

EUKARIOTAS

BACTERIA

Stramenófilos

Alveolados

Entamebas

Hongos rojas

Espinecuentos

Agrobacterias

Mitochondrias

Revista de Divulgación Científica  
de la Facultad de Ciencias Biológicas  
de la Universidad Autónoma de Nuevo León

Cianobacterias y cloroplastos

ARQUEOBACTERIAS

Arqueobacterias halófilas

Termo

Arqueobacterias melanógenas

Arqueobacterias acidófilas

Termoproteales

Arqueobacterias no cultivadas de f

Termófilos

[organismos amantes del calor]





**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



**FCB**

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Una publicación de la  
**Universidad Autónoma de Nuevo León**

Mtro. Rogelio G. Garza Rivera  
Rector

M.A. Carmen del Rosario de la Fuente García  
Secretaria General

Dr. Santos Guzmán López  
Secretario Académico

Dr. Celso José Garza Acuña  
Secretario de Extensión y Cultura

Lic. Antonio Ramos Revillas  
Director de Publicaciones

Dr. Antonio Guzmán Velasco  
Director de la Facultad de Ciencias Biológicas

**Cuerpo Editorial de Biología y Sociedad**  
Dr. Jesús Ángel de León González  
Editor en Jefe

Dra. María Elena García-Garza  
Editor Técnico

**Editores adjuntos:**  
Dr. Juan Gabriel Báez-González  
Alimentos

Dr. Sergio I. Salazar-Vallejo  
Evelyn Patricia Ríos-Mendoza  
Biología Contemporánea

Dr. Sergio Arturo Galindo-Rodríguez  
Dra. Martha Guerrero-Olazarán  
Biotecnología

Dr. José Ignacio González-Rojas  
Dr. Eduardo Alfonso Rebolgar-Téllez  
Ecología y Sustentabilidad

Dr. Reyes S. Tamez-Guerra  
Iram P. Rodríguez-Sánchez  
Salud

DG Jorge Ortega Villegas  
Diseñador Gráfico

M.C. Alejandro Peña Rivera  
Desarrollo y Diseño Gráfico, Web

Jorge Alberto Ibarra Rodríguez  
Página web

Biología y Sociedad, es una publicación semestral editada y publicada por la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ciencias Biológicas. Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Difusión vía red de cómputo.

biologiaysociedad@uanl.mx

Editor responsable: Dr. Jesús Ángel de León González. Número de reserva de derechos al uso exclusivo del título Biología y Sociedad otorgada por el Instituto Nacional del Derecho de Autor: 04-2017-033011570800-01, de fecha 3 de abril de 2017. ISSN en trámite.

Las opiniones y contenidos expresados en los artículos son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier forma o medio, del contenido de la publicación sin previa autorización.



## CONTENIDO

¡NATURALEZA SANGRIENTA MARCADA EN DIENTES Y GARRAS!: ESTATUS SOBRE EL CONOCIMIENTO ACTUAL DEL TERÓPODO <i>TYRANNOSAURUS REX</i>	4
LOS LÍQUENES: DEFINICIÓN, CARACTERÍSTICAS, IMPORTANCIA Y USOS POTENCIALES	17
PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN ESPECIES SELECTAS DEL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO	28
LOS MAMÍFEROS DE DOSEL: ¿QUIÉNES SON Y QUE HACEN?	39
UN EJEMPLO EN VERACRUZ	39
POLIQUETOS PERFORADORES DE CONCHAS MARINAS Y EXÓTICOS INVASORES	47
EL RETO TAXONÓMICO DE LA BIODIVERSIDAD EN MÉXICO	65
LAS ENFERMEDADES EMERGENTES TRANSMITIDAS POR VECTORES: PALUDISMO, DENGUE, CHIKUNGUNYA Y ZIKA	75
LAS RADIACIONES Y EL AMBIENTE	85
LAS TÉCNICAS ISOTÓPICAS Y SUS RECIENTES APLICACIONES EN LAS CIENCIAS BIOLÓGICAS	99
LA NANOTECNOLOGÍA EN LAS CIENCIAS BIOLÓGICAS	108

# BIOLOGÍA Y SOCIEDAD

## UNA NUEVA MIRADA

El conocimiento científico es uno de los factores que contribuyen al desarrollo de las sociedades ya que la aplicación de los avances tecnológicos que se obtienen mediante su generación, resultan en una mejor calidad de vida para la sociedad y el medioambiente. Hoy en día, las llamadas Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC 'S) nos permiten potencializar algunas características del conocimiento científico que se distingue por ser un elemento transformador, específico, explicativo, objetivo y universal. La idea de que el conocimiento científico es solo entendible por los científicos o especialistas en temas específicos es válida, sólo si se considera que esta acción es para validar o confrontar resultados de las investigaciones. No obstante una vez que ha pasado el tamiz de la revisión, discusión y retroalimentación de los pares, estos resultados deben de traducirse a un lenguaje sencillo y accesible para que este nuevo conocimiento pueda permear y ser socializado entre la población no especialistas en esos temas. Este año la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León cumple 66 años de vida, y una muy buena manera de celebrar este hecho es la construcción de este valioso elemento de divulgación de la ciencia que denominamos "**Biología y Sociedad**", consideramos esto porque estamos conscientes del papel que tenemos que desempeñar en la construcción social de la ciencia, el estudio de la vida no tendrá sentido si este no deriva en nuevas formas de enseñanza y la transferencia de este no genera un valor a la sociedad. "**Biología y Sociedad**" pretende ser una revista de alto nivel académico, con un sistema editorial sólido, revisiones por pares externos, que dé la oportunidad a que académicos de cualquier institución muestren en un tono sencillo, asequible y entendible los resultados de sus investigaciones. Hoy en día las TIC 's han cambiado la forma de comunicarnos y esto ha permitido que el saber y el conocimiento lleguen de manera expedita a todos los lugares donde se tenga acceso, por ello hemos privilegiado el formato digital que nos permita una comunicación formal, rapidez en la producción y distribución, costos bajos en edición, facilidad de acceso a los artículos en distintos formatos, facilidad de enlaces, y de esta manera divulgar los resultados sin límites geográficos, y así, tener una mayor distribución, visibilidad e impacto social. De tal forma que la ciencia debe cumplir los principios democráticos y con ello llegar a un mayor número de personas de distintas culturas y regiones geográficas, así mismo, la meta es el promover un dialogo con cada uno de los lectores y que este se convierta en un ejercicio de participación pública que fortalezca el proceso de divulgación social de la ciencia.

Atentamente,

**Dr. Antonio Guzmán Velasco**

*Director de la Facultad de Ciencias Biológicas, UANL*



**¡NATURALEZA  
SANGRIENTA MARCADA EN  
DIENTES Y GARRAS!:**  
ESTATUS SOBRE  
EL CONOCIMIENTO  
ACTUAL DEL  
TERÓPODO  
*TYRANNOSAURUS*  
*REX*

M.C. Rafael Vivas González  
ravig\_85@outlook.com





## RESUMEN

El *Tyrannosaurus rex* fue un dinosaurio carnívoro de gran tamaño que habitó Norteamérica hace 65 millones de años, a fines del periodo Cretácico. Desde su descubrimiento a principios del siglo XX hasta los más recientes hallazgos realizados en la actualidad, han permitido indagar de manera más profunda en la biología y comportamiento de este gran animal. Reconstrucciones virtuales del cerebro en base a tomografías computarizadas revelan sentidos de la vista, olfato, audición y equilibrio bien desarrollados, así como nuevos estudios biomecánicos permiten ilustrar con mejor detalle aspectos relacionados a la velocidad máxima que eran capaces de alcanzar, siendo las formas más jóvenes las más rápidas y tendiendo a disminuir conforme llegaban a la adultez. La polémica sobre si era un animal cazador o carroñero sigue estando vigente, si bien hay algunas características que parecieran desfavorecer el estatus de cazador en los tiranosaurios, hay más evidencia que lo respalda como un animal predador. La apariencia externa en *Tyrannosaurus rex* sigue siendo debatida, aunque hay evidencia que respalda la presencia de piel escamosa en las formas adultas; no obstante, no se descarta la presencia de plumas en las formas más jóvenes y con una tendencia a irse perdiendo conforme el animal iba creciendo.

## INTRODUCCIÓN

*Tyrannosaurus rex* (conocido también por sus alias: tiranosaurio, "T-rex" o tiranosaurio rex) es probablemente el dinosaurio más conocido gracias a la imagen que la cultura popular nos ha transmitido de este gran animal. Es tanta la popularidad, que mucha de la imagen reflejada en estos medios se ha arraigado en la creencia popular y tendemos a dar como un hecho verídico todo lo que se nos ha inculcado sobre este dinosaurio. Sin embargo: ¿Qué tanto de esa imagen es cierta y qué tanto es fantasía? En las últimas décadas el desarrollo de nuevas tecnologías, así como una nueva serie de descubrimientos fósiles, han permitido a los paleontólogos adentrarse en el mundo y modo de vida de una de las máquinas carnívoras más impresionantes que el mundo jamás haya conocido. Aquí se muestra una noción de lo que actualmente se conoce con respecto a este formidable dinosaurio.

## ANTECEDENTES

El primer tiranosaurio fue descubierto en 1905 por el coleccionista de fósiles norteamericano Barnum Brown en lo que ahora son las "tierras malas" (bad lands) del estado de Montana (norte de los Estados Unidos), en una formación geológica conocida como Formación Hell Creek (rocas que datan de hace 65 millones de años, fines del periodo Cretácico). Henry Ferfield Osborn, curador del Museo Americano de Historia Natural en aquel entonces, fue quien se dio a la tarea de describir el nuevo espécimen, llegando a la conclusión de que se trataba de un dinosaurio carnívoro muy grande, el mayor de todos los descubiertos para aquella época (Sanz, 2007). Con material esquelético parcialmente completo pudo hacer el primer montaje de este gran dinosaurio carnívoro, dándole el nombre de *Tyrannosaurus rex*, el cual significa "Rey Lagarto Tirano" (Larson, 2008; Sanz, 2007; Breithaupt et al 2008; Fastovsky & Weishampel, 2016).

## ANATOMÍA GENERAL DEL REY LAGARTO TIRANO

*Tyrannosaurus rex* se caracteriza por una serie de aspectos anatómicos muy peculiares como son: cráneo grande y robusto; dientes frontales más pequeños que los dientes maxilares; fusión de los huesos nasales; cuello corto; brazos y manos reducidas; hueso de la tibia largo; una larga cola, entre otras más (Holtz, 2004).

El cráneo mide aproximadamente 1.60 metros de longitud, es ancho hacia la parte posterior y se va haciendo angosto al llegar al hocico. Tiene una serie de aberturas (fenestras) las cuales ayudaban a aligerar peso, así como absorber la fuerza de impacto ejercida al momento de atestar una mordida sobre sus presas (Holtz, 2004; Hone, 2016).

Las mandíbulas eran amplias y dotadas de grandes dientes curvos, robustos y en forma similar a un proyectil. Los más largos podían llegar a medir hasta 15 cm de largo y presentaban bordes aserrados tanto en la parte externa como interna (Paul, 1988; Holtz, 2004; Hone, 2016). El cuello a diferencia de otros dinosaurios carnívoros, se redujo de forma considerable haciéndose más corto, compacto y resistente (Holtz, 2004; Hone, 2016).

El cuerpo incremento su tamaño haciéndose más robusto (Holtz, 2004; Hone, 2016); presentaba brazos muy cortos con solo dos dígitos en cada mano, mientras que las extremidades posteriores eran largas y robustas (Holtz, 2004). La pelvis era amplia (lo cual indica músculos grandes que se insertaban desde las piernas a la cadera); sus patas estaban dotadas con los dígitos II, III y IV haciendo contacto directo con el suelo, mientras que el dígito I se encontraba elevado y en posición interna al cuerpo del animal.

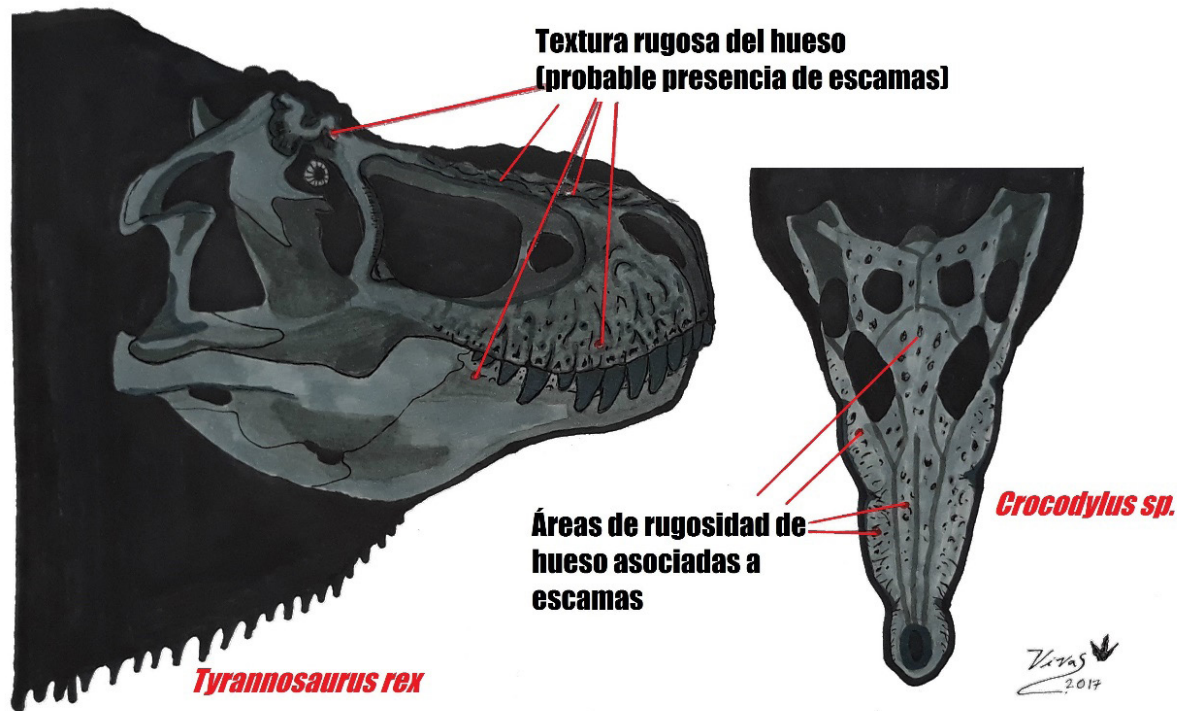
Su cola era larga y musculosa, la cual le ayudaba a crear balance del cuerpo al momento de moverse de un lugar a otro (Holtz, 2004).

Los animales adultos llegaban a alcanzar en total los 12 metros de longitud (Holtz, 2004, Hone, 2016, Molina-Pérez & Larramendi, 2016).

## FUERZA DE MORDIDA

La morfología de los dientes indica que *Tyrannosaurus rex* tenía la capacidad de quebrar los huesos de sus presas con bastante facilidad (Paul, 1988; Holtz, 2004; Hone, 2016). Esto era posible gracias a los grandes músculos mandibulares que el animal poseía (Molnar, 2008; Hone, 2016); estudios biomecánicos han revelado que la fuerza de mordida de un tiranosaurio adulto rondaba en los 57158 Newtons (aproximadamente 5832 Kg. de fuerza), más potente que la mordida del cocodrilo del Nilo actual (3172-22000 Newtons = 324-2245 Kg. de fuerza). *Tyrannosaurus rex* tenía la mordida más potente de todos los dinosaurios terópodos hasta ahora conocidos (Molina-Pérez & Larramendi, 2016).

Si bien es cierto que el tiranosaurio era un animal grande, hay que recordar que las presas de este animal también eran de gran tamaño (hadrosaurios, ceratopsidos, anquilosaurios) y habrían dado lucha al momento de caer en sus fauces. Esta acción habría provocado fuertes forcejeos por parte de las presas y el *Tyrannosaurus rex* tenía de alguna manera que lidiar con semejante fuerza de resistencia, ¿Cuál fue la solución?: reducir el tamaño del cuello y reforzar la musculatura en esta zona, brindando la fuerza necesaria para semejante esfuerzo (Holtz, 2004; Hone, 2016). Esta modificación surgió en



**Figura 1. Analogía entre los cráneos de *Tyrannosaurus rex* y *Crocodylus sp.* (cocodrilo).** Los cocodrilos presentan escamas grandes y gruesas en regiones del cráneo donde existe una mayor rugosidad en cuanto a textura del hueso; esta misma característica se observa en los tiranosaurios. Cráneos no dibujados a escala.

respuesta a dos necesidades: 1) por un lado, reducir el peso del animal hacia la parte frontal del cuerpo y 2) la necesidad de reducir la presión ejercida por las presas al momento de estas querer escapar de las fauces del animal, lo que facilito evitar lesiones serias ocasionadas durante el forcejeo de sus víctimas (Hone, 2016).

## SENTIDOS

*Tyrannosaurus rex* era un dinosaurio que poseía un sentido del olfato muy desarrollado (Horner & Lessem, 1993; Stokad, 2005). Tomografías digitales realizadas al cráneo han permitido realizar moldes del cerebro del animal, revelando que el lóbulo olfatorio en él era muy grande, lo cual indica un sentido del olfato altamente desarrollado y que le habría permitido olfatear su alimento a largas distancias (Horner, 1993; Stokad, 2005; Hone, 2016).

La visión en estos animales era binocular y estereoscópica; los ojos estaban orientados hacia la parte frontal del rostro a diferencia de otros dinosaurios carnívoros (Stevens, 2006). Esto le confería al *Tyrannosaurus rex* una muy buena percepción de la profundidad y distancia en su entorno, y esto da peso a la idea de que era un animal

depredador (Bakker, 1986; Paul: 1988, 2008, 2016; Stokad, 2005; Stevens, 2006; Hone, 2016). Otro aspecto destacable era su sentido auditivo el cual le permitía escuchar sonidos de baja frecuencia (Witmer & Ridgely, 2009). La estructura del oído interno indica que *Tyrannosaurus rex* tenía un sentido del equilibrio bastante desarrollado (Stokad, 2005; Witmer & Ridgely, 2009).

Carr et al. (2017) reportan que un examen minucioso al cráneo del tiranosaurio *Daspletosaurus horneri* (pariente muy cercano al *Tyrannosaurus rex*) revela que este debió haber estar dotado de grandes y gruesas escamas en su rostro, debido a las áreas en donde hay una mayor rugosidad en la textura de la superficie del hueso. Observaron que esta característica está presente en los cocodrilos, los cuales presentan en sus cráneos áreas en donde hay rugosidades óseas las cuales en vida están cubiertas por escamas gruesas y de gran tamaño; estas escamas están ligadas a un sistema sensorial extremadamente sensible el cual les permite detectar el más mínimo movimiento. Concluyeron que *Daspletosaurus horneri* y sus parientes cercanos (incluido el *Tyrannosaurus rex*) presentaban esta misma característica y debieron haber desarrollado de forma convergente el mismo patrón sensorial observado en los cocodrilos (Fig. 1).



## METABOLISMO Y CRECIMIENTO

En la actualidad sigue siendo debatido qué tipo de metabolismo presentaban los dinosaurios, aunque la mayoría de los paleontólogos están de acuerdo en que debió haber sido bastante superior al que presentan los reptiles actuales, siendo equiparable al de los mamíferos y aves actuales (Bakker, 1986; Paul: 1988, 2008, 2012, 2016; Pontzer, Allen & Hutchinson, 2009; Young & Currie, 2011). Según algunos estudios biomecánicos realizados a varios dinosaurios terópodos en base a su resistencia física (Pontzer, Allen & Hutchinson, 2009) indican que los dinosaurios de gran tamaño tenían una capacidad aeróbica mucho mayor (ya sea al trotar a velocidad baja y/o al caminar) a la que se observa en los animales ectotermos actuales de gran tamaño (un animal ectotermo es aquel que no puede generar su propio calor corporal y depende de la temperatura del medio ambiente para elevar su temperatura interna, con ello logra realizar sus actividades cotidianas), concluyendo que los dinosaurios terópodos (o carnívoros) debieron haber sido animales endotermos (animales que generan su propio calor corporal y tienden a estar en actividad constante: las aves y mamíferos son ejemplos de ello). Esto tiene sentido ya que el esqueleto de los dinosaurios terópodos estaba pneumatizado: sus huesos eran huecos (Wedel, 2006; Holtz, 2012; Reid, 2012; Paul, 2016; Fastovsky & Weishampel, 2016) y por ellos corría un sistema de sacos aéreos homólogo al que observamos en las aves actuales. Dicha red de sacos aéreos formaba parte del sistema respiratorio (Wedel, 2006; Paul, 2016; Fastovsky & Weishampel, 2016), y en el caso del *Tyrannosaurus rex* no era la excepción (Holtz, 2004). Bakker (1986), Erickson et al. (2004), Paul (1988, 2012) y Hone (2016) concuerdan con la noción de que los dinosaurios presentaban metabolismos más parecidos al de las aves y los mamíferos modernos, basándose no solo en la capacidad aeróbica, sino también en su tasa de crecimiento. En el caso del *Tyrannosaurus rex*, su crecimiento era bastante rápido durante los primeros 15 años de vida, después de este tiempo su ritmo de crecimiento aminoraba considerablemente (Erickson et al. 2004). Estudios histológicos revelan que podían alcanzar la edad máxima de 30 años aproximadamente, siendo los animales más grandes y robustos las formas viejas y totalmente desarrolladas, pesando cerca de 9000 kilogramos (Erickson et al. 2004; Hone, 2016).

## VELOCIDAD

Durante mucho tiempo se ha venido especulando acerca de la velocidad a la que se desplazaba el *Tyrannosaurus rex*. Bakker (1986) y Paul (1988) proponían velocidades máximas de hasta 70 km/hora, basándose en la proporción de las extremidades traseras (relación fémur-tibia) y comparándolas con las de los vertebrados actuales. Ellos notaron que la proporción del hueso del fémur era un poco más corta en comparación con la tibia (no todos están de acuerdo con esta observación, ver Horner & Lessem, 1993); esta condición se observa en los animales corredores actuales (avestruz, emú, etc.), lo que habría conllevado a una zancada amplia y permitiéndole al animal un incremento en la velocidad (Bakker, 1986; Paul: 1988, 2008; Currie, 1997). También hay que recordar que los huesos del *Tyrannosaurus rex* estaban pneumatizados (Holtz, 2004; Paul, 2016), lo que indicaría también una contextura un poco más "liviana".

