de Adsorción y Cromatografía del Centro de Química del Instituto de Ciencias de la BUAP, se han desarrollado materiales capaces de eliminar el gadoterato de meglumina del agua. Carbones activados obtenidos de residuos agroindustriales como hueso de aguacate y semilla de guayaba se utilizaron para adsorber agentes de contraste con base en gadolinio (Dávila-Jiménez et al., 2018; Elizalde-González et al., 2017). La propuesta de eliminación por adsorción en carbón activado tiene el componente de la utilización de residuos que se producen a nivel local para producir el carbón, y dar un valor agregado a materiales de desecho.

Recientemente, el grupo ha publicado resultados que informan de la obtención de materiales con propiedades fotocatalíticas para la eliminación de agentes de contraste con base en gadolinio. Dicha investigación aportó información importante del mecanismo de liberación del gadolinio iónico del Dotarem, el agente de contraste más utilizado en los estudios de IRM (Figura 4). Hasta el momento, los investigadores de la BUAP que han

participado en las investigaciones mencionadas son los únicos mexicanos que han publicado respecto de la contaminación del agua por agentes de contraste.

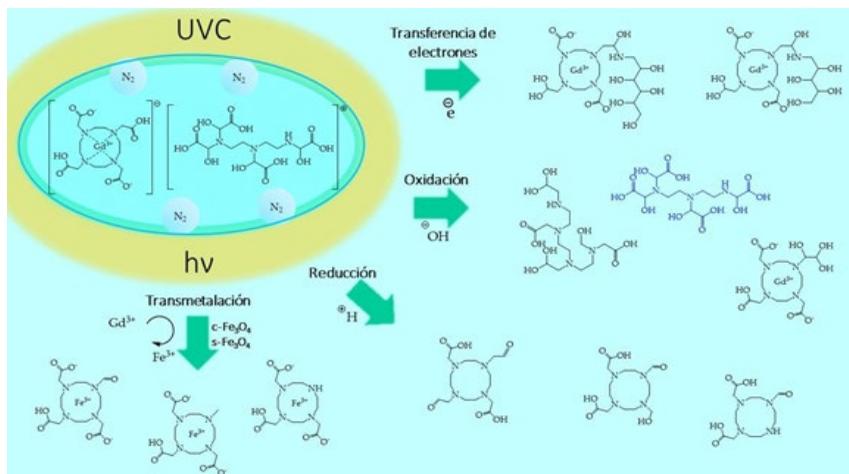


Figura 4. Reacciones químicas que ocurren durante la degradación del Dotarem expuesto a luz ultravioleta en presencia de diferentes materiales fotocatalíticos. Autoría propia.