Sin embargo, en los últimos años una serie de nuevos estudios (Hutchinson & García, 2002; Hutchinson et al. 2005) sugieren velocidades más bajas basadas en nuevos modelos biomecánicos en los que se ha reconstruido la masa muscular de las piernas que el *Tyrannosaurus rex* habría requerido para poder correr. Se encontró que al momento de que un animal incrementa su tamaño corporal, la masa muscular incrementa su tamaño rápidamente pero no así su fuerza (Hutchinson et al. 2005). Dichos resultados indican que *Tyrannosaurus rex* no habría tenido la fuerza suficiente en sus piernas para poder ser un animal veloz, y estiman una velocidad promedio que iba en los 25 km/hora (Hutchinson et al., 2005). Recientemente, Seller et al. (2017) reafirman lo establecido en el estudio anterior mencionado, añadiendo que los huesos de la pierna no habrían podido soportar el peso del animal durante la fuerza generada por el impacto del pie al hacer contacto con el suelo si este se hubiese desplazado a velocidades elevadas propuestas anteriormente (Bakker, 1986; Paul, 1988); dicho impacto habría fracturado las extremidades del animal. Hutchinson et al. (2005) y Seller et al. (2017) proponen que el *Tyrannosaurus rex* debió haber sido un animal que se desplazaba ya sea a paso rápido tipo trote o bien solo se limitaba a caminar.

## ¿ESCAMAS O PLUMAS?

No se sabe con certeza que apariencia tenía el *Tyrannosaurus rex*, pero se han hecho algunas conjeturas basadas en fósiles de parientes cercanos. La presencia de plumas es una condición ancestral dentro de algunos linajes de dinosaurios terópodos y en el caso de la evolución de los tiranosauridos no es la excepción (Hone, 2016). Fósiles de varios tiranosauroides primitivos de finales del Jurásico y principios del Cretácico revelan la presencia de plumas que cubrían casi la totalidad de sus cuerpos (Hone, 2016). *Yutyranus huali* por ejemplo, era un tiranosauroide de gran tamaño (9 metros de largo) que presentaba una extensa cubierta de plumas a lo largo del cuerpo, demostrando con esto que hasta un animal de gran tamaño podía estar cubierto completamente de plumas (Xu et al. 2012). Teniendo el precedente de *Yutyranus huali* como un terópodo de gran tamaño emplumado, no sería de extrañar que las plumas también estuviesen presentes en el *Tyrannosaurus rex* (Holtz, 2004; Hone, 2016).

No todos los paleontólogos concuerdan con la presencia de plumas en *Tyrannosaurus rex* (Bell et al. 2017, Carr et al. 2017). En el caso de *Yutyranus huali*, se trata de un animal que vivió en Asia a mediados del periodo Cretácico (hace unos 125 millones de años), en aquel entonces esa región presentaba un ecosistema de tipo boscoso con temperaturas frías (la temperatura media en esa región oscilaba en los 10°C). Las plumas habrían ayudado a *Yutyranus huali* a regular su temperatura corporal, debido a las temperaturas frías que debía soportar durante los meses de oscuridad (Xu et al. 2012).

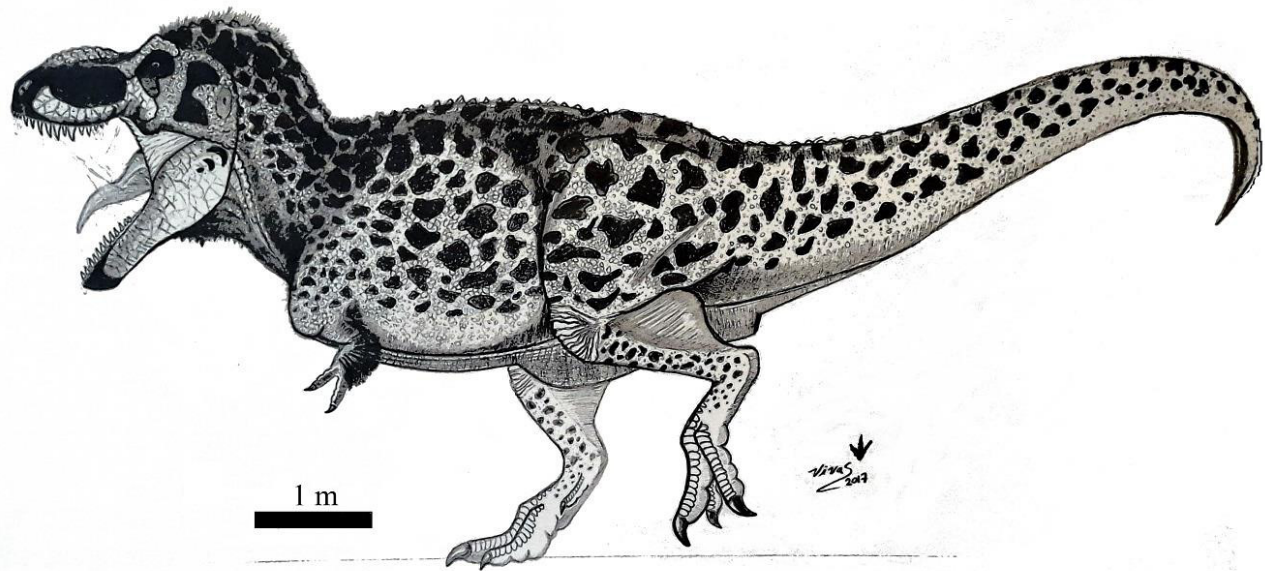
En el caso de *Tyrannosaurus rex* la cuestión es diferente: estos vivían en un ambiente mucho más cálido y húmedo, con una temperatura media que se estima rondaba en los 27°C, por lo que, si este animal hubiese desarrollado un plumaje extenso y abundante semejante al de *Yutyranus huali*, habría sufrido de sobrecalentamiento (Bell et al. 2017).

Los animales actuales de gran tamaño como los elefantes, rinocerontes e hipopótamos tienden a disipar el calor corporal mucho más lentamente que los animales más pequeños, y para lidiar con este problema han recurrido a algunas características

como son la pérdida o reducción considerable de su pelaje (Myhrvold et al. 2012). Al hacer esto, evitan el sobrecalentamiento de sus cuerpos y permiten al animal refrescarse y poder seguir con sus actividades cotidianas. Esta misma regla pudo haber sido aplicada en el *Tyrannosaurus rex* así como a otros tiranosauridos del cretácico tardío (*Albertosaurus*, *Daspletosaurus*, *Tarbosaurus*): perdiendo o bien reduciendo considerablemente la cobertura de plumaje para evitar sobrecalentarse (Bell et al. 2017).

Han sido pocos los hallazgos de impresiones de piel reportados en los tiranosauridos más evolucionados. Se han encontrado algunas impresiones de piel en la región de cuello en un pariente cercano al *Tyrannosaurus rex* y casi del mismo tamaño (*Tarbosaurus bataar*) revelando un pliegue amplio y texturizado similar al que se observa en los pelicanos de hoy en día (Mikhailov vía Carpenter, 1999); y también han sido reportadas algunas pequeñas impresiones de escamas irregulares poligonales en *Daspletosaurus torosus* (Currie & Koppelhus, 2015) y escamas circulares y hexagonales en una pequeña región de la parte ventral de la cola en el espécimen de un tiranosaurio del género *Gorgosaurus* (Bell et al. 2017) así como probable presencia de escamas en el cráneo de *Daspletosaurus horneri* (Carr et al. 2017).

Bell et al. (2017) reportan la presencia de la primera impresión de piel en un ejemplar de *Tyrannosaurus rex*, en el que se observan escamas similares a las reportadas en otros tiranosauridos (Currie & Koppelhus, 2015). Estos pequeños "parches" de piel han sido ubicados sobre el cuello, la pelvis y en la base de la región de la cola muy cerca de las extremidades posteriores, dichas escamas tienen una apariencia de tipo granulosa. La distribución de estos "parches" de piel, así como la proporción de tamaño constante entre las escamas en las diversas regiones sugiere una distribución bastante uniforme de piel escamosa en todo el cuerpo para *Tyrannosaurus rex* (Fig. 2). No obstante, Bell et al. (2017) no descartan la posibilidad de que el animal hubiese presentado plumas durante alguna etapa de su crecimiento, lo cual es una idea ampliamente aceptada por la mayoría de los paleontólogos en la actualidad (Holtz: 2004; Hone, 2016; Paul, 2016) siendo las primeras etapas de vida y desarrollo las más factibles para la presencia de plumas.



**Figura 2. Paleoreconstrucción de *Tyrannosaurus rex* adulto.** En base a algunos descubrimientos de impresiones de piel en fósiles de tiranosaurios, se podría asumir una cobertura bastante uniforme de escamas al rededor del cuerpo del animal. Es probable que en las primeras etapas de vida de los tiranosaurios las crías y las formas juveniles presentaran plumas, y estas se fuesen perdiendo parcial y/o totalmente al alcanzar la forma adulta. Escala de la barra: 1 metro.

## COMPORTAMIENTO

Una de las preguntas que se siguen debatiendo es si *Tyrannosaurus rex* era un animal carroñero (Horner & Lessem, 1993) o un cazador (Bakker, 1986; Currie, 1997, 1998; DePalma *et al.* 2013; Paul: 1988, 2008, 2016; Stevens, 2006; Holtz, 2012; Young & Currie, 2011). Los proponentes de la idea del animal carroñero se centran en algunos aspectos anatómicos del animal: 1) brazos demasiado cortos como para poder capturar presas, 2) sentido del olfato muy desarrollado y 3) extremidades posteriores grandes y pesadas las cuales habrían servido solo para caminar (Horner & Lessem, 1993).

Horner & Lessem (1993) señalan que un animal cazador debe ser capaz de inmovilizar a sus presas, y los brazos con fuertes garras en los dedos juegan un papel importante en este aspecto. Dinosaurios terópodos de gran tamaño como *Allosaurus fragilis* del Jurásico de Norteamérica y *Giganotosaurus carolini* del Cretácico medio de América del Sur son un buen ejemplo de carnívoros grandes dotados de grandes brazos y garras., las cuales ayudaban a aferrar bien a las presas. Sin embargo, los brazos de *Tyrannosaurus rex* son extremadamente pequeños

en comparación con el tamaño del mismo animal (Horner & Lessem, 1993) y estos solo contaban con dos dígitos en cada mano (Holtz, 2004). Según Horner & Lessem (1993) cualquier animal cazador debe ser capaz de inmovilizar a sus presas, algo que *Tyrannosaurus rex* no podía hacer.

No obstante, a pesar de ser pequeños, los brazos del *Tyrannosaurus rex* eran fuertes (Currie, 1997) capaces de cargar hasta 200 kilogramos de peso. Otra cualidad que presentaba *Tyrannosaurus rex* era su gran cabeza dotada con una mordida capaz de triturar huesos (Molnar, 2008; Molina-Pérez & Larramendi, 2016). La evolución de los tiranosauridos de gran tamaño favoreció el incremento de tamaño del cráneo y una mayor amplitud y fuerza de mordida (Molnar, 2008; Holtz, 2004; Hone, 2016), convirtiéndose en la herramienta más importante para poder atrapar y matar a sus presas. Al desarrollar una cabeza grande con mordida fuerte, los brazos pasaron a "segundo plano" reduciendo considerablemente su tamaño, ganando un punto a favor para poder mantener el equilibrio en la parte delantera del cuerpo del animal (Paul, 1988; Currie, 1997). El cráneo de *Tyrannosaurus rex* estaba pneumatizado (Holtz, 2004; Witmer & Ridgely, 2009) y las fenestras ayudaban a absorber el impacto generado



de la fuerza de mordida dirigida hacia sus presas; el cuello corto estaba reforzado con músculos grandes y gruesos que habrían soportado el forcejeo de sus presas una vez apresadas entre sus fauces (Molnar, 2008; Hone, 2016).

Horner & Lessem (1993) apuntan que una característica indispensable en los animales carroñeros es el desarrollo de un sentido del olfato agudo, algo que se observa en el *Tyrannosaurus rex* (Stokad, 2006; Witmer & Ridgely, 2009). El lóbulo olfatorio en el cerebro de este animal era bastante grande y bien desarrollado, lo que le habría permitido al animal detectar el olor tanto de animales muertos como el de los vivos en su entorno (Stokad, 2006). Sin embargo, *Tyrannosaurus rex* tenía una visión binocular y estereoscópica con la cual podía juzgar la profundidad y distancia a la que se encontraban sus presas potenciales (Stevens, 2006; Stokad, 2006; Holtz, 2004; Hone, 2016; Witmer & Ridgely, 2009) y esta cualidad habría sido más eficiente en un animal cazador que en un animal carroñero. También su sentido del equilibrio estaba bien desarrollado gracias a la estructura del oído interno (Stokad, 2006), esto le permitía al animal realizar movimientos rápidos y precisos, así como presentar una buena coordinación entre el movimiento de los ojos y el movimiento de la cabeza, convirtiendo al *Tyrannosaurus rex* en un animal sorprendentemente ágil y sensible (Stokad, 2006; Witmer & Ridgely, 2009).

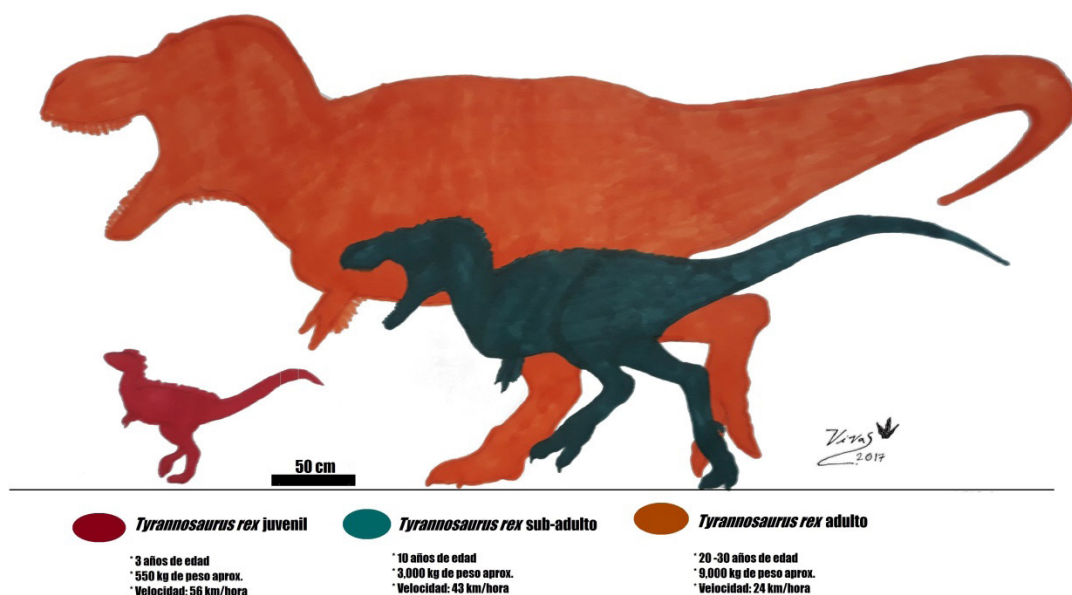
Horner & Lessem (1993) señalan que *Tyrannosaurus rex* era un animal que no podía correr, ya que las proporciones de los huesos de las extremidades posteriores son casi del mismo tamaño (fémur-tibia), una característica que solo se observa en animales que no pueden correr. Advierten que una característica para un animal cazador es la capacidad de poder perseguir a sus presas y mantienen que *Tyrannosaurus rex* no podía hacerlo. Paul & Christiansen (2000) estiman que un *Triceratops* adulto (9 metros de largo y 6,000 Kg. de peso) era capaz de "galopar" a una velocidad que oscilaba entre los 40-50 km/hora, y Manning (2009) postula que los hadrosaurios podían alcanzar hasta los 45 km/hora; siendo notoriamente más rápidos que *Tyrannosaurus rex*. Los más recientes estudios biomecánicos dan soporte a este aspecto (Hutchinson & García, 2002; Hutchinson et al. 2005; Seller et al 2017) y

establecen que *Tyrannosaurus rex* era un animal que se dedicaba básicamente a caminar o bien a andar a un paso rápido tipo trote.

Tal vez las formas adultas y robustas de *Tyrannosaurus rex* carecían de la velocidad, pero esto no era la regla para las formas juveniles y sub-adultas: estas presentaban una anatomía más grácil y liviana a diferencia de los animales adultos, por lo que durante esta etapa de crecimiento eran animales bastante rápidos (Hutchinson et al. 2005, Hone, 2016, Molina-Pérez & Larramendi, 2016). Estudios biomecánicos en especies de tiranosaurios no tan grandes como *Albertosaurus arctunguis* y *Lythronax argestes* (con un peso que oscilaba entre los 1400 y 2500 kilogramos aproximadamente) han calculado velocidades que oscilan entre los 38 a 40 km/hora (un *Tyrannosaurus rex* sub-adulto con el mismo peso pudo haber alcanzado estas velocidades: Molina-Pérez & Larramendi, 2016), mientras que tiranosaurios juveniles por debajo de los 1000 kilogramos de peso podían alcanzar velocidades de hasta 60 km/hora (Molina-Pérez & Larramendi, 2016), lo suficientemente rápidos para poder perseguir a sus presas a velocidades elevadas. Otro aspecto que hay que remarcar, es que en la actualidad los grandes carnívoros suelen fijar su atención hacia presas más vulnerables y fáciles de atrapar al momento de cazar (animales más jóvenes, viejos y/o enfermos); es razonable pensar que *Tyrannosaurus rex* debió haber seguido el mismo patrón de conducta, por lo que el tema de la velocidad no es un punto fuerte para confirmar la propuesta de Horner & Lessem (Fig. 3).

Existen evidencias que indican acto de predación por parte de *Tyrannosaurus rex*, en donde las presas fueron atacadas, pero lograron sobrevivir a dichos ataques; esto se sabe en base a huesos de vertebras de hadrosaurios y otros dinosaurios herbívoros en donde dientes de tiranosaurio infligieron heridas, pero estas después cicatrizaron (DePalma et al. 2013); arrojando pruebas de que los *Tyrannosaurus rex* cazaban, pero no todos los ataques eran exitosos.

Hay registro de que los tiranosaurios vivían en manadas, se han encontrado yacimientos fósiles de varias especies de tiranosaurios en donde hay una asociación de miembros de la misma especie en diversas etapas de desarrollo (Currie, 1998; Young



**Figura 3. Comparación de *Tyrannosaurus rex* en diferentes etapas de su crecimiento.** *Tyrannosaurus rex* presentaba un ritmo de desarrollo bastante rápido comparable al de los mamíferos actuales, creciendo de manera acelerada durante los primeros 15 años de vida y aminorando drásticamente al llegar a su estado adulto. Eran animales bastante ágiles y rápidos en sus formas juveniles y sub-adultos, reduciendo dichas cualidades conforme alcanzaban su estado adulto y complejidad robusta. Escala de la barra: 50 cm.

& Currie, 2011). También hay registros de huellas de tiranosaurios de diversos tamaños asociadas entre sí, dando soporte a la noción de comportamiento gregario en estos dinosaurios carnívoros (McCrea et al. 2014). Lo anterior sugiere que los tiranosaurios como *Tyrannosaurus rex* y demás parientes grandes debieron haber tenido una estructura social desarrollada, cuidándose entre sí, posiblemente estableciendo jerarquías y permitiéndoles realizar estrategias de cacería grupal basadas en la repartición de tareas entre miembros de diversas edades (Young & Currie, 2011). Se especula que los animales más jóvenes y de complejidad ligera pudieron haber sido los indicados para el acto de persecución y acorralamiento de las presas potenciales, llevándolas hacia el sitio en donde los adultos se encargaban de hacer la emboscada final (Young & Currie, 2011).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El *Tyrannosaurus rex* es el mayor dinosaurio terópodo descubierto hasta ahora en Norteamérica, el cual vivió hace 65 millones de años durante fines del periodo Cretácico. Era un animal dotado con unas grandes y fuertes fauces capaces de inhabilitar a sus presas casi instantáneamente. Esto garantizaba un porcentaje de éxito elevado al momento de cazar, ya que podía matar y/o inmovilizar a su presa al instante al momento de infligir la mordida.

Uno de los sentidos más desarrollados era el olfato, y este ha sido uno de los puntos de mayor fuerza para

quienes soportan la teoría de que *Tyrannosaurus rex* era un animal carroñero (Horner & Lessem, 1993). No obstante, el sentido de la vista también estaba bien desarrollado: los ojos eran grandes (casi del tamaño de una pelota de béisbol) y estaban dirigidos hacia el frente, dándole una mejor percepción de la profundidad de los objetos en su entorno a diferencia de otros dinosaurios carnívoros, cuya visión era periférica. Se piensa también que su visión debió haber sido policromática, permitiéndole distinguir una gran variedad de colores similares a los que perciben los reptiles y aves actuales (Stevens, 2006).

El hecho de que *Tyrannosaurus rex* presentara una estructura del oído interno delicada también era una característica poco usual para un animal de gran tamaño, siendo comparable a la observada en dinosaurios terópodos más pequeños como los dromeosauridos (raptores) y ornitomimidos (dinosaurios tipo avestruz). Esto indica un animal con un sentido de equilibrio bien desarrollado y capaz de coordinar sus movimientos de manera rápida y precisa (Stokad, 2006; Witmer & Ridgely, 2009), siendo un aspecto indispensable para actividades de predación. *Tyrannosaurus rex* podía desplazarse sigilosamente y cambiar de dirección en respuesta a la dirección que tomara su presa, así como percibir sonidos de baja frecuencia.

En la actualidad, los paleontólogos concuerdan en que los dinosaurios carnívoros no “rugían” (a diferencia de lo que Hollywood nos ha hecho y nos sigue haciendo creer); ya que la capacidad de rugir es una característica

exclusiva de los mamíferos. Parientes vivos más cercanos (cocodrilos, caimanes y la descendencia de los dinosaurios terópodos: las aves) son capaces de producir una gran variedad de sonidos, por lo que los dinosaurios debieron haber sido capaces de generar los suyos (Senter, 2008). Se piensa que los dinosaurios terópodos como el *Tyrannosaurus rex*, debieron haber producido una serie de sonidos muy semejantes a las vocalizaciones que realizan los cocodrilos y caimanes en la actualidad, los cuales tienden a ser sonidos graves y de baja frecuencia (Senter, 2008). Un sonido de esta naturaleza proveniente de un animal de 9 toneladas de peso pareciera no ser tan impactante como al “rugido” con el cual estamos acostumbrados a asociar a semejante animal; sin embargo la realidad es que una cualidad así, aunada con las características sensoriales desarrolladas por tan sorprendente terópodo, debieron haber sido una experiencia aterradora, ya que no hay algo más peligroso que un animal que no emite ningún ruido estridente y que tiene la capacidad de acercarse a sus presas sigilosamente.

La velocidad a la que podía desplazarse un *Tyrannosaurus rex* adulto era relativamente baja, pero podía acelerar el paso rápidamente y mantenerlo de manera constante, aunque solo por un periodo de tiempo breve (Hutchinson et al. 2005). A pesar de que varias de las presas eran un poco más rápidas que un tiranosaurio adulto (Paul & Christiansen, 2000; Manning, 2009) hay que remarcar que estos dinosaurios terópodos eran animales sociales y vivían en grupos conformados por individuos de diversas edades (Currie, 1998; Young & Currie, 2011; McCreary et al. 2014). Las formas juveniles y sub-adultas carecen de la morfología robusta y pesada, con las proporciones de los huesos de las extremidades traseras adecuadas para correr y realizar persecuciones prolongadas (Hutchinson et al. 2005, Molina-Pérez & Larramendi, 2016), haciéndolos aptos para perseguir a las presas, posiblemente guiándolas hacia el lugar donde los adultos esperaban para atestar el ataque final, un comportamiento bastante parecido a lo que se observa en los animales cazadores actuales con estructura social definida (Young & Currie, 2011). El debate de “predador vs carroñero” dista mucho de terminarse; no obstante, la mayoría de los científicos actualmente considera que *Tyrannosaurus rex* (al igual que los grandes carnívoros modernos) debió

haber sido un animal que podía recurrir a ambos tipos de conducta dependiendo la situación que se presentara; y esto aplicaría también para otros dinosaurios carnívoros de gran tamaño (Holtz, 2004, 2012; Hone, 2016).

Si *Tyrannosaurus rex* presentaba o no plumas, sigue siendo un debate abierto: Solo se cuenta hasta el momento con algunas pequeñas áreas de impresiones de piel en algunas especies de tiranosaurios avanzados y más cercanos a *Tyrannosaurus rex*, revelando presencia de piel escamosa. La consistencia en tamaño y forma de las escamas en las diversas regiones del cuerpo en las que hasta ahora han sido reportadas parecen reflejar una distribución uniforme y conservadora para todo el cuerpo (Mikhailov vía Carpenter, 1999; Currie & Koppelhus, 2015; Currie & Koppelhus, 2015; Bell et al. 2017). Las formas juveniles probablemente presentaban plumas y estas se irían perdiendo al crecer (Hone, 2016). No se descarta la presencia de plumas (aunque de forma escasa) en las formas adultas, aunque la tendencia habría sido perderlas en su totalidad, probablemente respondiendo a fines termoregulatorios (Bell et al. 2017).

La única manera de despejar dudas sería con el descubrimiento de una momia de *Tyrannosaurus rex*, un hallazgo que no sería descabellado teniendo en cuenta que se han encontrado otras momias de dinosaurios descubiertas recientemente (Murphy, Trexler & Thompson, 2006; Manning, 2009; Brown et al. 2017), es solo cuestión de tiempo para que un descubrimiento de esta naturaleza salga a la luz; con ello se resolverían varias dudas con respecto a la apariencia externa del *Tyrannosaurus rex*, y con seguridad surgirían nuevas sorpresas e interrogantes que seguirán dando a los paleontólogos nuevos cuestionamientos sobre los cuales trabajar.

*Tyrannosaurus rex* es y seguirá siendo por mucho tiempo más el dinosaurio carnívoro favorito del público, y los nuevos hallazgos que se hagan en las próximas décadas seguramente fortalecerán su popularidad y atraerán a toda una nueva generación de paleontólogos que intentaran descifrar la naturaleza del mundo prehistórico de nuestro planeta y como esta ha ido evolucionando hasta llegar al estado actual.



## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi querido amigo, el doctor Héctor Rivera Silva, encargado del Laboratorio de Paleontología del Museo del Desierto de la ciudad de Saltillo (Coahuila) por su apoyo y amistad durante el desarrollo de mi tesis de maestría en aquella institución entre los años 2012-2013, así como por apoyarme en mi incursión hacia el mundo de la ilustración científica en esta rama y seguir fomentado hasta el día de hoy mi interés en el tema de la paleontología de dinosaurios. Agradezco a mi maestro, M.C. Gerardo Guajardo Martínez, por su apoyo en continuar con mi interés en el área de paleontología de vertebrados a pesar de las adversidades durante mis estudios de licenciatura. Agradezco al doctor (y también maestro mío durante mi formación profesional) Jesús Ángel de León González por su apoyo y por hacerme la invitación para publicar el presente artículo dentro de esta revista de divulgación científica que orgullosamente publica la Facultad de Ciencias Biológicas de la UANL. Quiero también agradecer a mis padres: María Guadalupe González Martínez y Rafael Vivas Carranza, por su apoyo y amor durante mi formación profesional y en seguir fomentando mi interés en el campo de la paleontología, así como también a mi novia Karina Elizabeth Martínez Contreras, por su amor y apoyo motivacional durante la elaboración del presente escrito. Quiero agradecer a todas aquellas personas (amigos, maestros, familiares y conocidos) que en algún momento de mi vida me brindaron su apoyo y amistad para poder realizar mis estudios de licenciatura y de posgrado en esta rama de las ciencias que siempre me ha apasionado.



### LITERATURA CITADA

Bakker, R.T., 1986. *The Dinosaur Heresies: New Theories Unlocking the Mystery of the Dinosaurs and their Extinction*. Zebra Press: 481 Pp.

Bell, P.R., Campione, N.E., Persons IV, W.S., Currie, P.J., Larson, P.L., Tanke, D.H. & Bakker, R.T., 2017. Tyrannosauroid integument reveals conflicting patterns of gigantism and feather evolution. *Biology Letters*, 13: 20170092. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2017.0092>

Breithaupt, B.H., Southwell, E.H. & Matthews, N.A., 2008. Wyoming's *Dynamosaurus imperiosus* and Other Early Discoveries of *Tyrannosaurus rex* in the Rocky Mountain West. In Larson, P. & Carpenter, K., *Tyrannosaurus rex: The Tyrant King*. Indiana University Press: 57-62.

Brown, C.M., Henderson, D.M., Vinther, J., Fletcher, I., Sistiaga, A., Herrera, J. & Summons, R.E., 2017. An Exceptionally Preserved Three-Dimensional Dinosaur Reveals Insights into Coloration and Cretaceous Predator-Prey Dynamics. *Current Biology*: doi:10.1016/j.cub.2017.06.071

Carr, T.D., Varricchio, D.J., Sedlmayr, J.V., Roberts, E.M. & Moore, J.M., 2017. A new tyrannosaur with evidence of anagenesis and crocodile-like facial sensory system. *Nature: Scientific Report*, 7: 44942, DOI:10.1038/srep44942

Currie, P.J., 1997. Theropods. En Farlow, J.O. & Brett-Surman, M.K., *The Complete Dinosaur*. Indiana University Press: 216-233.

Currie, P.J., 1998. Possible Evidence of Gregarious Behaviour in Tyrannosaurids. *GAIA*, No. 15: 271-277.

Currie, P.J. & Koppelhus, E.B., 2015. The significance of the theropod collections of the Royal Tyrrell Museum of Paleontology to our understanding of Late Cretaceous theropod diversity. *Canadian Journal of Earth Science*, 52 (8): 620-629.

DePalma, R.A., Burnham, D.A., Martin, L.D., Rothschild, B.M. & Larson, P. L., 2013. Physical Evidence of predatory behavior in *Tyrannosaurus rex*. *PNAS*, Vol. 110 (31): 12560-12564.

Erickson, G.M., Makovicky, P.J., Currie, P.J., Norell, M.A., Yerby, S.A. & Brochu, S.A., 2004. Gigantism

and comparative life-history parameters of tyrannosaurid dinosaurs. *Nature*, Vol. 430: 772-775.

Fastovsky, D.E. & Weishampel, D.B., 2016. *Dinosaurs: A Concise Natural History*. Cambridge University Press, 3rd Edition: 477 Pp.

Holtz, Jr., T.R., 2004. Tyrannosauoidea. En Weishampel, D.B., Dodson, P. & Osmólska, H., "The Dinosauria", University of California Press, 2nd Edition: 111-136.

Holtz, Jr., T.R., 2012. Theropods. In Brett-Surman, M.K., Holtz Jr., T.R. & Farlow, J.O., "The Complete Dinosaur", Indiana University Press, 2nd Edition: 347-378.

Hone, D., 2016. *The Tyrannosaur Chronicles: The Biology of the Tyrant Dinosaurs*. Publicaciones Bloombury: 304 Pp.

Horner, J.R. & Lessem, D., 1993. *The Complete T-rex: New Discoveries Changing Our Understanding of the Wolrd's Most Famous Dinosaur*. Touchstone Publishing: 240 Pp.

Hutchinson, J.R. & García, M., 2002. Tyrannosaurus rex was not a fast runner. *Letters to Nature*, Vol. 415: 1018-1021.

Hutchinson, J.R., 2005 "Analysis of hindlimb muscle moment arms in Tyrannosaurus rex: using a three-dimensional musculoskeletal computer model: implications for stance, gait, and speed", *Paleobiology*, 31 (4): 676-701.

Larson, P., 2008. One Hundred Years of Tyrannosaurus rex: The Skeletons. En Larson, P. & Carpenter, K., "Tyrannosaurus rex: The Tyrant King", Indiana University Press: 1-56.

Manning, P., 2009. *Grave Secrets of Dinosaurs: Soft Tissue and Hard Science*. National Geographic: 312 Pp.

McCrea, R.T., Buckley, L.G., Farlow, J.O., Lockely, M.G., Currie, P.J., Matthews, N.A. & Pemberton, S.G., 2014. *A Terror of Tyrannosaurs: The First*

*Trackways of Tyrannosaurids and Evidence of Gregariousness and Pathology in Tyrannosauridae*", *PLoS ONE*, Vol. 9 (7): e103613. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103613>

Mikhailov, K., 1999, pers. comm. via Carpenter, K., "Eggs, Nests and Baby Dinosaurs: A Look at Dinosaur Reproduction", Indiana University Press: 52-76.

Molina-Perez, R. & Larramendi, A., 2016. *Récords y curiosidades de los dinosaurios terópodos y otros dinosauriomorfos*. LAROUSSE: 288 Pp.

Molnar, R.E., 2008. Reconstruction of the Jaw Musculature of Tyrannosaurus rex. In Larson, P.L. & Carpenter, K., "Tyrannosaurus rex: The Tyrant King", Indiana University Press: 255-281.

Murphy, N.L., Trexler, D. & Thompson, M., 2006. Leonardo, a mummified Brachylophosaurus from Judith River Formation. In Carpenter, K., "Horns and Beaks: Ceratopsian and Ornithopod Dinosaurs", Indiana University Press: 117-133.

Myhrvold, C. L., Stone, H. A., & Bou-Zeid, E., 2012. What is the use of elephant hair?. *PloS One*, 7(10), e47018.

Paul, G.S., 1988. *Predatory Dinosaurs of the World: A Complete Illustrated Guide*. Simon & Shuster Editores: 464 Pp.

Paul, G.S. & Christiansen, P., 2000. Forelimb posture in neoceratopsian dinosaurs: implications for gait and locomotion. *Paleobiology* 26 (3): 450-465.

Paul, G.S., 2008. The Extreme Lifestyles and Habits of the Gigantic Tyrannosaurid Superpredators of the Late Cretaceous of North America and Asia. In Larson, P.L. & Carpenter, K., "Tyrannosaurus rex: The Tyrant King", Indiana University Press: 307-354.

Paul, G.S., 2012. Evidence of Avian-Mammalian Aerobic Capacity and Thermoregulation in Mesozoic Dinosaurs. In Brett-Surman, M.K., Holtz Jr., T.R. & Farlow, J.O., "The Complete Dinosaur",

- Indiana University Press, 2nd Edition: 819-872.
- Paul, G.S. 2016. The Princeton Field Guide to Dinosaurs. Princeton University Press, 2da Edición: 108-119.
- Pontzer, H., Allen, V. & Hutchinson, J.R., 2009. Biomechanics of Running Indicates Endothermy in Bipedal Dinosaurs. PLOS ONE, 4 (12): 10.1371/annotation/635e46fc-4be3-4f42-ad5c-ee3a276cd24f.
- Reid, R.E.H., 2012. How Dinosaurs Grew. In Brett-Surman, M.K., Holtz, Jr., T.R. & Farlow, J.O., "The Complete Dinosaur", Indiana University Press, 2nd Edition: 621-636.
- Sanz, J.L., 2007. Cazadores de Dragones: Historia del Descubrimiento e Investigación de los Dinosaurios", Editorial Ariel: 420 Pp
- Seller, W.I., Pond, S.B., Brassey, C.A., Manning, P.L. & Bates, K.T., 2017. Investigating the running abilities of Tyrannosaurus rex using stress-constrained multibody dynamic analysis. PeerJ 5: e3420; DOI 10.7717/PeerJ.3420.
- Senter, P., 2008. Voices of the past: a review of Paleozoic and Mesozoic animal sounds. Historical Biology, 20 (4): <https://doi.org/10.1080/08912960903033327>
- Stevens, K.A., 2006. Binocular vision in theropod dinosaurs. Journal of Vertebrate Paleontology, Vol 26 (2): 321-330.
- Stokad, E., 2006. Tyrannosaurus rex gets sensitive. Science, 10: 966-967.
- Witmer, L.M. & Ridgely, R.C., 2009. New Insights Into the Brain, Braincase, and Ear Region of Tyrannosaurus (Dinosauria: Theropoda), with Implications for Sensory Organization and Behavior. The Anatomical Record, 292: 1266-1296.
- Xu, X., Wang, K., Zhang, K., Ma, Q., Xing, L., Sullivan, C., Hu, D., Cheng, S., and Wang, S. 2012. A gigantic feathered dinosaur from the Lower Cretaceous of China. Nature, 484: 92-95.
- Young, J. & Currie, P.J., 2011. Dino Gangs: Dr. Phillip J. Currie's New Science of Dinosaurs. Collins Publishing: 318 Pp.



# LOS LÍQUENES:

DEFINICIÓN, CARACTERÍSTICAS,  
IMPORTANCIA Y USOS POTENCIALES

Huereca Delgado, A., S.M. Salcedo Martínez, M. Alvarado  
Vázquez y S. Moreno Limón.

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de  
Ciencias Biológicas Departamento de Botánica, Autor de  
correspondencia: sergio.salcedomr@uanl.edu.mx



## RESUMEN

En este artículo se abordan los líquenes, que tradicionalmente son consideradas asociaciones entre un hongo y una o varias algas. En ellas, cada simbiote se beneficia del otro obteniendo nutrientes o protección. La asociación causa un cambio morfofisiológico donde el líquen adquiere una forma diferente al hongo o al alga y nuevas capacidades de síntesis, mejorando con ello sus capacidades adaptativa y competitiva. Existen alrededor de 13,500 especies de líquenes, el nombre de la especie del líquen lo recibe del hongo que participa en la asociación. México cuenta con 2500 especies registradas. La diversidad líquénica obedece a una radiación adaptativa a casi todo tipo de sustratos, desde suelo, rocas, cortezas o carapachos de tortugas, hasta estructuras hechas por el hombre. Los líquenes se identifican tradicionalmente por la consistencia y anatomía de su cuerpo o talo, de modo que los hay homómeros (gelatinosos) y heterómeros; la forma del talo, teniendo bajo este criterio costrosos, foliosos y fruticosos y por poseer ciertas estructuras peculiares que sirven para la fijación al sustrato, para la reproducción asexual o la reproducción sexual. También la presencia de sustancias líquénicas, que se revelan mediante reacciones químicas es diagnóstica de las especies. La importancia biológica de los líquenes radica en que son organismos pioneros en el establecimiento de la cobertura vegetal del suelo y una vez formado, los cianolíquenes lo fertilizan atrapando el nitrógeno atmosférico y cambiándolo de su forma inerte a otra reactiva biodisponible, además, la presencia de líquenes sirve de refugio y alimento a una gran diversidad de fauna. Por otra parte, en diversas culturas los líquenes son consumidos como gelatinas, pan, bebidas, ensaladas o se han utilizado como fuente de colorantes naturales o remedios medicinales. Existen más de 700 sustancias líquénicas, que poseen actividades antineoplásicas, antibióticas, antivirales, antioxidantes y como filtros solares. Su lento crecimiento se ha empleado para fechar la edad de estructuras o formaciones rocosas y la susceptibilidad a la contaminación atmosférica ha permitido usarlos como indicadores de la calidad del aire en áreas urbanas, pero estas útiles características también ponen en riesgo de desaparición a estos bellos seres poco conocidos.





## Líquenes, taxonomía, spot tests, sustancias liquénicas

### INTRODUCCIÓN

Nos gustaría evocar dos imágenes en nuestros lectores antes de abordar los líquenes: se trata de la lama y el moho. La lama es esa capa pastosa o fibrosa que comúnmente aparece después de las lluvias en el fondo de los charcos o en los estanques y arroyos y que puede desprenderse del fondo y flotar gracias a las burbujas de oxígeno que producen las algas que la forman. Estas algas diminutas pueden encontrarse en forma individual, en grupos o formando filamentos. Esta lama puede ser vista también en superficies húmedas como son las cortezas de árboles o rocas, donde puede tener un color verde, pardo amarillento o casi negro. Por otra parte, al moho muy probablemente lo hemos observado

cubriendo hojas, frutas o alimentos en descomposición, identificándolo como un algodoncillo de color comúnmente blanco, verde, negro o rosado. Al observarlo con una lupa o bajo el microscopio distinguimos que se trata de filamentos microscópicos que forman el cuerpo de ciertos hongos. En esta fase vegetativa el hongo se alimenta, crece y es capaz de reproducirse formando esporas asexuales, es decir por mitosis y sin la participación de gametos. La razón para describir lo anterior es porque un líquen se le definía hasta el 29 de Julio del 2016, como una asociación entre un hongo (moho) y una o varias algas (lama). Al hongo se le conoce como micobionte, al alga verde como ficobionte y a la cianobacteria como cianobionte.

Comúnmente cuando existen dos algas o más en un líquen éstas se localizan formando parte de diferentes estructuras en el líquen. Cabe aclarar que no todos los hongos ni todas las algas forman líquenes, pero en esta sociedad ambos participantes resultan beneficiados (simbiosis mutualista) recibiendo el alga del hongo nutrientes simples en la forma de sales minerales y protección de los rayos UV solares y contra la desecación, mientras el hongo recibe del alga nutrientes complejos producto de la fotosíntesis. Además, la forma del líquen resultante es definida y no se asemeja a ninguno de los simbiosistas, siendo única y constante para ellos. Esta forma parece depender de otro socio descrito en la revista Science en 2016 como una levadura basidiomicetácea que se encuentra en la corteza superior de los líquenes y cuyo linaje se presenta en áreas geográficas amplias (Spribille *et al.*, 2016).

Debido a que, la asociación causa que la fisiología del líquen sea diferente a sus partes, ahora puede sintetizar sustancias liquénicas que ni el alga o el hongo son capaces de sintetizar al estar separados. Actualmente se conocen más de 700 compuestos que sintetizan sólo los líquenes y que les ayudan a ser más competitivos y sobrevivir al permitirles aprovechar nuevos sustratos como alimento, resistir la desecación, protegerse de la insolación, el frío o el congelamiento, prevenir enfermedades y ahuyentar depredadores.

De estas sustancias liquénicas el hombre también se ha beneficiado, pues les ha encontrado diversas aplicaciones gracias a sus actividades antineoplásicas, antibióticas, antivirales, antioxidantes y como filtros solares (Nash 2008).

El término líquen se introdujo en tiempos de Teofrasto (260 a.C) y proviene del griego leicen) que significa musgo de árbol. Los líquenes antiguamente se reconocían como vegetales por ser inmóviles y fotosintéticos. Actualmente se les sigue nombrando en los libros como vegetales o como plantas por tradición. Sin embargo, sus componentes comúnmente pertenecen a los Reinos Fungi (el hongo), Eubacteria (algas verdeazules) o Viridiplantae (algas verdes) por lo que llamarles vegetales o plantas es actualmente incorrecto desde un punto de vista taxonómico. El nombre de la especie de un líquen se otorga de acuerdo al hongo que lo forma, consta siempre de dos palabras y para ser válido sigue las reglas de nomenclatura botánicas (Ej: *Caloplaca lobulata* que abreviado sería *C. lobulata*).

Las especies conocidas de líquenes no pertenecen a un solo grupo taxonómico, es decir algunas presentan características que permiten agruparlas en un mismo género, algunos géneros comparten ciertos rasgos que identifican a una familia, varias familias tienen particularidades que permiten agruparlas en cierto Orden y así en forma ascendente los Ordenes similares se agrupan en una Clase, las Clases en un Phylum y éstos en un Reino. De los 46 Ordenes conocidos de hongos 16 contienen especies liquénicas y de ellos seis Ordenes son simbiosistas obligados, es decir los hongos no sobreviven sin el fotobionte.

De las 13,500 especies conocidas de hongos liquenizados, el 98% pertenece a los ascomicetos (Phylum Ascomycota, Subphylum Pezizomycotina), pero existen además dos géneros de basidiomicetos (Phylum Basidiomycota) y uno de hongos micorrízicos (Phylum Glomeromycota) que comúnmente forman estas asociaciones y aún se pueden encontrar "pseudolíquenes" entre los actinomicetes (Phylum Actinobacteria) y los mixomicetos (Phylum Amoebozoa).