CONCLUSIÓN

La contaminación de los ecosistemas acuáticos es un problema ambiental que requiere de estrategias inmediatas para el tratamiento eficiente de efluentes residuales y la disminución de su contenido de sustancias tóxicas. Además de la urgente legislación que gestione las descargas domésticas y las características de las aguas residuales que generan los hospitales; los desafíos más apremiantes que deben atenderse en el tratamiento de los contaminantes emergentes son su alta solubilidad, alta estabilidad química, baja biodegradabilidad y las transformaciones químicas que pueden experimentar para evaluar los efectos reales que generan en el ecosistema. En el caso particular de la contaminación del agua por ACBGs, el desarrollo de un procedimiento que permita separar, remover y recuperar gadolinio de la orina de pacientes que han estado expuestos a GBCA es urgente. De esta forma, se evitaría el incremento de gadolinio antropogénico en cuerpos de agua. La investigación que conduzca al desarrollo de materiales específicos adecuados para la implementación de un dispositivo capaz de remover y recuperar Gd^{3+} es una idea innovadora, pues además de evitar la presencia del ion de tierras raras en efluentes urbanos, el elemento recuperado podría aprovecharse en diversas aplicaciones; como en la preparación de aleaciones metálicas resistentes o materiales electrónicos, por ejemplo.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen el financiamiento recibido para realizar las investigaciones expuestas mediante los proyectos: CONACyT INFRA-01-252847-2015 (México), BMBF-267630-2016 (Alemania) y VIEP-100043144-2019 (México). Edith Alvarez agradece la beca recibida por CONAHCyT (732898) para realizar sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- Alvarez Aguiñaga, E. A. (2023). Preparación de materiales para el tratamiento de gadoterato de meglumina. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Alvarez-Aguiñaga, E. A., Elizalde-González, M. P., García-Díaz, E., & Sabinas-Hernández, S. A. (2022). UV-light-driven conversion of gadoterate meglumine: Insight into the photocatalyst's influence on conversion pathway, transformation products, and release of toxic ionic gadolinium. *Catalysis Communications*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2022.106544>
- Bao, Y., Sherwood, J. A., & Sun, Z. (2018). Magnetic iron oxide nanoparticles as: T 1 contrast agents for magnetic resonance imaging. In *Journal of Materials Chemistry C* (Vol. 6, Issue 6, pp. 1280–1290). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c7tc05854c>
- Birch, G. F., Drage, D. S., Thompson, K., Eaglesham, G., & Mueller, J. F. (2015). Emerging contaminants (pharmaceuticals, personal care products, a food additive and pesticides) in waters of Sydney estuary, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 97(1–2), 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.038>
- Brünjes, R., & Hofmann, T. (2020). Anthropogenic gadolinium in freshwater and drinking water systems. *Water Research*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115966>
- Dávila-Jiménez, M. M., Elizalde-González, M. P., Guerrero-Morales, M. A., & Mattusch, J. (2018). Preparation, characterization, and application of TiO₂/Carbon composite: Adsorption, desorption and photocatalysis of Gd-DOTA. *Process Safety and Environmental Protection*, 120, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.012>
- Ebrahimi, P., & Barbieri, M. (2019). Gadolinium as an emerging microcontaminant in water resources: Threats and opportunities. In *Geosciences (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/geosciences9020093>
- Elizalde-González, M. P., García-Díaz, E., González-Perea, M., & Mattusch, J. (2017). Removal of gadolinium-based contrast agents: adsorption on activated carbon. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9), 8164–8175. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8491-x>
- Ernie Tretkoff. (2024, February 6). MRI Uses Fundamental Physics for Clinical Diagnosis. APS.
- Kim, H. K., Lee, G. H., & Chang, Y. (2018). Gadolinium as an MRI contrast agent. In *Future Medicinal Chemistry* (Vol. 10, Issue 6, pp. 639–661). Future Medicine Ltd. <https://doi.org/10.4155/fmc-2017-0215>
- Kuroda, K., Itten, R., Kovalova, L., Ort, C., Weissbrodt, D. G., & McArdeLL, C. S. (2016). Hospital-use pharmaceuticals in swiss waters modeled at high spatial resolution. *Environmental Science and Technology*, 50(9), 4742–4751. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00653>
- Le Fur, M., & Caravan, P. (2019). The biological fate of gadolinium-based MRI contrast agents: a call to action for bioinorganic chemists. *Metallomics*, 11(2), 240–254. <https://doi.org/10.1039/c8mt00302e>
- Liang, Z.-P., & Lauterbur, P. C. (2000). *Principles of magnetic resonance imaging. A signal processing perspective* (1st ed.). Wiley.
- Lohrke, J., Frenzel, T., Endrikat, J., Alves, F. C., Grist, T. M., Law, M., Lee, J. M., Leiner, T., Li, K. C., Nikolaou, K., Prince, M. R., Schild, H. H., Weinreb, J. C., Yoshikawa, K., & Pietsch, H. (2016). 25 Years of Contrast-Enhanced MRI: Developments, Current Challenges and Future Perspectives. In *Advances in Therapy* (Vol. 33, Issue 1, pp. 1–28). Springer Healthcare. <https://doi.org/10.1007/s12325-015-0275-4>
- Rogowska, J., Olkowska, E., Ratajczyk, W., & Wolska, L. (2018). Gadolinium as a new emerging contaminant of aquatic environments. In *Environmental Toxicology and Chemistry* (Vol. 37, Issue 6, pp. 1523–1534). Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/etc.4116>
- Xiao, Y. D., Paudel, R., Liu, J., Ma, C., Zhang, Z. S., & Zhou, S. K. (2016). MRI contrast agents: Classification and application. *International Journal of Molecular Medicine*, 38(5), 1319–1326. <https://doi.org/10.3892/ijmm.2016.2744>