En los líquenes formados por ascomicetos (ascolíquenes), el hongo frecuentemente produce estructuras reproductoras sexuales distintivas en forma de un disco o copa, cuya superficie está revestida por saquitos colocados verticalmente que contienen 4 esporas producto de una meiosis (o múltiplos de 4 debido a mitosis posteriores sucesivas). En los basidiolíquenes, que comprenden 50 especies, las estructuras sexuales se caracterizan por presentar superficies revestidas por filamentos o hifas con los extremos engrosados a manera de un garrote y en cuyo exterior se desarrollan comúnmente 4 meiosporas.

Por otra parte, existen aproximadamente cuarenta géneros de algas y cianobacterias que actúan como fotobiontes en simbiosis liquénicas. Las algas que se encuentran formando parte de un líquen pueden ser de color verde (92% de los líquenes contienen clorofitas) o menos comúnmente, verdeazulado (8% de los líquenes contienen cianobacterias).

Dentro de las primeras, las del género *Trebouxia* se encuentran en el 46% de los líquenes y las del género *Trentepohlia* en el 28.5% de ellos, otros géneros comunes son *Coccomyxa* y *Mirmecia*; mientras que, entre las cianobacterias, predomina el género *Nostoc*, seguido por *Scytonema*, *Stigonema*, *Gloeocapsa* y *Calothrix*.

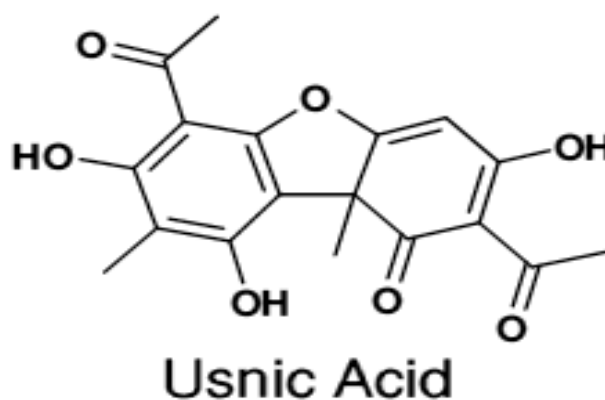
El número de especies reportadas para Europa es 7264, África 3830 registros, Oriente Medio 2417, Norte América 4800 y 4700 para América del Sur. Para México los registros comprenden 2500 especies de líquenes.

Los líquenes se desarrollan sobre diversas superficies. Los que viven sobre otros organismos o epibiontes, pueden ser epifitos o epizoos. Dentro

de los primeros se encuentran los cortícolas, que crecen sobre la corteza de los árboles, los lignícolas sobre troncos caídos, los muscícolas lo hacen sobre musgos, los folícolas crecen sobre hojas vivas, los liquenícolas son hallados sobre otros líquenes y en este caso se denominan parasimbiontes y los epizoos o zoobióticos crecen sobre tejidos animales, como son caparazones de tortugas o exoesqueletos de insectos.

Entre los líquenes que habitan sustratos específicos inertes se encuentran los terrícolas, ubicados directamente sobre el suelo; los humícolas, hallados sobre hojas muertas; los saxícolas o rupícolas que crecen sobre rocas e incluyen las especies endolíticas. Adicionalmente, un gran número de sustratos artificiales como: piel, pared, fibra de vidrio, esculturas, vitrales, pinturas, concreto, asfalto y huesos también son susceptibles de ser colonizados por estos organismos y son causa del deterioro de numerosas obras de arte alrededor del mundo.

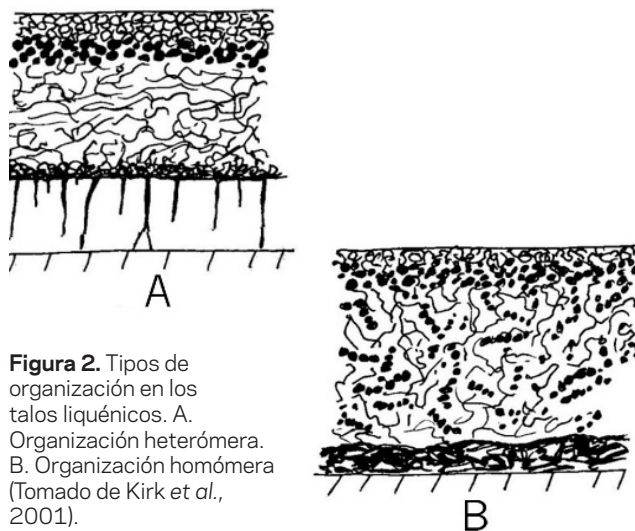
Los líquenes se identifican tradicionalmente por la forma de su cuerpo o talo, así como por los componentes químicos que produce, los cuales se ponen de manifiesto al hacer reaccionar las partes del talo donde se acumulan, con una serie de compuestos químicos, principalmente hidróxido de potasio, hipoclorito de sodio, para-fenilendiamina, lugol (Iodo) y ácido nítrico. Esto se logra aplicando el reactivo con un palillo sobre la superficie o el interior, después de realizar un corte con una navaja. Las reacciones positivas, que indican que



**Figura 1.** Diagrama de la molécula del Ac. Úsnico.

un compuesto químico está presente (comúnmente dépsidos, depsidonas, antraquinonas y xantonas), se aprecian como la aparición de colores vivos, como amarillo, rojo o morado, dependiendo del reactivo empleado y el compuesto de que se trate. Los compuestos presentes pueden darle al líquen protección contra la luz (atranorina y pigmentos como xantonas o ácidos úsnico, rizocárpico, vulpínico y pulvínico y sus derivados), depredadores (ácido lecanórico) o enfermedades (ácido úsnico), vuelven impermeables ciertas áreas internas (ácido fumarprotocetrárico) permitiendo el intercambio gaseoso necesario en la fotosíntesis o las hacen hidrófilas, favoreciendo la absorción de agua atmosférica (ácido norestíctico) y en consecuencia, la hidratación del talo.

El cuerpo de un líquen no presenta raíz, tallo u hojas, aunque puede tener estructuras semejantes llamadas respectivamente rizoides, talo (el cuerpo propiamente) y lóbulos. Los talos liquénicos están organizados básicamente en dos formas (Figura 2). El tipo de arreglo más común es el del talo heterómero, en el cual fotobionte y micobionte ocupan diferentes estratos dentro del líquen. El segundo tipo de arreglo o talo homómero es aquel en el que fotobionte y micobionte se encuentran distribuidos de forma uniforme. Este tipo de arreglo se presenta en los líquenes gelatinosos, los cuales son capaces de absorber más agua que los no gelatinosos en relación a su peso seco y en los que comúnmente se presentan las algas verdeazules como fotobiontes.



**Figura 2.** Tipos de organización en los talos liquénicos. A. Organización heterómera. B. Organización homómera (Tomado de Kirk et al., 2001).



**Figura 3.** Líquen gelatinoso: hidratado los círculos son apotecios (Santiago, N.L. y Marqués de Comillas, Chiapas).

En los talos heterómeros el talo se divide en varias capas, por una parte, aparece una corteza fúngica o capa exterior superficial de hifas muy apretadas, donde por lo general nunca se encuentran rastros del alga. A continuación, aparece la llamada capa gonidial, con hifas laxas mezcladas con células algales, es la región donde se produce la fotosíntesis por parte del fotobionte y la interacción de éste con el hongo se hace más patente por la presencia de los haustorios (hifas que rodean el cuerpo del alga). Por último, se presenta la médula, con hifas poco apretadas, de aspecto algodonoso y con espacios que permiten la aireación del talo. La médula es hidrófoba, de modo que incluso en las épocas de lluvia el interior del talo puede permanecer seco, permitiendo así la circulación del aire.

En la mayor parte de los líquenes foliáceos se constituye una corteza inferior por debajo de la médula, de anatomía similar a la corteza superior, pero en ella las hifas suelen tener la pared oscurecida por la presencia de melanina. Es probable que esta capa tenga un papel importante en la retención capilar de agua en la parte externa del talo.

En base a su aspecto, estratificación y las estructuras de fijación al sustrato, los talos se clasifican en gelatinosos, costrosos, foliosos y fruticosos. Los talos gelatinosos, son comúnmente homómeros y absorben agua rápidamente.



Los talos costrosos son aquellos que crecen fuertemente unidos al sustrato por la médula o un hipotalo, hasta el punto de que es imposible separarlos de él sin destruirlo. Este tipo de líquenes sobreviven en ambientes muy extremos y en superficies expuestas de roca, las cuales alteran mediante sus sustancias liquénicas.

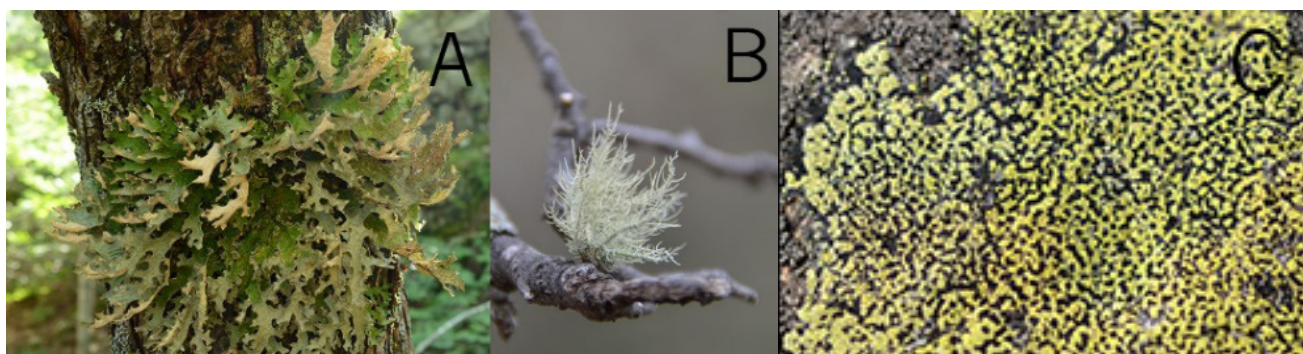
Dependen del agua del sustrato y poseen organización tanto homómera como heterómera. No poseen corteza inferior, se sujetan al sustrato por medio de la médula o de un hipotalo y su crecimiento es marginal, pudiendo muchas veces traslaparse diversos individuos y formar parches sobre el sustrato. El margen del talo puede estar claramente delimitado o ser difuso, pudiendo fisurarse, fragmentarse en placas o alargarse hasta formar lóbulos. El talo más complejo dentro de los costrosos es el llamado escumoso y representa el paso hacia los foliáceos. En él, las areolas crecen marginalmente hacia arriba hasta llegar a separarse parcialmente del sustrato, formando las características escamas que dan nombre al biotipo.

En los líquenes foliosos el talo puede ser homómero o heterómero, usualmente posee organización dorsiventral, distinguiéndose en él zonas ventrales y dorsales; comúnmente es aplanado y lobulado, y se encuentra parcialmente despegado del sustrato a diferencia de los costrosos. Poseen diversos órganos apendiculares que los fijan al sustrato,

como cordones miceliares o rizinas y captan el agua tanto del sustrato como de la atmósfera. Son los líquenes que alcanzan mayores tamaños dentro del grupo y presentan un amplio abanico de colores, de consistencia y de formas, como los umbilicados que poseen talo circular con un único anclaje al sustrato en el centro.

El talo de los líquenes fruticosos o fruticulosos es alargado, cilíndrico o muy estrecho y tiene el aspecto de un arbusto o se asemeja a una cabellera; mide de algunos milímetros a varios metros, poseen por lo general un único punto de unión al sustrato quedando el resto del organismo lejos de él; pueden ramificarse, a veces muy profusamente, poseen crecimiento apical o intercalar y pueden ser macizos o huecos en el caso de los homómeros y aplanados los heterómeros. Su forma representa una ventaja ecológica ya que aumentan mucho la superficie de captación con un mínimo volumen; por ello abundan en territorios donde la niebla es frecuente, desde los bosques lauroides hasta los desiertos costeros.

Para separar los líquenes en diferentes grupos hasta llegar a identificar las especies, los taxónomos identifican si están presentes diferentes estructuras. Algunas de las estructuras más importantes son los órganos apendiculares, que comprenden: *las rizinas*, que son grupos de hifas de células alargadas con pared gelatinizada y fusionadas en forma paralela que sirven para sujetarse y posiblemente para la retención



**Figura 4.** A) *Lobaria pulmonaria* B) *Usnea hirta* C) *Rhizocarpon geographicum*

de agua en la parte externa del talo; *los cordones rizinales* son paquetes más o menos gruesos de hifas irregularmente orientadas y ramificadas, de anatomía compleja, más laxos en el extremo y que penetran profundamente en el sustrato para expandir el talo y tienen una función similar a los estolones de las plantas (Figura 5A); *los discos basales de fijación* se localizan en los talos fruticosos y constituyen un grueso paquete de hifas medulares aglutinadas que penetran ligeramente en el sustrato; *el ombligo central* de talos umbilicados es similar, aunque más grueso; un *prótalo prosoplectenquimático* es la estructura que sirve de fijación a los líquenes costrosos, contribuye a la absorción mineral, a la agregación de partículas de suelo secretando material extracelular gelatinoso y se distingue en los márgenes del talo o entre las areolas, por la ausencia de fotobiontes y la diferencia de color (oscuro o claro) respecto al talo; *los cilios* son prolongaciones fúngicas que salen de la cara superior o margen de los talos (Figura 5B) y *el tomento* está formado por conjuntos de hifas filiformes hialinas, cortas, dispersas o densamente agrupadas, con aspecto de pelo. Por otra parte *las cifelas* del género *Sticta* son excavaciones en la cara inferior del talo recubiertas por la corteza o cortex y de anatomía compleja (Figura 6); *las pseudocifelas* son interrupciones de la corteza por la proliferación de hifas medulares que se aprecian como poros o líneas más claras y pueden aparecer en ambas caras del talo, carecen de cortex y pueden transformarse en soralios (Figura 5C); por último *los cefalodios* son estructuras constituidas por un alga distinta de la que forma el talo principal, están bien delimitados y su morfología es diferente del resto del talo (Figura 5D).

Las estructuras reproductivas asexuales que son importantes en taxonomía pueden ser simbióticas o no simbióticas. Las estructuras simbióticas, generalmente son porciones pequeñas del talo o estructuras que se originan sobre él, por sus características se clasifican en: soralios, soredios, isidios, pseudoisidios. La efectividad de estas formas de reproducción asexual está asegurada porque se separan del talo agregados de algas e hifas del hongo.

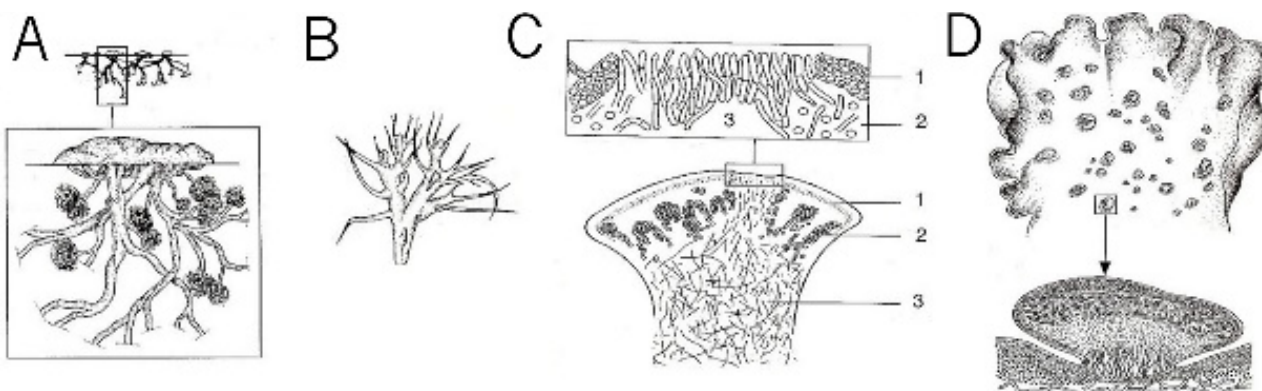
La propagación asexual por medio de la fragmentación del talo o la formación de soredios e isidios es la

principal forma de reproducción. Muchos grupos de líquenes sexuales considerados evolucionados, presentan en sus fructificaciones productoras de esporas, algunas regiones con algas y éstas se dispersan junto con las esporas. Los *soredios* son estructuras carentes de corteza, de 25 a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro, formadas por algunas células fotobiontes fuertemente envueltas por hifas. Estos comúnmente se agrupan en masas submacroscópicas de aspecto granular llamadas *soralios* (Figura 6).

Los *isidios* por el contrario se encuentran estructurados de la misma manera que el talo liquénico; son porciones de talo que se desarrollan en la superficie conservando el córtex y la estructura en capas y que pueden desprenderse con facilidad. Se originan en las capas internas del talo y emergen a través de rupturas o poros en la corteza. Son extensiones cilíndricas del talo que se observan como protuberancias de la corteza superior, conformadas por hifas y fotobiontes asociadas de manera más o menos continua (Figura 6).

Las estructuras aposimbióticas, son estructuras reproductoras asexuales que el hongo puede desarrollar por su cuenta; como son las esporas asexuales o *conidios*, que se producen en diferentes estructuras multihifales especializadas (Figura 6) como son los *picnidios* (conidioma en forma de botella con ostiolo circular o longitudinal y con la superficie interna cubierta entera o parcialmente por células conidiógenas), *campilidios* (conidiomas en forma de casco, comunes en líquenes folícolas tropicales), *esporodoquios* (conidioma en el que la masa de esporas está sobre un cojín superficial de conidióforos cortos y pseudoparénquima), *hifóforos* (esporóforo asexual pedicelado, erecto y peltado). Este tipo particular de esporas que se producen en gran cantidad, es capaz de permanecer en el medio durante mucho tiempo a la espera de encontrar el alga o cianofita adecuada con la que ha de asociarse, como ocurre con las esporas sexuales. Aunque no son las más comunes, las algas también pueden originar estructuras reproductoras asexuales como son *estados flagelados* y *hormogonios*.

En los hongos liquenizados, tanto los del Phylum Ascomycota, como los del Phylum Basidiomycota, las estructuras generadoras de esporas sexuales son casi idénticas a las que producen hongos no liquenizados.



5. Órganos apendiculares. (A) cordones rizinales, (B) cilios marginales, (C) pseudocifela: 1. corteza, 2. capa de fotobiontes, 3. médula; (D) cefalodios discoidales en cara superior. Vista superficial v corte transversal (Tomado de Izco et al.. 2004).

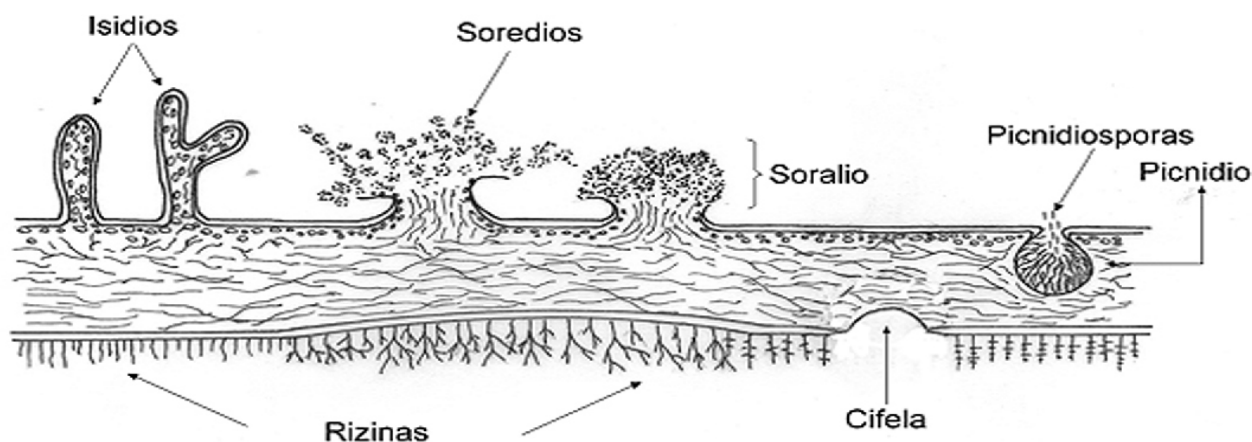


Figura 6. Esquema del corte de un líquen, indicando: isidios, soredios, sorolio, picnidiosporas, picnidio, rizinas y cifela (Tomado de Álvarez y Guzmán Dávalos, 2009).

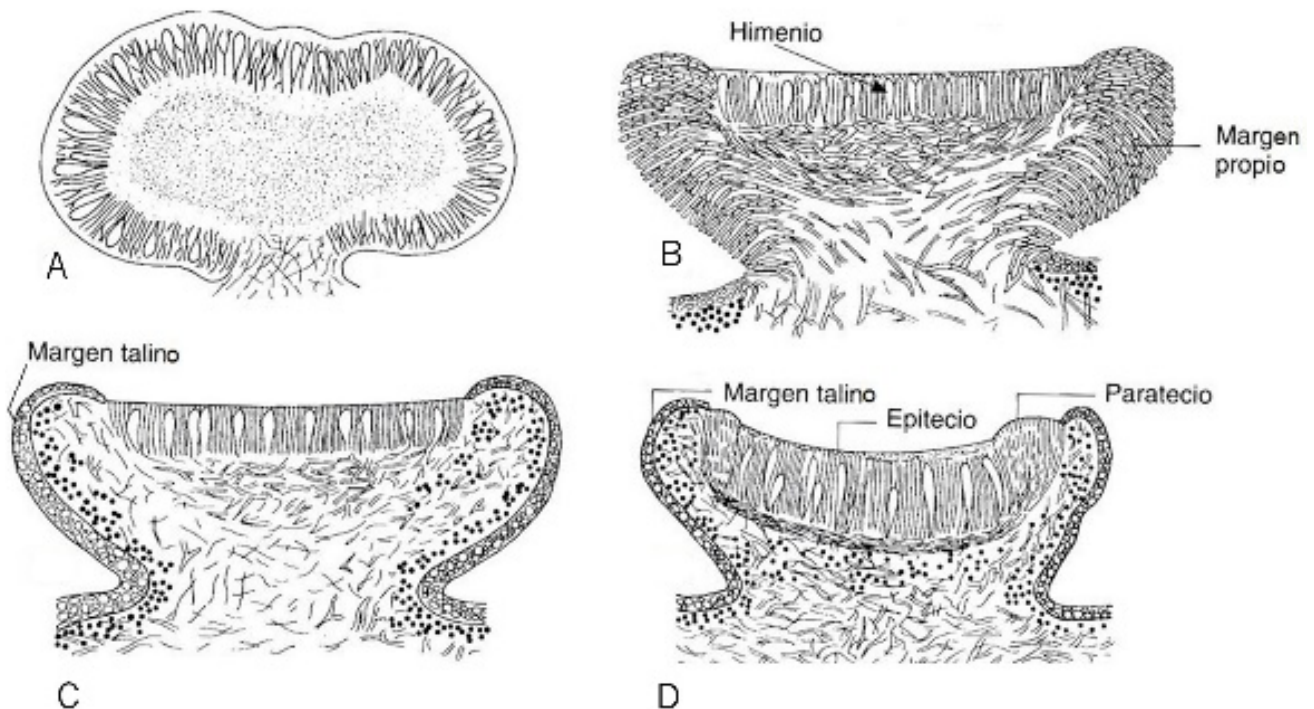


En los Ascolíquenes el ascocarpo contiene al himenio cuyas hifas generadoras producen las ascas y en ellas, esporas sexuales. Los *ascocarpos* se pueden clasificar en cuatro grandes grupos:

- I. *Apotecios*, cuerpos en forma de copa o disco abierto en cuyo interior se encuentra el tejido fértil que contiene las ascas y esporas. Pueden ser de tipo *lecanorino*, *biatorino*, *lecideino* o *zeorino*, si presenta respectivamente margen talino, propio (excípulo), propio con pigmentación oscura, o ambos márgenes propio interior y talino exterior (Figura 7).
- II. *Cleistotecios*, ascocarpos que presentan en un estroma una cavidad que no tiene salida al exterior, cerrado (Figura 8A).
- III. *Peritecios*, ascocarpos en forma de botellas que pueden estar hundidos o elevados en el talo (Figura 8B).
- IV. *Lirelas* o *histerotecios*, se agrupan aquí a todos los cuerpos reproductivos sexuales que presentan forma alargada, lineal o ramificada (Figura 8C).

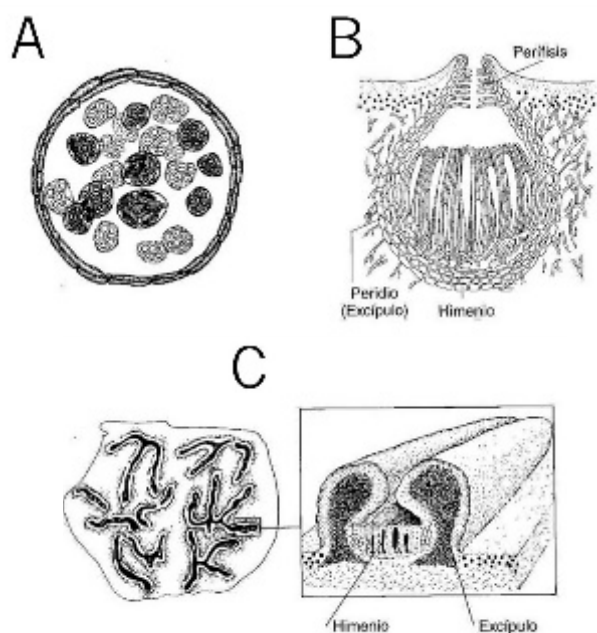
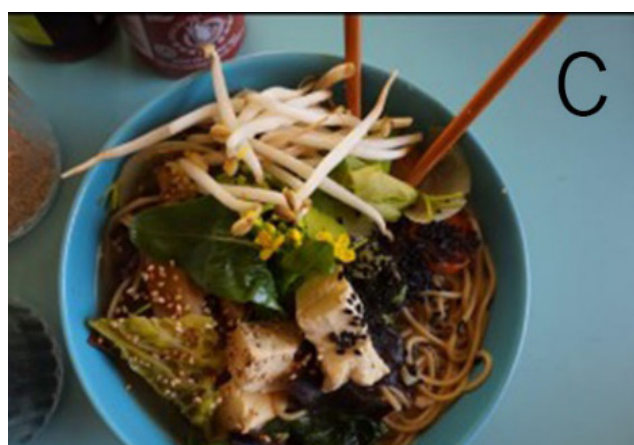
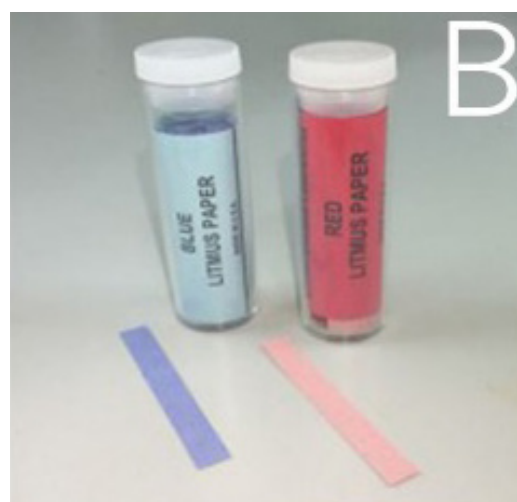
En líquenes estas estructuras pueden estar formadas exclusivamente por el hongo o tener parte de la capa algal participando de ellas, en ambos casos las estructuras producidas en el himenio se diseminan en busca de un nuevo fotobionte o desarrollan un hongo de vida libre, salvo en hongos que son incapaces de vivir fuera de la simbiosis.

Los líquenes tienen una gran importancia en los ecosistemas. Son organismos pioneros en la colonización de sitios rocosos y al degradar superficialmente las rocas son los iniciadores de la formación de los suelos que soportarán más tarde la cobertura vegetal, pues al propiciar la acumulación de polvo, empiezan a formar un sustrato apto para que se establezcan diversos organismos como musgos, invertebrados y pequeños vertebrados y posteriormente, las plantas. En las regiones boreales y de bosques templados, los líquenes formados por cianobacterias fijan el nitrógeno atmosférico enriqueciendo los suelos con este macronutriente esencial. En las tundras ciertas especies sirven de alimento principal a los renos, caribús y mamíferos pequeños, mientras en otras regiones sirven de albergue y fuente de alimento a



**Figura 7.** Tipos de apotecios en líquenes: (A) apotecio biatorino muy convexo, (B) apotecio lecideíno, (C) apotecio lecanorino, (D) apotecio zeorino (Tomado de Izco et al., 2004).

aves, gusanos, insectos, arácnidos, ácaros y moluscos. En China se utilizan diferentes especies de *Umbilicaria* para preparar sopas y ensaladas, mientras en varios países nórdicos se emplean a ciertos líquenes como forraje para los animales domésticos o para la elaboración de pan, gracias a su contenido de liquenina, un polisacárido similar al almidón. Los líquenes son utilizados como alimentos en países europeos, elaborando con ellos dulces, chocolates, gelatina, cerveza o licor, entre ellos se cuenta a *Cetraria islandica*, *Umbilicaria* sp., *Evernia prunastri*, *Cladonia rangiferina* y *Aspicilia esculenta* que se piensa sea el maná Hebreo. En Japón el líquen *Umbilicaria esculenta* conocido como lwatake se come en ensaladas o frito mientras en América algunas tribus indígenas de Norteamérica consumen *Bryoria fremontii* como gelatina de frutas o como pan y los tarahumaras del norte de la Sierra Madre Oriental elaboran tesgüino utilizando *Usnea subfusca* o *U. variolosa*. Con el "líquen de reno" nórdico *Cladonia stellaris* se hacen trabajos de floristería y decoración y la mezcla de especies de *Parmelia* en Europa o *Xanthoparmelia* en América con tabaco se ha utilizado para fumar en rituales de ciertos grupos étnicos.



**Figura 8.** Tipos de ascocarpos: (A) cleistotecio, (B) peritocio, (C) lirelas. Corte transversal (A tomado de Liu y Hall, 2004; B y C de Izco, et al., 2004).

**Figura 9.** A) Estambre teñido con líquenes B) Papel indicador de pH cubierto con extracto líquénico C) Líquen negro en platillo culinario. (Fotos de: Noah Siegal tomada de mycopigments.com, Wikimedia commons y del Dominio Público, respectivamente).

Algunas especies medicinales se emplean en el tratamiento de catarros, gripes, hemorragias y hematomas (*Cetraria islandica*) y otras tienen aplicaciones en la industria gracias a los compuestos que se extraen de ellas, los cuales son utilizados en medicina como inhibidores del crecimiento de bacterias y hongos (como el ácido úsnico que actúa como desacoplador de la fosforilación oxidativa), como antitumorales (homoglucanos D de *Umbilicaria*, *Lobaria*, *Usnea* y *Sticta*), en perfumería como fijadores de esencias aromáticas y para dar las “notas bajas” a los perfumes (*Pseudevernia furfuracea*, *Evernia prunastri*), o en la industria textil, como colorantes naturales rojos (*Roccella*, *Ochrolechia tartarea*), amarillos y castaños (*Usnea* spp, *Ramalina* spp), pardos (*Parmelia furfuracea*, *P. omphalodes*) o malvas (*Umbilicaria* spp) ya que no requieren de mordientes.

Gracias a su lento crecimiento y persistencia los líquenes se han utilizado para calcular la edad de superficies rocosas y restos arqueológicos y por su gran susceptibilidad, una de sus aplicaciones recientes es como indicadores y monitores de ciertos contaminantes atmosféricos urbanos e industriales que inhiben o impiden su crecimiento, como el plomo, dióxido y monóxido de azufre y metales radiactivos. Lamentablemente, la útil característica de lento crecimiento de los líquenes puede ser su perdición cuando se trata de su aprovechamiento, ya que la recolecta intensiva de estos organismos, sin un programa de aprovechamiento sustentable y un respaldo científico sobre el impacto de esta actividad sobre sus poblaciones, puede causar tarde o temprano como mínimo la reducción de las áreas de distribución e incluso llegar en casos extremos a la desaparición de especies en las regiones proveedoras comerciales.

---

Si desea aprender algo más acerca de los líquenes puede consultar alguna de las siguientes páginas:

The Consortium of North American Lichen Herbaria (CNALH)  
<http://lichenportal.org/portal/>

American Bryological and Lichenological Society  
<http://www.abls.org/>

Colección de líquenes MEXU  
<http://www.biodiversidad.gob.mx/fichas-conabio-war/resources/coleccion/523>

Introduction to Lichens  
<http://www.ucmp.berkeley.edu/fungi/lichens/lichens.html>

Lichenland  
<http://gis.nacse.org/lichenland/>

The world of lichenology  
[www.botany.hawaii.edu/cpsu/](http://www.botany.hawaii.edu/cpsu/)

International Association for Lichenology  
<http://www.lichenology.org/>

The British Lichen Society  
<http://www.britishtichensociety.org.uk/the-society/lichenologist>

---





## LITERATURA CITADA

Álvarez, I. y Guzmán Dávalos, L. (2009) Flavopunctelia y Punctelia (Ascomycetes liquenizados) de Nueva Galicia, México. Revista Mexicana de Micología. 29: 15-29.

Brodo, I. M. (1974) Substrate Ecology. En: The Lichens. Ahmadjian V y Hale ME, (eds.). Academic Press, Nueva York. Pp. 401-411.

Brodo, I. M., Sharnoff, D. S., Sharnoff, S. (2001) Lichens of North America. Yale University Press, New Haven. 795 p.

Chaparro de Valencia, M. (2002) Hongos liquenizados. Vol. 8 Colección Textos. Univ. Nac. De Colombia. Bogotá, 220 Pp.

Illana Esteban, C. (2009) Líquenes comestibles. Boletín de la Sociedad Micologica de Madrid. 33: 273-282

Izco, J., Barreno, E., Burgués, M., Costa, M., Devesa, J. A., Fernández, F., Gallardo, T., Llimona, X., Prada, C., Talavera, S., Valdés, B. (2004) Botánica. 2da edición. McGraw-Hill Interamericana. 906 p.

Kirk, P. M., Cannon, P. F., David, J. C., Stalpers, J. A. 2001. Dictionary of the fungi. CABI Publishing. 655 p.

Liu, Y. J. and Hall, B. D. (2004) Body plan evolution of ascomycetes, as inferred from an RNA polymerase II phylogeny. Proceedings of the National Academy of Sciences. USA. 101: 4507-4512.

Méndez Estrada, V. H. y Monge Nájera, J. (2011) El uso de los líquenes para evaluar el estado de la contaminación atmosférica a nivel mundial. Biocenosis. 25 (1.2): 51-67.

Nash III, T. H. (2008). Lichen Biology, Cambridge University Press. New York City. Pp 130

Spribille, T., Tuovinen, V., Res, P., Vanderpool, D., Wolinski, H., Aime, M.C., et al. (2016) Basidiomycete yeasts in the cortex of ascomycete macrolichens. Science, 353(6298): 488-492



# PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN ESPECIES SELECTAS DEL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO

Foroughbakhch Pournavab R.<sup>1</sup>, M. Ngangyo Heya <sup>1</sup>, A. Carrillo Parra<sup>2</sup>, L.R. Salas Cruz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León, Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias Biológicas, Ciudad Universitaria, C.P. 66450, San Nicolás de los Garza, Nuevo León

<sup>2</sup> Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Boulevard del Guadiana #501, Ciudad Universitaria, Torre de Investigación, C.P. 34120, Durango, Dgo. México

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Campus de Ciencias Agropecuarias, Francisco Villa s/n, Col. Ex-Hacienda "El Canadá" C.P. 66050, Escobedo, Nuevo León, México



**Palabras clave: Matorral espinoso tamaulipeco, Biomasa foliar, volumen de madera**

## RESUMEN

Las especies del matorral disponen de una gran capacidad para desarrollarse en condiciones climáticas extremas, lo que tiene una influencia directa sobre su productividad. En el presente trabajo se cuantificó la producción de madera aprovechable, así como la biomasa foliar en plantaciones experimentales de 28 años de edad de las especies *Acacia berlandieri* Benth. (huajillo), *Havardia pallens* (Benth.) Standl. (tenaza), *Helietta parvifolia* (Gray) Benth. (barreta), *Ebenopsis ebano* (Benth.) Coulter (ebano) y *Acacia wrightii* Benth. (uña de gato) y se comparó con la producción de las mismas especies desarrolladas en forma natural en el matorral nativo. Durante un año, se registraron las variables altura total (m), diámetro basal (m), diámetro a la altura de pecho (m) para determinar el volumen ( $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ) de madera producida, al igual que se evaluó la biomasa foliar de cada árbol. Los resultados indican que el volumen de madera aprovechable de las plantaciones experimentales no presentó diferencias significativas con el matorral nativo ( $P>0.05$ ). En el área de plantaciones, las especies que produjeron mayor volumen fueron *H. parvifolia* ( $0.396 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ) y *E. ebano* ( $0.118 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ), mientras que *H. pallens* ( $0.059 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ) y *A. berlandieri* ( $0.052 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ) fueron las especies con menor producción. Los valores de biomasa foliar registrados variaron significativamente tanto para especies como por sitios ( $P<0.05$ ), y altamente significativas por estaciones ( $P=0.01$ ), alcanzando el máximo de su productividad en verano, con un valor muy alto ( $9029.322 \text{ kg ha}^{-1}$ ) en *E. ebano*, mientras que el valor menor ( $103.0817 \text{ kg ha}^{-1}$ ) se registró con *A. wrightii* en invierno. Estos resultados permiten destacar la importancia de realizar plantaciones en áreas degradadas del matorral, que permitan incrementar su producción, al aplicarlas los tratamientos silvícolas adecuados.

## INTRODUCCIÓN

El Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) es una de las vegetaciones más abundantes y con mayor historial de utilización en México (García, 1999), cubriendo una extensión de  $125,000 \text{ km}^2$  de la Planicie Costera del Golfo de México en el noreste del país y al extremo sur de Texas, EE.UU. (Ruiz, 2005). Se utiliza para una gran diversidad de fines y sobre todo, el silvopastoril, en donde el pastoreo depende fuertemente del estrato arbustivo, ya que las condiciones son difíciles para el cultivo de pastos. Este estrato presenta hojas verdes durante la mayor parte del año, con un alto contenido de proteína cruda (Ramírez, 2003), radicado la ventaja de ser utilizado como fuente de forraje para los animales (Von Maydel, 1996). Además, la mayoría de esas plantas proporciona hábitat para la vida silvestre y cobertura para prevenir la erosión del suelo (González y Cantú, 2001). Por eso, es imprescindible contar con conocimientos de los matorrales, basados en las características de crecimiento y

producción, lo que proporciona una visión integral de las oportunidades silvícolas a aplicar adecuadamente en cada área, considerando proyecciones del crecimiento y rendimiento confiables, para una buena planificación del manejo, mejoramiento y aprovechamiento de estos recursos. En este sentido, una variable fundamental a considerar en la estructura arbórea es la biomasa foliar, ya que guarda relación directa con la productividad primaria (Ledesma et al., 2010). Es donde ocurren muchos procesos fisiológicos fundamentales para el crecimiento, como fotosíntesis neta, transpiración, respiración, asimilación de  $\text{CO}_2$  (Gower y Norman, 1991; Margolis et al., 1995). A medida que el tamaño de los árboles se incrementa, la evaluación de esta biomasa consume más tiempo y recursos (Rodríguez-Ortiz et al., 2012). Para superar la inherente dificultad al medirla con precisión, se generan ecuaciones específicas, considerando variables de fácil medición como el diámetro y

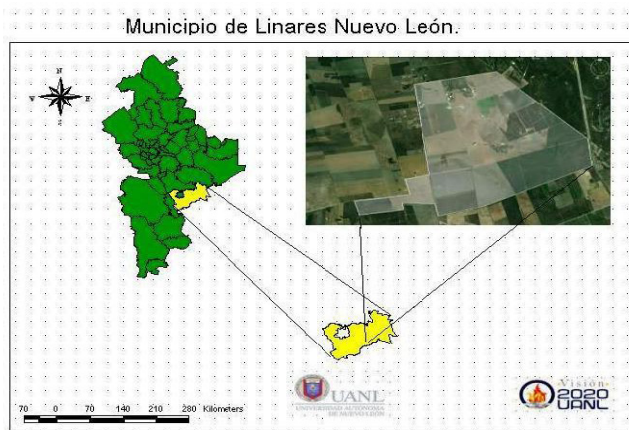
la altura. Otro rasgo a tener en cuenta con respecto a la biomasa es que su producción esta correlacionada con algunas propiedades del ambiente positiva o negativamente y parece estar en función de un gradiente de productividad con diferentes niveles (Mittelbach et al., 2001 y Clark et al., 2001). La determinación adecuada de la biomasa de un bosque es un elemento de gran importancia, debido a que esta permite determinar los montos de carbono y otros elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes y representa la cantidad potencial de carbono que puede ser liberado a la atmósfera, o conservado y fijado en una determinada superficie (Brown, 1997; Schelegel, 2001). En este contexto, se plantea como objetivo general de este estudio, evaluar el crecimiento, la producción volumétrica y de biomasa foliar de especies nativas del matorral, tanto en plantaciones como en la vegetación nativa.



## METODOLOGÍA

### DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la reserva ecológica del Matorral-Escuela de la Facultad de Ciencias Forestales UANL (Fig. 1), que cuenta con plantaciones de 30 años de edad con una gran variedad de especies que no fueron sujetos a ningún tipo de tratamiento silvícola ni de aprovechamiento. Esta reserva se encuentra dentro de las coordenadas  $24^{\circ} 47'$  de latitud norte y  $99^{\circ} 32'$  de longitud oeste en una región de la planicie entre 430 a 450 m de altitud en el piedemonte de la Sierra Madre Oriental, México (Foroughbakhch *et al.*, 2014). El clima regional se define como semiárido y subhúmedo [(A) C (Wo)] en el esquema de Köppen modificada por García (2004), con dos estaciones de lluvias (verano y otoño) y una temporada seca entre noviembre y abril.



**Figura 1:** Localización del Matorral-Escuela de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL, en el Municipio de Linares, Nuevo León, México

## SELECCIÓN DE LAS ESPECIES

El criterio de selección consistió en elegir las especies leñosas características del matorral, considerando su frecuencia y abundancia. Las especies elegidas para el desarrollo del estudio fueron: *Helietta parvifolia* (Barreta), *Ebenopsis ebano* (éban), *Acacia berlandieri* (Huajillo), *Havardia pallens* (Tenaza), *Acacia wrightii* (Uña de gato).

## DISEÑO EXPERIMENTAL

La muestra estuvo compuesta por 27 parcelas de 10x10 m cada una, 15 en plantaciones con especies nativas, a razón de tres parcelas por especie y 12 parcelas en el matorral nativo. En cada parcela de las plantaciones, se encuentran 25 árboles con una separación de 3 m entre ellos.

Se registró la altura total, los diámetros basal y a altura de pecho (Fig. 2). El volumen de madera de cada árbol se determinó aplicando la fórmula de Smalian (Moctezuma, 2007) con un factor de coeficiente mórfico de 0.6.



**Figura 2.** Mediciones de: A) Altura total, B) Diámetro basal y C) Diámetro a altura de pecho.

$$V = \left[ \left( \frac{D_1}{2} \right)^2 \times \pi + \left( \frac{D_2}{2} \right)^2 \times \pi \right] / 2 \times L$$

Donde  $D_1$  y  $D_2$  equivalen a los diámetros de cada sección y  $L$  largo de la sección. Una vez obtenido el volumen por árbol se realizó el proceso matemático para estimar el volumen de madera correspondiente a cada especie.

## ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA FOLIAR

El recorrido y la medición se hicieron durante las cuatro estaciones del año (de verano 2013 a otoño 2014) (Figura 2 A-C), y se utilizó el método de Adelaide o Método de referencia de mano (Foroughbakhch *et al.*, 1996), que consistió en seleccionar una rama denominada "unidad de referencia", representativa de la especie de interés en forma y densidad foliar (Fig. 3A).

Posteriormente, se contó el número de unidades de mano que contendría cada árbol en los cuatro puntos cardinales de la copa, y la muestra de referencia unitaria de cada especie fue llevada al laboratorio para separar las hojas (Fig. 3B) y se secaron en una estufa a 65 °C hasta obtención del peso constante, para estimar la biomasa foliar seca de estas especies.

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos colectados se analizaron estadísticamente con el programa SPSS versión 21.0. Se realizó un análisis de varianza para determinar la homogeneidad



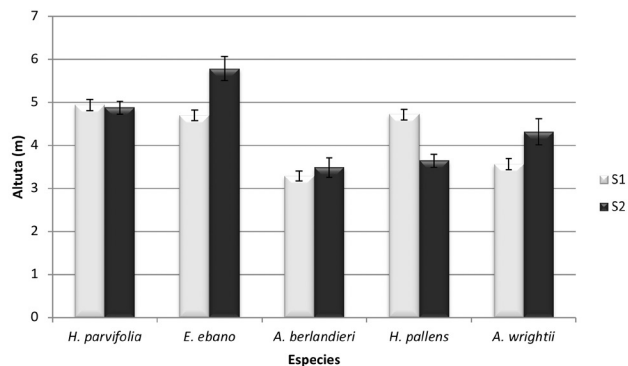
**Figura 3.** Determinación de la biomasa foliar mediante el método "Adelaide": A) Rama de referencia, B) Separación de hojas

de datos, estudiando las diferencias en las variables usadas para describir el crecimiento, a lo largo de un gradiente de calidad de sitio. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tuckey a un nivel de significancia de 0.05.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 1. Crecimiento en altura

La figura 4, presenta los resultados de la altura media de cada especie por sitio. El crecimiento en altura tiene gran influencia en el poder competitivo de una especie, además, en incrementar el volumen aprovechable forestalmente. Los resultados sobre el crecimiento en altura (Tabla 1) revelan la existencia de una diferencia altamente significativa ( $P < 0.01$ ) entre las especies. Sin embargo, no hubo diferencia significativa entre los sitios. La plantación alcanza una altura de 4.25 m como promedio de todas las especies, mientras que eso es de 4.30 m en el matorral nativo. De manera general, el promedio de las alturas es de 4.27 m. Se observa que, en ambos sitios, *Ebenopsis ebano* y *Helietta parvifolia* son las especies que mostraron mayor altura, con 5.24 y 4.90 m respectivamente.



**Figura 4.** Crecimiento en altura media y desviación estándar de especies selectas del matorral espinoso tamaulipeco en dos sitios diferentes. S1. Plantaciones experimentales, S2. Matorral nativo

**Tabla 1.** Análisis de varianza del crecimiento en altura de especies selectas del matorral espinoso tamaulipeco.

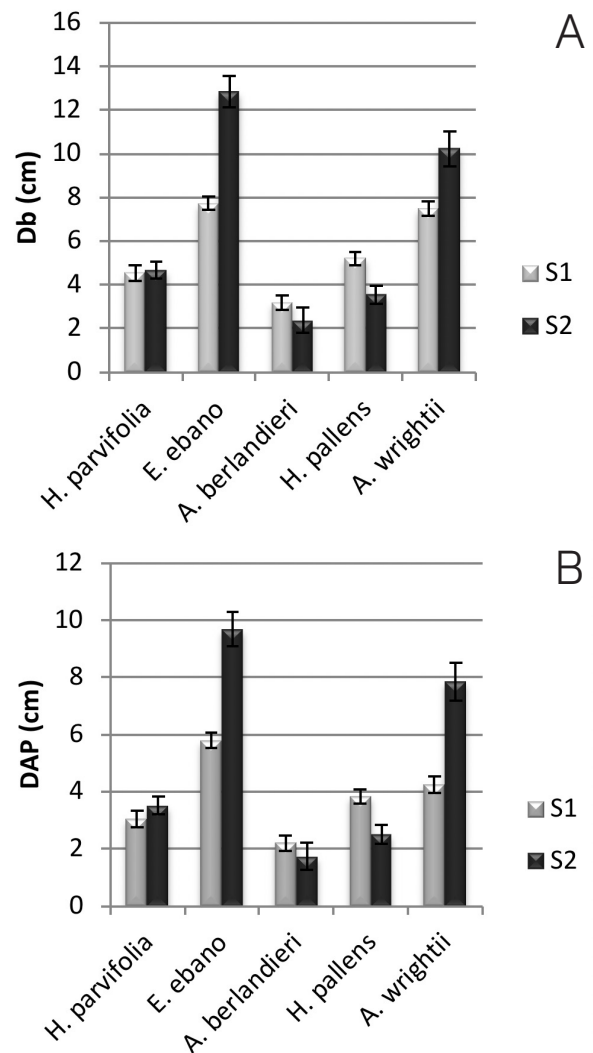
Fuente	Suma de cuadrados	gl	cuadrados medios	F	Sig.
Intersección	5582.151	1	5582.151	5493.963	.000
Sitio	2.391	1	2.391	2.353	.126
Especie	136.874	4	34.218	33.678	.000
Sitio * Especie	48.936	4	12.234	12.041	.000

En un estudio similar, Ruiz (2005) estableció que la altura promedio de las especies del matorral fue de 3.28 m, presentando a *H. pallens* como la especie de mayor altura con 5 m. García (1999) por su parte, obtuvo en su estudio una altura promedio de 3.2 m, siendo *H. pallens* la especie con mayor altura (5.8 m), esto debido a que el estudio se realizó en lugares cercanos a la sierra madre oriental lo cual hace que esta especie sea más predominante y como consiguiente presente mayor altura.

## 2. Crecimiento en diámetro

El diámetro de los árboles es un parámetro muy importante para el aprovechamiento forestal, que indica el uso potencial que se les pueda dar. La figura 5 presenta el diámetro de las especies estudiadas, tanto a la altura basal (a) como a la altura del pecho (b).

Las cinco especies estudiadas presentaron diferencias altamente significativas ( $P < 0.01$ ) (Tabla 2) en lo que respecta al diámetro basal y al diámetro a la altura de pecho. El diámetro basal (Db) promedio es de 5.59 cm en la plantación y 5.20 cm en la vegetación nativa, cuando el diámetro a altura de pecho (DAP) es de 3.83 cm en la plantación y 3.86 cm en la vegetación nativa, *Ebenopsis ebano* y *Acacia wrightii* presentándose como las especies de mayor diámetro tanto basal, como a altura de pecho con 10.28 y 8.86 cm (Db), 7.74 y 6.04 cm (DAP) respectivamente. Estimando el incremento en diámetro de cuatro especies por medio del conteo de los anillos de crecimiento a la altura de pecho, Heiseke y Foroughbakhch (1990) evaluaron dos comunidades de matorral en la región de Linares: "matorral de planicie" y "matorral de la loma", y mencionaron que, para que un árbol alcance un DAP de 6.5 cm deben transcurrir 16 años en la planicie, y 32 años en la loma.



**Figura 5.** Crecimiento diametral de especies selectas del matorral espinoso tamaulipeco en dos sitios: S1. Plantaciones experimentales, S2. Matorral nativo. a) Diámetro basal, b) Diámetro a altura de pecho.



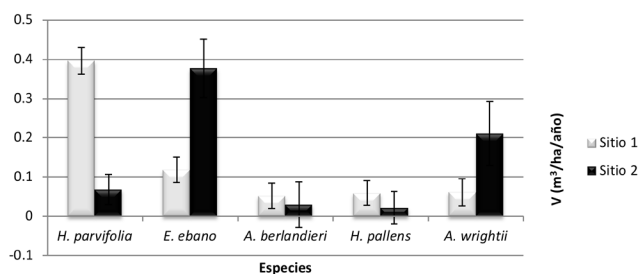
**Tabla 2.** Análisis de varianza de los diámetros de especies selectas del matorral espinoso tamauilpeco en dos sitios diferentes: Plantación y Matorral nativo.

Fuente	Variable dependiente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrados medios	F	Sig.
Intersección	Db	11355.280	1	11355.280	1600.482	.000
	DAP	5866.758	1	5866.758	1224.739	.000
Sitio	Db	90.899	1	90.899	12.812	.000
	DAP	111.279	1	111.279	23.231	.000
Especie	Db	2110.337	4	527.584	74.361	.000
	DAP	1149.875	4	287.469	60.012	.000
Sitio * Especie	Db	433.875	4	108.469	15.288	.000
	DAP	321.523	4	80.381	16.780	.000

Por otra parte, los resultados muestran que los diámetros de mayor tamaño se presentaron en el nativo. Como mencionaron Heiseke y Foroughbakhch (1990), el desarrollo de la plantación tanto en altura como en diámetro fue afectado por las heladas que tuvieron durante los periodos de invierno de 1987-1988. Eso podría explicar que, en ciertos puntos, los resultados de las plantaciones no reflejen lo esperado a comparación del matorral nativo dado que, en el matorral, las especies son más vigorosas.

### 3. Volumen de madera

La producción volumétrica de las especies ensayadas se presenta en la figura 6. La producción volumétrica no presentó diferencia estadística significativa entre sitios ( $P > 0.05$ ), sin embargo, la producción en volumen de madera fue diferente entre especies. *Helietta parvifolia* produjo  $0.396 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ , la menor producción la registraron las especies *Acacia berlandieri* y *Havardia pallens* con  $0.052$  y  $0.059 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$  respectivamente en la vegetación nativa.

**Figura 6.** Volumen promedio y desviación estándar de la producción de especies selectas del matorral espinoso tamauilpeco en dos sitios: S1. Plantación, S2. Matorral nativo**Tabla 3.** Análisis de varianza del volumen de madera de especies selectas del matorral espinoso tamauilpeco en dos sitios: S1. Plantación, S2. Matorral nativo

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrados medios	F	Sig.
Intersección	5.752	1	5.752	80.414	.000
Sitio	.001	1	.001	.019	.890
Especie	3.089	4	.772	10.795	.000
Sitio * Especie	3.451	4	.863	12.063	.000

El volumen de madera fue mayor en el sitio nativo en comparación con el encontrado en la plantación para las especies *E. ebano* y *A. wrightii* con 0.377 contra 0.118 m<sup>3</sup>/ha/año y 0.211 contra 0.061 m<sup>3</sup>/ha/año respectivamente.

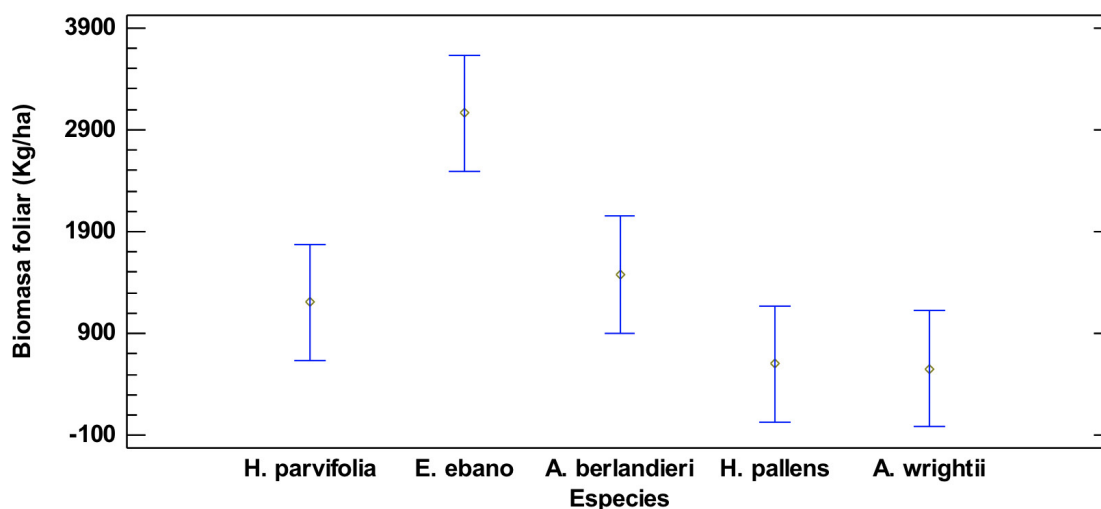
De acuerdo con Martínez et al. (2006), la finalidad del establecimiento de plantaciones forestales a nivel mundial es para satisfacer la demanda de materia prima industrial, uso doméstico, producción de forraje, postes para la construcción y/o leña, lo que se confirma en el presente estudio, ya que se encontró que el volumen de madera aprovechable fue por lo general, mayor en la plantación que en la vegetación nativa.

#### 4. Biomasa foliar

La producción de biomasa foliar presentó diferencias altamente significativas ( $P < 0.01$ ) tanto entre especies como estaciones (Tabla 4). La producción promedio anual fue mayor en *E. ebano* con 2686.80 kg ha<sup>-1</sup>, y menor en *A. wrightii*, con 431.21 Kg ha<sup>-1</sup> (Fig. 7).

**Tabla 4.** Análisis de Varianza de la Biomasa foliar de especies selectas del matorral espinoso tamaulipeco por estación del año.

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrados medios	F	P
Especies	4.99701	4	1.24925E7	6.39	0.0003
Estación	5.51028	3	1.83676E7	9.40	0.0000
Residuo	1.01584	52	1.95354E6		
Total coregido	2.06657	59			



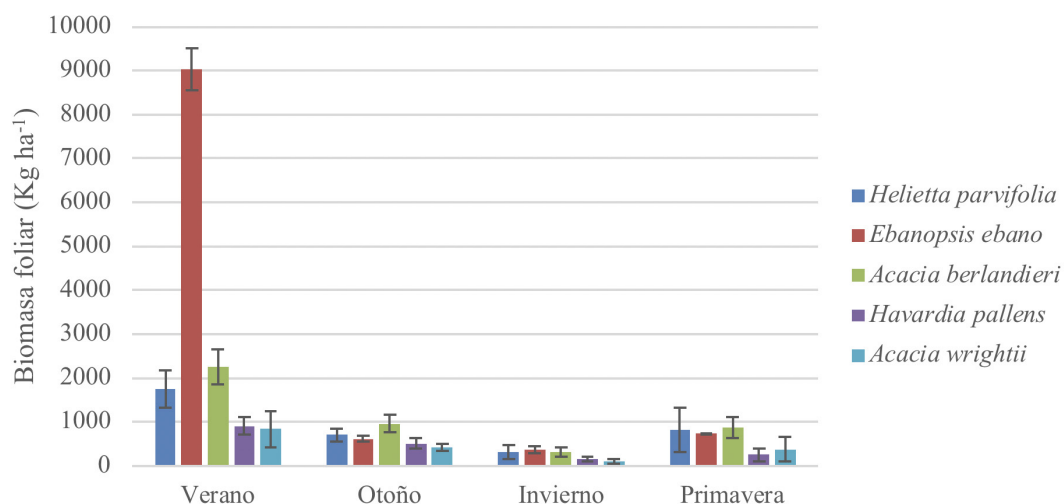
**Figura 7.** Producción promedio anual de biomasa foliar de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco

La biomasa foliar alcanza el máximo de su productividad en verano, con un valor muy alto ( $9029.32 \text{ kg ha}^{-1}$ ) en *Ebanopsis ebano*, mientras que el valor menor ( $103.08 \text{ kg ha}^{-1}$ ) se registró con *Acacia wrightii*, en invierno (Fig. 8). Esto se debe a que la mayoría de las especies del matorral florecen y producen hojas en las etapas primarias de la primavera, como lo indican los trabajos de Navar y Jurado (2009). Los valores más bajos se registraron en invierno, resaltando que el clima es un factor determinante en la productividad foliar. El verano parece entonces ser la época propicia para un buen desarrollo de hojas, mientras que en invierno, las diferentes especies solo necesitan lo mínimo de hojas suficientes para sus funciones fisiológicas.

En muchos estudios, se ha evaluado un valor de biomasa foliar, mayor a lo encontrado en el presente trabajo. Yarena-Yamallel et al. (2011) obtuvieron el valor de  $25000 \text{ Kg ha}^{-1}$  de biomasa foliar en un matorral primario, mientras que Nívar (2008) y Búrquez et al. (2010) encontraron respectivamente  $12930$  y  $13030 \text{ Kg ha}^{-1}$  para el matorral espinoso tamaulipeco. Pero en un matorral de desierto, Búrquez y Martínez (2011) señalan un valor de  $6670$  y  $10570 \text{ Kg ha}^{-1}$  para el matorral espinoso. Tales variaciones se deben a las distintas formas de vida que presentan las diferentes especies en cuestión.

Para la producción de biomasa, las plantas utilizan los nutrientes, acumulados en gran cantidad en las hojas, que son órganos de corta vida. Por ello, el reciclado de los nutrientes previamente incorporados en éstas y que ya han llevado a cabo su contribución a la fotosíntesis puede tener un gran significado adaptativo (Escudero y Mediavilla, 2003) y representar parte considerable de las necesidades anuales de nutrientes para la construcción de la biomasa foliar. Aerts (1996) presenta una variación de cantidad en los nutrientes resorbidos, según las especies, entre aproximadamente el 28 y el 83 % de las máximas cantidades almacenadas en la copa para nitrógeno y entre 25 y 98 % para fósforo. De acuerdo a este patrón, las especies estudiadas presentarían muy buenas disponibilidades en NP durante el verano, y especialmente con *Ebanopsis ebano*, que fue la sobresaliente en cuanto a la biomasa foliar.

Del otro lado, Eckstein y Karlsson (1997) comprobaron que hay ciertos rasgos de las plantas que están asociados a una alta productividad, y el más decisivo es la relación entre la superficie foliar y su masa. Este razonamiento no se confirmó en el caso de *Helietta parvifolia*, con el cual se observa mayor superficie foliar, a comparación de las demás especies estudiadas.



**Figura 8.** Biomasa foliar de cinco especies del matorral espinoso tamaulipeco, por estaciones del año



Se reporta también que las plantas tienen que utilizar los nutrientes para fijar más carbono y emplear luego el carbono para adquirir más nutrientes (Chapin et al., 1987). Oren et al. (2001) han observado que el aumento de dióxido de carbono atmosférico provoca un incremento de biomasa en bosques asentados sobre suelos ricos, pero no en suelos pobres, lo que sugiere que en este caso los nutrientes se hacen especialmente limitantes cuando el CO<sub>2</sub> es abundante. Por tanto, el efecto limitante de los nutrientes resulta relevante, ya que puede reducir la importancia de las diferentes formaciones vegetales como sumideros del exceso de CO<sub>2</sub>. Para controlar las concentraciones de dióxido de carbono, la repoblación forestal es una de las medidas que se proponen generalmente. Pero existen muchas dudas acerca de la posibilidad de que bosques maduros puedan responder al incremento del CO<sub>2</sub> atmosférico con un aumento de su biomasa que secuestre parte del exceso de CO<sub>2</sub>. En estas condiciones, sólo el incremento de la superficie forestal con ejemplares jóvenes en crecimiento podría tener efectos positivos (Escudero y Mediavilla, 2003).

## CONCLUSIÓN

El presente trabajo permitió conocer la producción de cinco especies del Matorral Espinosos Tamaulipeco en términos de biomasa foliar, volumen de madera aprovechable, así como su desarrollo tanto diametral como en altura, en plantaciones experimentales al igual como en el área nativa. Resulta que las plantaciones forestales rinden más que el matorral nativo, úna lo que podría ser aprovechado para incrementar la producción de esas especies, de manera a dar mayor satisfacción a las numerosas necesidades que cubren, desde el punto de vista ecológico, económico y social. Sin embargo, se recomendaría las especies *Ebenopsis ebano*, *Helietta parvifolia* y *Acacia wrightii*, que presentaron mejores adaptaciones y expectativas tanto en las plantaciones como en su área nativa.



## LITERATURA CITADA

- Aerts, R., 1996. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns. *Journal of Ecology* 84: 597-608.
- Burquez, A., A. Martínez-Yrizar, S. Nuñez, T. Quintero, y A. Aparicio. 2010. Above-ground biomass in three Sonoran Desert communities: variability within and among sites using replicated plot harvesting. *Journal of Arid Environments*, 74: 1240-1247.
- Burquez, A. y Y.A. Martínez. 2011. Accuracy and bias on the estimation of above-ground biomass in the woody vegetation of the Sonoran Desert. *Botany*, 89: 625-633.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a Primer. *Fao Forestry Paper* 134, Roma.
- Chapin, F.S., A.J. Bloom, C.B. Field y R.H. Waring. 1987. Plant responses to multiple environmental factors. *BioScience* 37: 49-57.
- Clark, D.A., S. Brown, D. Kicklighter, J. Chambers, J.R. Thomlinson y J. Ni. 2001. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecological Applications*, 11: 356-370.
- Eckstein, R.L. y P.S. Karlsson, 1997. Above-ground growth and nutrient use by plants in a subarctic environment: effects of habitat, life-form and species. *Oikos* 79: 311-324.
- Escudero, A. y S. Mediavilla, 2003. Dinámica interna de los nutrientes. *Ecosistemas* 2003/1 (URL: [www.aet.org/ecosistemas/031/investigacion7.htm](http://www.aet.org/ecosistemas/031/investigacion7.htm)).
- Foroughbakhch, R., R.G. Diaz, L.A. Hauad, y M.H. Badii, 1996. Three Methods of Determining Leaf Biomass on Ten Woody Shrub Species in Northeastern Mexico. *Agrociencia*. 30: 3-24.
- Foroughbakhch, R.P.; J.L. Hernández-Piñero, y A. Carrillo-Parra. 2014. Adaptability, growth and firewood volume yield of multipurpose tree species in semiarid regions of Northeastern Mexico. *Int. J. Agric. Pol. Res.* 2 (12): 444-453. <http://dx.doi.org/10.15739/IJAPR.016>.
- García, H.J. 1999. Caracterización del matorral en condiciones prístinas en el área de Linares, N. L. México. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México. 68 pp.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana (3ª ed., 252 p). México D.F.: UNAM.
- González, R.H., S.I. Cantú. 2001. Adaptación a la sequía de plantas arbustivas del matorral espinoso tamaulipeco. *CiENCiA UANL*. 4:454-461.
- Gower, S.T. y J.M. Norman. 1991. Rapid estimation of leaf-area index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology* 72:1896-1900.
- Heiseke, D. y R. Foroughbakhch. 1990. El matorral como recurso forestal. Reporte Científico No. 1 (1985)- reimpresión 1990- Facultad de Ciencias Forestales, UANL 31 p.
- Ledesma, M., C.A. Carranza y M. Balzarini. 2010. Estimación de la biomasa foliar de *Prosopis flexuosa* mediante relaciones alométricas. *Agriscientia*, Córdoba, 27 (2): 87-96.
- Margolis, H., R. Oren, D. Whitehead y M.R. Kaufmann. 1995. Leaf area dynamics of conifer forests. In: Smith W.K. y T.M. Hinckley (Eds.). *Ecophysiology of coniferous forests*. Academic Press. p: 181-223.
- Martínez R., R. Azpiroz, A. Rodríguez de la O, A. Cetina y E. Gutiérrez. 2006. Importancia de las Plantaciones Forestales de *Eucalyptus*. *Ra Ximhai Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*. Universidad Autónoma Indígena de México.
- Mittelbach, G.G., C.F. Steiner, S.M. Scheiner, K.L. Gross, H.L. Reynolds, R.B. Waide, M.R. Willig, S.I. Dodson, y L. Gough, 2001. What is the observed relationship between species richness and productivity? *Ecology*, 82 (9), 2381-2396.

- Moctezuma, L.G. 2007. Primer ciclo de seminarios de investigación del CENID-COMEF. México DF: En Memorias de Seminario INIFAP-CENID, 38 p.
- Návar, J. 2008. Carbon fluxes resulting from land-use changes in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Carbon Balance and Management*, 3: 6. Doi 10.1186/1750-0680-3-6.
- Návar, C.J. y Y.E. Jurado. 2009. Productividad foliar y radicular en ecosistemas forestales del Noreste de México. *Rev. Cien. For. Mex*, 34 (106): 89-106.
- Oren, R., D.S. Elisworth, K.H. Johnsen, N. Phillips, B.E. Ewers, C. Maier, K.V.R. Schater, H. McCarthy, G. Hendrey, S.G. McNutty y G.G Katul. 2001. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere. *Nature* 411: 469-471.
- Ramírez, O.R. 2003. Dinámica estacional del valor nutritivo y digestión ruminal del forraje de 10 arbustiva de Baja California Sur, México. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Biológicas, UANL. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 199p.
- Rodríguez-Ortiz, G.; H.M. De Los Santos-Posadas, V.A. González-Hernández, A. Aldrete, A. Gómez-Guerrero y A.M. Fierros-González. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18(1), 2012:25-41.
- Ruiz, J.L. 2005. Caracterización estructural del Matorral Espinoso Tamaulipeco, Linares N.L. Tesis de Maestría. FCF\_ UANL.
- Schelegel, B., 2001. Estimación de la biomasa en bosques de tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Universidad Austral de Chile, Valdivia, 13p.
- Von Maydel, H.J., 1996. Appraisal of practices to manage woody plants in semiarid environment. In: Bruns, S. J., Luukanen, O, Woods, P. (eds) *Dry land forestry research*. International Foundation for Science, Stockholm. Pp. 47-64.
- Yerena-Yamallel, J.I., J. Jiménez-Pérez, O.A. Aguirre-Calderón y E.J. Treviño-Garza. 2011. Concentraciones de carbón en la biomasa aérea del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17(2):283-291.



# LOS MAMÍFEROS DE DOSEL: ¿QUIÉNES SON Y QUE HACEN? UN EJEMPLO EN VERACRUZ

Alberto Astiazaran<sup>1</sup> y Sonia Gallina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Posgrado del Instituto de Ecología, A.C. Carretera Antigua a Coatepec #351, el Haya, Xalapa, Veracruz C.P. 91070

<sup>2</sup>Red de Biología y Conservación de Vertebrados. Instituto de Ecología, A.C. Carretera Antigua a Coatepec #351, el Haya, Xalapa, Veracruz C.P. 91070



*Nasua narica*





**Palabras clave: dosel, mamíferos arborícolas, reserva privada, riqueza, Veracruz.**

## RESUMEN

Los mamíferos de dosel son un grupo de mamíferos que tienen la capacidad de habitar en la copa de los árboles. Este grupo se encuentra compuesto por mamíferos que utilizan básicamente los árboles (especies arborícolas) para llevar a cabo la mayoría de sus actividades como alimentación, refugio, transporte, etc. o aquellos que los usan para alguna de ellas y que se les conoce como escansoriales o semiarborícolas. Habitan principalmente zonas tropicales, aunque, también se pueden encontrar en bosques templados. La riqueza de estos mamíferos es tanta, que se dice que la mitad de los mamíferos no voladores presentan hábitos arborícolas. A pesar de la alta riqueza de estos mamíferos, ha sido poco el esfuerzo que se ha hecho para conocerlos por las dificultades que implica su estudio, por lo que en general su ecología se encuentra poco comprendida. En México se han registrados 33 especies de mamíferos de dosel, de las cuales, 20 se distribuyen en el estado de Veracruz. El presente trabajo es uno de los primeros esfuerzos en México que se enfocó en estudiar específicamente este grupo de mamíferos del dosel mediante el uso de cámaras trampa colocadas en los árboles, y a través de recorridos tanto diurnos como nocturnos en la Reserva Privada Santa Gertrudis, en el Municipio de Vega de Alatorre, Veracruz.

## INTRODUCCIÓN

Los “mamíferos del dosel” son un grupo conformado por especies de diversos gremios tróficos y una capacidad locomotora que le confiere una característica singular, el “trepar” árboles para desarrollar gran parte o toda su vida en el dosel de los árboles (Kays y Allison, 2001). Los mamíferos que tienen la capacidad de trepar árboles son conocidos como arborícolas y presentan una serie de adaptaciones. Usan sus extremidades para moverse entre las ramas por lo que presentan garras afiladas. Pequeños mamíferos arborícolas como las ardillas presentan largas y puntiagudas uñas que les permiten agarrarse de la corteza de los árboles y tienen gran maniobrabilidad en troncos y ramas con considerable agilidad (Feldhamer et al., 2015). Los perezosos de Centro y Sudamérica, emplean sus largas garras para colgarse de las ramas por largos períodos. Los mamíferos plantígrados para poder ser arborícolas han modificado la unión entre metacarpos o metatarsos y las falanges, lo cual les permite trepar con facilidad al poder girar las “muñecas” de las patas. Los dedos de los primates son aún más flexibles, por lo cual se dice que son prensiles, además han desarrollado dedos oponibles lo que les da más agarre, y están bien representados en las selvas tropicales como en Sudamérica, África y Asia. Muchos mamíferos arborícolas tienen largas colas que utilizan para balancearse y en muchas ocasiones son también prensiles que les permite agarrarse de las ramas como ocurre con la mayoría de las especies arborícolas (Emmons, 1995; Kirk et al., 2008; Goswami et al., 2011, Feldhamer et al., 2015).

Los mamíferos arborícolas son más diversos en los bosques tropicales, donde encuentran además de refugio en la gran variedad de especies de árboles, tienen alimento disponible como hojas y frutos. Los más estudiados son los primates a nivel mundial y que en el sureste de México podemos encontrar tres especies: *Allouatta palliata*, *Allouatta pigra* y *Ateles geoffroyi*. La mayoría de las especies de mamíferos arborícolas han sido poco estudiadas.

A pesar de que existe una gran diversidad de mamíferos con hábitos arborícolas (Emmons, 1995), la ecología de algunas especies se encuentra poco entendida (Kays & Allison, 2001; Oliveira-Santos et al., 2008). En México se han registrado 496 especies de mamíferos, de los cuales aproximadamente 33 especies son mamíferos de dosel (Ramírez-Pulido et al., 2014). En su mayoría se encuentran distribuidas en las selvas tropicales, aunque, también podemos encontrar algunas especies distribuidas en bosques templados (Ceballos y Oliva, 2005). Entre los órdenes que cuentan con especies del dosel están: Didelphimorphia, Carnívora, Pilosa, Primates y Rodentia.

De las 33 especies registradas en el país, 20 se encuentran distribuidas en el estado de Veracruz (González-Christen y Delfín-Alfonso, 2016). Sin embargo, los únicos trabajos específicos con mamíferos de dosel se han hecho con primates (e.g., Solano et al., 2000a; Solano et al., 2000b; Mandujano y Estrada, 2005; Estrada, 2007; Ramos-Fernández et al., 2013; Serio-Silva et al., 2015).



## LOS MAMÍFEROS ARBORÍCOLAS DEL CENTRO DE VERACRUZ

Veracruz es un estado muy extenso que posee ecosistemas muy variados, desafortunadamente, sólo le queda el 10% de su vegetación original ya que ha sido sumamente transformado por actividades agropecuarias (Sedarpa, 2006; Gerez-Fernández y Pineda-López, 2011). Además, es uno de los estados más diversos en cuanto a fauna (Morales, 2011; González-Christen y Delfín-Alfonso, 2016). Particularmente, en lo que se refiere a los mamíferos, el estudio formal de ellos comenzó aproximadamente en 1860 llevando a cabo deposición de ejemplares en colecciones científicas. Hasta la fecha, se han registrado en total 195 especies de mamíferos terrestres agrupados en 11 órdenes (González-Christen y Delfín-Alfonso, 2016). Del total de especies registradas al menos 20 son consideradas de dosel, representando de esta forma el 60% del total de mamíferos del dosel que se han registrado en la República Mexicana (Ceballos y Oliva, 2005).

La Reserva Ecológica de Santa Gertrudis (RESG) es una reserva de tipo privada que se ubica en el municipio de Vega de Alatorre, Veracruz, en el macizo montañoso de la Sierra de Chiconquiaco. En el año de 1982 por iniciativa del Lic. Rafael Hernández Ochoa exgobernador de Veracruz se establece como Zona de Protección Forestal y Fáunica, mediante decreto presidencial (Diario Oficial de la Federación, del 16 de agosto 1982). Cuenta con aproximadamente 1000 ha, con una intrincada orografía, ya que muestra un rango altitudinal que va de los 80 hasta los 940 msnm. El tipo de vegetación predominante es la selva mediana subperennifolia, sin embargo, antiguamente algunas partes del terreno se utilizaron para el cultivo del café por lo que ahora esos sitios presentan acahuales, es decir vegetación secundaria bien desarrollada (B. Vega Hernández com. pers).

## MAMÍFEROS ARBORÍCOLAS DE LA RESERVA NATURAL STA. GERTRUDIS

En un estudio que realizamos en la RESG utilizamos 9 cámaras trampa que se colocaron entre 8 y 12 m de altura en los árboles, durante un año (febrero 2016



Didelphis marsupialis

a febrero 2017). Además, para complementar los registros se llevaron recorridos tanto diurnos como nocturnos en búsqueda de mamíferos. El grupo de mamíferos arborícolas encontrados en la reserva está comprendido por 12 especies que describiremos más adelante. A diferencia de las especies que podemos encontrar en el sur del estado, en la RESG no se encontró ninguna especie de primate a pesar de que históricamente sí los hubo (Astiazarán, 2017).

Con base en los trabajos de Coates Estrada y Estrada (1986) y Aranda y March (1987) se dan a continuación las descripciones de las especies de mamíferos encontradas en el dosel.

El ratón tlacuache (*Marmosa mexicana*) es un marsupial pequeño, similar a un ratón, que puede pesar entre 30 y 80 g, tiene cola prensil, es de hábitos nocturnos y se alimenta principalmente de insectos, aunque también puede comer frutos, huevos y pequeños vertebrados. Habita en bosques tropicales. No se encuentra enlistada en ninguna categoría de riesgo.

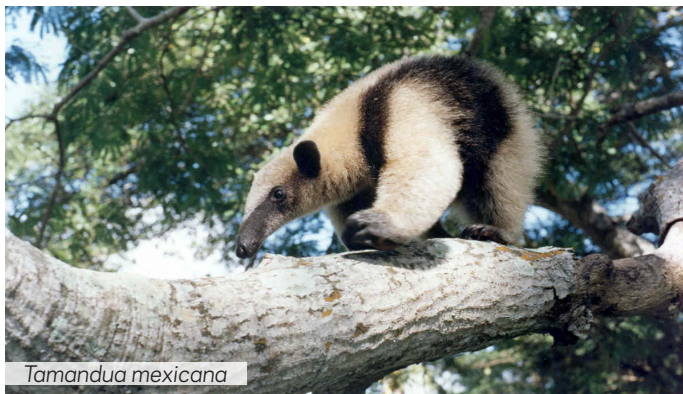
El tlacuache (*Didelphis marsupialis*) es otro marsupial de tamaño similar al de un gato doméstico, tiene





*Philander opossum*

pelaje de color gris a negro y cola desnuda, escamosa y prensil. El dedo pulgar de las patas carece de garra y es oponible. Pesa entre 2 y 5 kg. Es un animal solitario y nocturno. Llega a tener de 6 a 13 crías. Se alimenta de frutos, insectos, aves, etc. Los tlacuaches son cazados por su carne, además, se cree que tiene propiedades medicinales, además de que, suelen tener conflicto con el humano porque atacan a las gallinas y se comen sus huevos.



*Tamandua mexicana*

El tlacuache de cuatro ojos (*Philander opossum*), recibe este nombre común porque presentan dos manchas blancas encima de los ojos. Tiene un pelaje fino y denso, con cola larga y prensil. Es pequeño pudiendo pesar entre 200 y 400 g, y habita cerca de cuerpos de agua en los bosques tropicales, de hábitos nocturnos. Se alimenta principalmente de insectos y frutos, se ha visto que son buenos dispersores de semillas.



*Leopardus wiedii*

El oso hormiguero, chupamiel o brazo fuerte (*Tamandua mexicana*) es característico por la forma de su cabeza y hocico alargado en forma tubular sin dientes, pero con una lengua larga y pegajosa que le permite alimentarse de hormigas y termitas, a este tipo de alimentación se le conoce como mirmecofagia. El color de su pelaje es blanco amarillento. Un animal adulto pesa entre 4 y 6 kg. Habitan en los bosques tropicales, así como en manglares. Se encuentra enlistado en la NOM-059-SEMARNAT-2010 en categoría de Peligro de Extinción.



*Potos flavus*

El tigrillo o margay (*Leopardus wiedii*) es el más pequeño y único felino en México con hábitos principalmente arborícolas. Presenta como característica, el poder rotar las muñecas de las patas traseras lo que le permite subir y bajar fácilmente de los árboles. Muestra una coloración café amarillento con manchas negras. Se alimenta de pequeños mamíferos, aves, reptiles, etc. Es el felino silvestre más pequeño de México ya que pesa entre 3 y 6 kg. Habita en bosques tropicales y manglares, con actividad principalmente nocturna. Esta especie es buscada por lo atractivo de su piel. Se encuentra enlistada en la NOM-059-SEMARNAT-2010 en categoría de Peligro de Extinción.

La martucha (*Potos flavus*) es de cuerpo alargado con patas cortas, cabeza redonda y rostro achatado, con cola fuerte y prensil, su pelaje es de color café

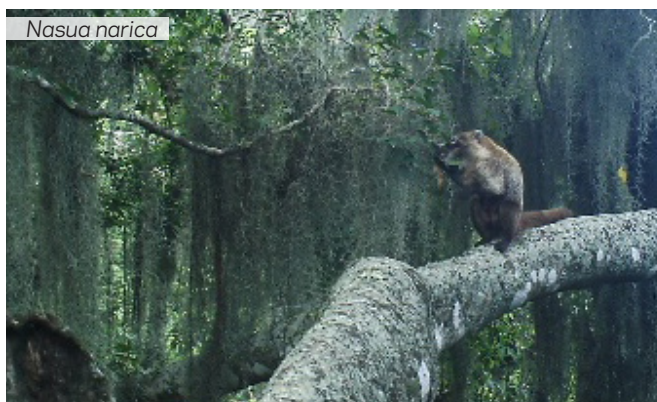
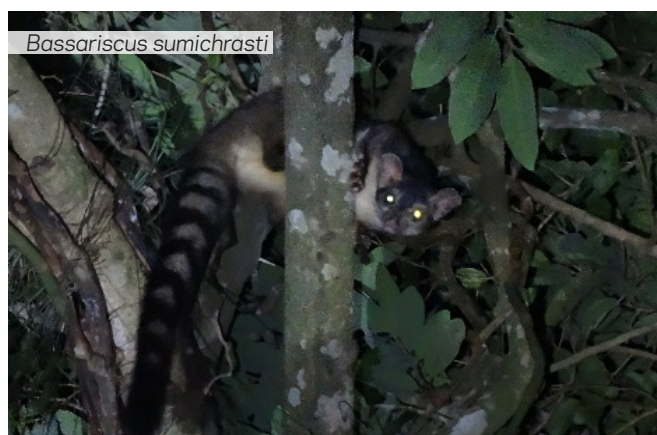


anaranjado. Una característica que las distingue es que tienen una lengua larga. Puede pesar entre 3 y 6 kg. Se alimenta principalmente de frutos, aunque también se puede alimentar de flores y néctar. Es nocturna y son importantes dispersores de semillas, así como polinizadores. Esta especie es cazada principalmente por su piel y capturada como mascota. Se encuentra enlistada en la NOM-059-SEMARNAT-2010 en categoría de Protección Especial.

El cacomixtle, sietillo o huiloncha (*Bassariscus sumichrasti*), es de tamaño mediano con cuerpo alargado, patas cortas y hocico alargado, tiene cola larga y peluda con 9 anillos negros y grises. Pesa de 600 g a 2 kg, son solitarios y de actividad nocturna. Se alimentan de frutos, insectos y pequeños vertebrados. Habita bosques tropicales y bosques de pino-encino. Se encuentra enlistada en la NOM-059-SEMARNAT-2010 en categoría de Protección Especial.

El coatí o tejón (*Nasua narica*) del tamaño de un perro mediano, pesando entre 3 y 6 kg, tiene hocico largo y puntiagudo, su cola es larga y siempre erecta, y presenta largas y fuertes garras. Son diurnos y omnívoros, aunque su principal alimento son frutos e insectos. Se organizan en sistemas sociales matriarcales entre 5 y 15 individuos, y los machos son expulsados de la manada a temprana edad. Habitan en bosques tropicales, bosques de pino-encino y matorrales xerófilos. Son abundantes, pero los cazan por su carne que aseguran que tiene muy buen sabor.

La ardilla gris (*Sciurus aureogaster*) presenta una gran variación de colores en el pelaje que va de grises a café, incluso habiendo individuos blancos o negros. Tienen una cola larga y esponjada. Pesa entre 300 y 600 g, con actividad diurna. Se alimenta principalmente de semillas y frutos, aunque también se alimentan de insectos, huevos y polluelos. Se le puede encontrar en bosques tropicales, bosques templados y matorrales espinosos. Son resistentes a la perturbación de tal forma que se les ha encontrado viviendo en los parques de las ciudades. Son abundantes y no presentan problemas poblacionales. En algunas comunidades se les caza para alimento.





El puerco espín o viztlacuache (*Coendu mexicanus*) es un roedor grande de cuerpo robusto y rostro corto, con cola prensil, que pesa entre 2 y 4 kg. El cuerpo está cubierto de espinas que utilizan para defenderse. Es herbívoro, se alimenta principalmente de hojas, corteza y frutos. Habitan en las selvas tropicales y tienen actividad nocturna. Estos son cazados porque se cree que las púas tienen propiedades medicinales. Contrariamente, en las comunidades piensan que son peligrosos porque creen que puede aventar las espinas, lo cual es totalmente falso. Se encuentra enlistado en la NOM-059-SEMARNAT-2010 en categoría de Especie Amenazada.

La rata arborícola (*Tylomys nudicaudus*) es una de las ratas más grandes de México, pesa entre 150 y 280 g. Se alimentan de semillas y frutos en los bosques tropicales. Es de hábitos nocturnos. No se sabe mucho del estado poblacional de esta especie, pero se conoce que en algunas regiones se utilizan para alimento. No se encuentra enlistada en ninguna categoría de riesgo.

El ratón arborícola (*Nyctomys sumichrasti*) es un ratón nocturno se alimenta principalmente de

frutos, aunque también se ha visto cazando polillas. Habita en selvas desde México hasta Panamá. No se encuentra enlistada en ninguna categoría de riesgo.

## IMPORTANCIA Y AMENAZAS

La importancia ecológica de los mamíferos arborícolas no se encuentra bien estudiada. Sin embargo, sabemos que éstos juegan un rol importante en la dispersión de semillas, siendo la mayoría consumidores de frutos y debido a que presentan periodos de digestión más prolongados que otros frugívoros como las aves, éstas pueden ser dispersadas a mayor distancia (González-Espinosa y Quintana-Ascencio, 1986). Por otro lado, los animales que consumen a otros animales ya sean vertebrados o invertebrados, fungen como controladores poblacionales para evitar que estas poblaciones aumenten de tal forma que puedan convertirse en plaga y ser contraproducentes para el ecosistema. De igual forma los herbívoros ayudan a controlar el crecimiento de algunas plantas como, por ejemplo, el muérdago (*Psittacanthus* sp.) que es una planta parásita de árboles y que es consumida por el puercoespín (observación personal de S. Gallina). Debido a su dependencia al dosel, las poblaciones de estos mamíferos están siendo gravemente afectadas por la deforestación, la que ya de por sí se ha ido incrementado con los años; actualmente se estima que se pierden aproximadamente 645,000 hectáreas de bosques y selvas al año (Velázquez, 2002). Aunado a la deforestación, los mamíferos arborícolas también enfrentan amenazas como la cacería ilegal, ya sea por sus pieles, por su carne o por diversión (Ceballos y Oliva, 2005). De tal forma que es de gran importancia estudiarlos para conocer su importancia en el funcionamiento del ecosistema y sus requerimientos para poder llevar a cabo programas de conservación.

---

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dirección General del INECOL que dio apoyo a través del proyecto estratégico 2003530908 "Refaunación de Áreas Protegidas en el Estado de Veracruz". Así como al personal de la R.E. Sta. Gertrudis, la Familia Vega Hernández (Karina y Bernardo) que nos permitió el acceso y la familia Zárate (Tomas, Julia, Esther y Lety) que fueron de valiosa ayuda durante las salidas de campo. Además, a don Abraham que enseñó a Alberto a trepar los árboles y nos ayudó con la instalación de las trampas. A Mariano Avendaño, Marco Ramírez, Fernando Ocampo, Erika Campeche y Paulina Aguirre por su ayuda en el arduo trabajo en campo.





## LITERATURA CITADA

- Aranda, M. e I. March 1987. Guía de los mamíferos silvestres de Chiapas. Instituto nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Programa para estudios en Conservación Tropical (PSTC). Universidad de Florida.
- Astiazarán, A. 2017. Estructura del ensamble de mamíferos del dosel y sus patrones de actividad de una selva mediana del norte de Veracruz, México. (Tesis de Maestría). Instituto de Ecología A.C.
- Ceballos, G. y G. Oliva. 2005. Los mamíferos silvestres de México. México D.F.: CONABIO-UNAM- Fondo de Cultura Económica.
- Coates-Estrada, R. y A. Estrada. 1986. Manual de identificación de campo de los mamíferos de la Estación de Biología "Los Tuxtlas". Universidad Nacional Autónoma de México.
- Diario Oficial de la Federación. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, que determina las especies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas, endémicas, amenazadas, en peligro de extinción y sujetas a protección especial. Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados, Gobierno Federal, México.
- Emmons, L. 1995. Mammals of the rain forest canopies. Pp. 199-221. In: Lowman, M. y Nadkarni, N. (eds). Forest Canopies. First Edit. Academic Press,
- Estrada, A. 2007. La fragmentación de la selva y agrosistemas como reservorios de conservación de la fauna silvestre en Los Tuxtlas, México. Pp. 327-350. In Harvey, C. y J. Sáens (eds). Evaluación y Conservación de la Biodiversidad en Paisajes Fragmentados en Mesoamérica. Universidad Nacional Costa Rica-INBIO- CATIE-Unión Europea,
- Feldhamer, G. A., L.C. Drickamer, S.H. Vessey, J.F. Merrit y C. Krajewski. 2015. Mammalogy: Adaptation, Diversity, Ecology. Fourth Edition. John Hopkins University Press. Baltimore.
- Gerez-Fernández, P. y M del R. Pineda-López. 2011. Los bosques de Veracruz en el contexto de una estrategia estatal REDD+. Madera y Bosques. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, México. 17 (3) 7-27.
- González-Christen A. y C.A. Delfín-Alfonso. 2016. Los mamíferos terrestres de Veracruz, México y su protección. Pp. 499-534. In: Briones-Salas, M., Y. Hortelano-Moncada, G. Magaña-Cota, G. Sánchez-Rojas y J. Sosa-Escalante (eds.). Riqueza y Conservación de los Mamíferos en México a Nivel Estatal. Ciudad de México, México: Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Asociación Mexicana de Mastozoología A. C. y Universidad de Guanajuato.
- González-Espinosa, M. y P. Quintana-Ascencio, 1986. Seed predation and dispersal in a dominant desert plant: *Opuntia*, ants, birds, and mammals. Pp. 273-284. In: Estrada, A. y T. Fleming (eds). Frugivores and seed dispersal. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers Group,
- Kirk C., P. Lemelin, M. Hamrick, D. Boyer y J. Bloch. 2008. Intrinsic hand proportions of euarchontans and other mammals: Implications for the locomotor behavior of plesiadapiforms, *Journal of Human Evolution*. 55, 278-299.
- Mandujano, S. y A. Estrada. 2005. Detección de umbrales de área y distancia de aislamiento para la ocupación de fragmentos de selva por monos aulladores, *Alouatta palliata*, en los Tuxtlas, México, *Universidad y Ciencia*, 2, 11-21.
- Ramírez-Pulido, J., N. González-Ruiz, A. Gardner y J. Arroyo-Cabrales. 2014. List of Recent Land Mammals of Mexico, 2014. Special Publications, The museum, Texas Tech University, 63,1-69
- Ramos-Fernández, G., S. Smith, C. Schaffner, L. Vick, y F. Aureli. 2013. Site fidelity in space use by spider monkeys (*Ateles geoffroyi*) in the Yucatan Península, México. *PLOS ONE*. Public Library of Science, 8(5), 1-10.
- Sedarpa. 2006. Plan Sectorial Forestal Estatal 2006-2028. Gobierno del Estado de Veracruz, Sedarpa-DGDF. Xalapa, Ver.

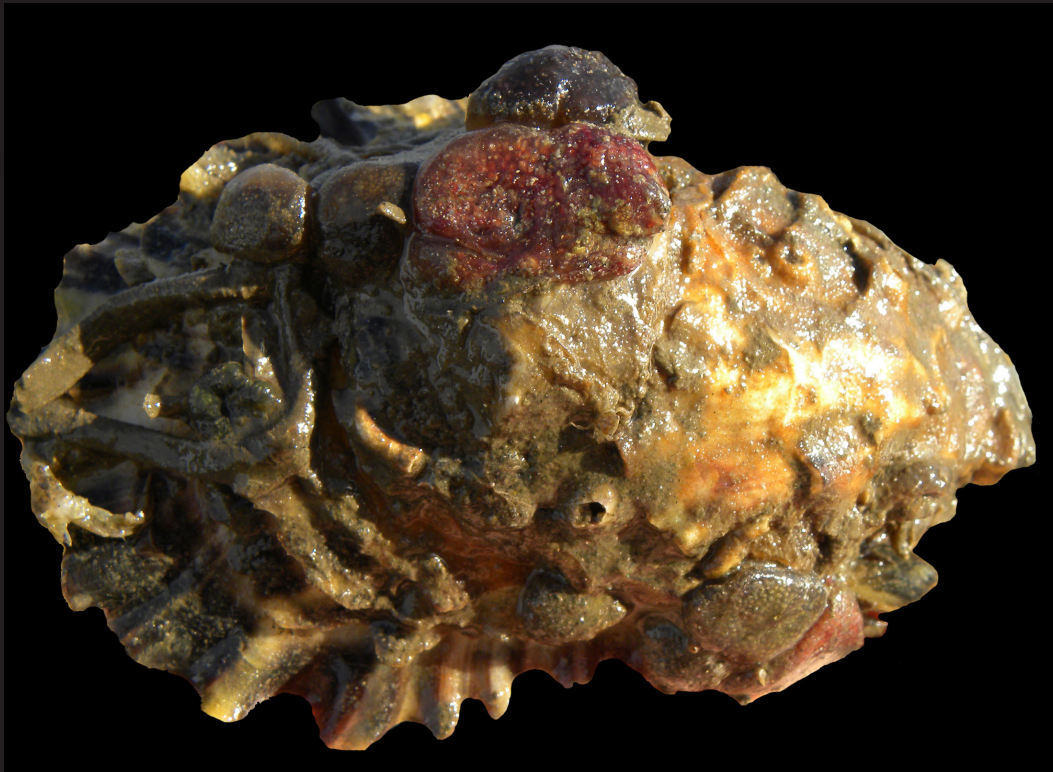
Serio-Silva, J., E. Olguín, L. García-Feria, K. Tapia-Fierro y C. Chapman. 2015. Cascading impacts of anthropogenically driven habitat loss: deforestation, flooding, and possible lead poisoning in howler monkeys (*Alouatta pigra*). *Primates*, 56(1), 29-35.

Solano, J., A. Estrada y R. Coates-Estrada. 2000a. A comparative study of resource use by howler monkey groups (*Alouatta palliata*). in isolated rainforest fragments of the region of Los Tuxtlas, Veracruz, Mexico. *ASP Bulletin*, 24(3), p. 8.

Solano, J., A. Estrada, y R. Coates-Estrada. 2000b. Contrastes y similitudes en el uso de recursos y patrón general de actividades en tropas de monos aulladores (*Alouatta palliata*) en fragmentos de selva en Los Tuxtlas, México. *Neotropical Primates*, 8(4), 131-135.

Velázquez A. 2002. Patrones y Tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 62:21-37.





# POLIQUETOS PERFORADORES DE CONCHAS MARINAS Y EXÓTICOS INVASORES

Tovar-Hernández M.A., M.E. García-Garza y J.A. de León-González

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias  
Biológicas, Laboratorio de Biosistemática, San Nicolás de los Garza,  
Nuevo León, México.

Autor para correspondencia: maria\_ana\_tovar@yahoo.com

## RESUMEN

En esta contribución se enfatiza la importancia de los gusanos poliquetos perforadores de moluscos de interés comercial en México y del estudio de las especies exóticas invasoras. Asimismo, se presenta el estado del conocimiento de ambos rubros en México. Es necesario sensibilizar a los tomadores de decisiones sobre la necesidad de apoyar proyectos de investigación y contrataciones en los dos temas. Recomendamos modificar la sección de poliquetos de la Lista de especies exóticas invasoras en México, publicada en el Diario Oficial de la Federación en 2016.



**Palabras clave: Annelida, Polychaeta, acuicultura, biota portuaria, especies introducidas.**

## INTRODUCCIÓN

Cuando alguien fuera del gremio biológico nos pregunta: ¿qué estudias? o ¿a qué te dedicas?, solemos decir que estudiamos o investigamos gusanos marinos. Lo primero que podría venir a la mente del interrogador es una imagen de una lombriz o de un ciempiés caminando en la arena de una playa o nadando en el mar. No es una imagen descabellada, porque algunos gusanos marinos asemejan mucho a los ciempiés o milpiés y, de hecho, están emparentados con las lombrices de tierra y con las sanguijuelas, y se pueden encontrar desde el área de playa hasta las zonas más profundas del mar.

Los gusanos marinos a los que nos referimos son anélidos poliquetos, un grupo muy diverso de invertebrados que está formado por 80 familias, 1000 géneros y más de 12700 especies que se distribuyen prácticamente en todos los ecosistemas bénticos marinos, donde a menudo son el componente dominante en términos de número de individuos y especies (Rouse y Pleijel, 2001; Costello et al. 2013).

No obstante, los poliquetos han logrado invadir con éxito el ambiente pelágico, cuerpos de agua dulce e inclusive el medio terrestre: nueve familias son consideradas holopláncticas (ca. 95 especies) exclusivas de ecosistemas pelágicos de mar abierto (Suárez-Morales et al. 2005); aproximadamente 168 especies son dulceacuícolas y unas 10 especies de la familia Nereididae son semi-terrestres y arbóreas, propias de los bosques húmedos tropicales, ya sean asociados a hojas en descomposición, en hojas de platanos o de palmas (*Pandanus*), y en cultivos de arroz (Glasby, 1999; Glasby et al. 2000; Glasby y Timm, 2008).

El éxito del grupo está relacionado con su considerable complejidad estructural, gran variedad morfológica y alta diversidad funcional, mismas que representan las adaptaciones a los diversos ambientes que habitan. En esta contribución hablaremos de los gusanos poliquetos perforadores de moluscos de interés comercial en México y de especies exóticas invasoras, con la intención de divulgar el estado del conocimiento actual en el país. También esperamos sensibilizar a los tomadores de decisiones sobre la necesidad de apoyar proyectos de investigación en ambos tópicos. Además, recomendamos algunos cambios a la Lista de especies exóticas invasoras en México publicada en el DOF, 2016.

## PERFORADORES DE CONCHAS DE MOLUSCOS DE INTERÉS COMERCIAL

Aunque la gran mayoría de los poliquetos son organismos de vida libre, existen unas 370 especies simbioses obligados o facultativos (Martin y Britayev, 1998; Britayev y Antokhina, 2012). Existen varios poliquetos perforadores de conchas de moluscos, ya sean estos moluscos vivos o muertos (barrenan conchas deshabitadas). En el primer caso, la interacción suele ser negativa, por lo que se les llama parásitos perforadores. Son plagas que, si bien no están interesadas en el cuerpo del molusco como tal, buscan una casa la cual habitar, que viene siendo la concha.

A continuación, presentamos dos especies de poliquetos espionidos y un sabélido, reportados como barrenadores del ostión japonés o gigante en el Pacífico (*Crassostrea gigas*), del ostión americano

(*Crassostrea virginica*), del ostión de mangle (*Crassostrea rhizophorae*), de la almeja mano de león (*Nodipecten subnodosus*) y del abulón rojo (*Haliotis rufescens*).

## MOLUSCOS

Ostiones del Pacífico *Crassostrea gigas*, ostión americano *C. virginica* y el ostión de mangle *Crassostrea rhizophorae*. (Figura 1A-B)

Algunas especies de espionidos del género *Polydora* (Figura 1C) ocasionan importantes pérdidas económicas en diversos moluscos de interés comercial a nivel mundial (Mortensen et al. 2000; Boscolo y Giovanardi, 2002; Leonart et al. 2003). Las perforaciones de estos gusanos inducen al ostión a formar ampollas de lodo en la superficie interna de las valvas de los moluscos, mismas que reducen su resistencia y demeritan su



**Figura 1.** Ostiones cultivados en México. A) Ostión del Pacífico *Crassostrea gigas* cultivado en el Mavíri, Sinaloa. B) Ostión americano *C. virginica* cultivado en la Laguna del Ostión, Barrillas, Veracruz, mostrando una prominente ampolla de lodo producida por el poliqueto parásito *Polydora* en una de sus valvas. C) Gusano perforador del ostión *Polydora* sp. Fotografías A-B: Humberto Bahena Basave, C: Geoffrey Read.



calidad para venderse en concha (Figura 1B). Las ampollas acumulan materia orgánica en su interior, y cuando se rompen liberan un olor fétido (Radashevsky et al. 2006; Delgado-Blas, 2008).

Las especies del género *Polydora* afectan a los moluscos hospederos con diferente magnitud, dependiendo del grado de infestación y condiciones locales; los tubos favorecen infecciones secundarias por bacterias; las protuberancias en la concha pueden atrofiar y desprender el músculo abductor; y la pérdida de resistencia de la concha también facilita la depredación.

En la mayoría de los casos las infestaciones repercuten negativamente en los cultivos comerciales, incluso provocan mortalidades extendidas (Chambon et al. 2007).

La actividad perforadora de *Polydora* puede ocurrir mediante un mecanismo químico o físico. En el primer caso, es por la secreción de fosfatasa ácida y anhidrasas carbónicas que disuelven o debilitan la matriz de carbonato de calcio de la concha. En el segundo caso, el gusano utiliza unas setas especializadas que presenta en uno de los segmentos anteriores del cuerpo (setígero 5). La combinación de ambos mecanismos permite la construcción de galerías, en las cuales se acumula lodo; conforme el gusano sigue perforando, llega a la cavidad del manto. Los bivalvos, como respuesta a esta afectación, secretan mayor cantidad de conquiolina para sellar la cavidad del manto y aislar al gusano. Todo ello implica un fuerte gasto energético que debilita la condición fisiológica del bivalvo, haciéndolo vulnerable a las enfermedades (González-Ortiz et al. 2018).

El ostión del Pacífico *Crassostrea gigas*, originario del norte de Japón, es uno de los bivalvos con mayor importancia comercial en el mundo (Figura 1A). Se producen casi 500 millones de toneladas al año con valor de \$820 MDD (FAO, 2011). La especie fue introducida por primera vez en México (San Quintín, Baja California) en 1973. El cultivo pronto se extendió a Baja California, Baja California Sur y Sonora (Lavoie, 2005), y posteriormente, en Sinaloa, Nayarit y Jalisco.

En México existen pocos estudios sobre el impacto de estos poliquetos en la producción de bivalvos.

Cáceres-Martínez et al. (1998) compararon la infestación de *Polydora* sp., en algunos sitios del cultivo de ostión *C. gigas* en Baja California Sur y enfatizaron que estos espiónidos constituyen una amenaza para la ostricultura debido al daño ocasionado en la apariencia del ostión y los consecuentes problemas en su comercialización.

En la laguna de Barra de Navidad, Jalisco, Gallo-García et al. (2001) registraron la presencia de poliquetos perforadores en los cultivos experimentales de *C. gigas*. Posteriormente, Gallo-García et al. (2007) determinaron una prevalencia del 100% desde la décima semana de cultivo; una intensidad de 8.7 gusanos/ostión y bajos rendimientos a la cosecha (61 mm de longitud y 44.5% de supervivencia). Un año después, Gallo-García et al. (2008) identificaron al causante del daño como *Polydora websteri*. No se han evaluado las pérdidas económicas que ocasiona *P. websteri*; sin embargo, se sabe que genera pérdidas en los productores locales. La infestación afecta la apariencia de la concha y el crecimiento del ostión, ocasionando una disminución de su precio en el mercado local, ya que, por su tamaño y desagradable apariencia, el comprador debe desconcharlo para su consumo en cóctel (Gallo-García et al. 2008).

*Polydora websteri* fue descrita para el atlántico estadounidense: Connecticut. Es una especie eurihalina de aguas someras y zonas intermareales con fondos blandos, la cual ha sido encontrada en 19 especies de moluscos, principalmente bivalvos y algunos gasterópodos (Martin y Britayev, 1998). Aunque afecta principalmente a *C. gigas*, también se han registrado daños en los ostiones *C. virginica*, *Saccostrea commercialis*, el mejillón *Mytilus edulis*, y las almejas *Mercenaria mercenaria* y *Pecten irradians* (Martin y Britayev, 1998). En el ostión de mangle *Crassostrea rhizophorae* de la Laguna de Términos, Campeche, también se ha reportado la presencia de *Polydora websteri* (García-Garza, 2015).

El ostión americano *C. virginica* es una especie nativa de la costa americana del Atlántico (Figura 1B), que se distribuye desde el Golfo de San Lorenzo en Canadá hasta la Laguna de Términos, Campeche, México. Su facilidad de reproducción y colecta lo convierten en uno de los organismos con mayor demanda dentro de la acuicultura, desde colectas manuales en sistemas



lagunares, hasta el desarrollo de bancos ostrícolas artificiales en los estados costeros del Golfo de México, desde Tamaulipas hasta Campeche (Vidal-Briseño et al. 2015), siendo para Veracruz, el principal recurso pesquero en términos de volumen (SAGARPA-CONAPESCA, 2012). Existen varios reportes de la infestación de *P. websteri* en *C. virginica* en Canadá y Estados Unidos (Powell et al. 2015; Clements et al. 2017) y en México fue reportada en Isla Verde, Veracruz desde hace varias décadas (Rioja, 1961).

Sin embargo, la identidad de *Polydora websteri* es un misterio aún dado que el gusano presenta una distribución cosmopolita y pertenece a un complejo de especies morfológicamente similares (complejo *Polydora*). Por ello, en México es necesario un estudio taxonómico detallado que sea respaldado con marcadores moleculares, para así corroborar fehacientemente, que *P. websteri* es el gusano barrenador que está presente en el país, y que no se trate de una especie indescrita o de alguna otra. Este procedimiento lo han hecho en otras áreas del mundo. Por ejemplo, en Nueva Zelanda se demostró que no solo *P. websteri* afecta las conchas de moluscos, sino también una segunda especie: *P. haswelli* (Read, 2010). Por su parte, Sato-Okoshi et al. (2017) demostraron que los registros de *P. uncinata* para Japón y Australia y los de *P. hoplura* para Sudáfrica son la misma especie. Por ello, es conveniente un estudio que aclare o corrobore el nombre de *P. websteri* en México, que independientemente de su identidad, el gusano es un problema que afecta la ostricultura.

El ostión de mangle *C. rhizophorae*, una especie ampliamente distribuida en los ecosistemas del Mar Caribe, vive en aguas someras hasta los 3 m de profundidad, está asociado principalmente a sustratos duros, especialmente a las raíces del mangle rojo donde forma colonias densas (Abbott, 1974). En las regiones pesqueras de Tamaulipas, Veracruz, Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán, la producción del ostión está basada en dos especies, *C. virginica* y *C. rhizophorae*, y es una de las pesquerías más importantes en la zona del Golfo de México. En términos generales, los estados que aportan mayor cantidad de ostión a la producción nacional son Veracruz y Tabasco (Global Biotech Consulting Group 13-001).

### *Nodipecten subnodosus*: almeja mano de león

La almeja pectínida mano de león, *Nodipecten subnodosus*, es una de las especies de mayor interés económico en el Pacífico mexicano. En mayo del 2011, los pescadores de la Laguna Ojo de Liebre (Baja California Sur), reportaron la mortandad masiva de la mano de león. El tamaño de la población disminuyó considerablemente y el estado de salud de las almejas supervivientes también fue afectado. Al desconocer los factores que ocasionaron este fenómeno, se declaró la veda permanente (González-Ortiz, 2016).

Los causantes del fenómeno fueron dos invertebrados perforadores: una esponja y un poliqueto espionido (*Polydora* sp.). Como ya se mencionó, el barrenador alcanza la cavidad del manto y esto estimula la secreción de conquilina para mantenerlo aislado, creando una ampolla (González-Ortiz, 2016). Como en otros casos, el gasto energético durante la secreción de conquilina retarda el crecimiento, aumenta la mortalidad (Almeida et al. 1996) y reduce la capacidad para acumular reservas nutricionales, debilitando la condición fisiológica de la almeja y haciéndolo vulnerable a las enfermedades (Wargo y Ford, 1993).

En un trabajo reciente, se cuantificó el daño ocasionado por *Polydora* y las variaciones del crecimiento de la mano de león durante tres años. Se reportó una tasa de infestación del 40% en almejas pequeñas (4.5-8.0 cm), y hasta 13 ampollas (2 en promedio). Estos organismos pequeños presentan malformaciones en las valvas. Se piensa que la infestación ocurre en esta etapa porque es cuando la mano de león inicia su actividad reproductiva y de desove, en la que reduce su condición nutricional y en la que está más expuesta a la presencia de organismos perforadores (González-Ortiz et al. 2017).

No se ha definido la especie del perforador. De acuerdo con González-Ortiz (com. pers.), la especie semeja otras descritas para Taiwán, por lo que podría tener esta un origen asiático. Muchas especies de *Polydora* han sido reportadas como invasoras en varias partes del mundo (Blake y Kudenov, 1978; Radashevsky y Hsieh, 2000; Radashevsky, 2005). Su potencial de dispersión se atribuye a su traslado como larva en el agua de lastre de las embarcaciones, como adulto incrustado en los cascos de los barcos (Radashevsky y Selifonova, 2013)

e incluso, los gusanos pudieron ser trasladados con los bloques de ostiones o los adultos llevados como reproductores o sementales. Esta consideración es importante porque los *Polydora* incuban sus embriones dentro del tubo en cápsulas separadas. Teniendo esto en cuenta, González-Ortiz (com. pers.) sugiere que las embarcaciones de gran calado que arriban a la isla de Cedros para recibir y transportar la sal extraída y procesada en la salinera más grande del mundo localizada en Guerrero Negro (Exportadora de Sal, SA. de CV.), hacia el mercado internacional, pudieron transportar desapercibidamente a la *Polydora*, lo cual es una hipótesis de invasión viable.

El primer reporte de la afectación ocurrió en el 2011 y la detección de los agentes causantes del problema es un gran avance en la materia. No obstante, por un lado, es necesario generar información básica de la especie plaga (reproducción y ecología) que sirva para proponer planes de manejo y control. Asimismo, se debe evaluar si el poliqueto perforador ha logrado infestar otros moluscos de la zona, sean o no de interés comercial. Por otro lado, se debe alertar a los acuicultores a través de los comités estatales de sanidad acuícola, sobre la presencia y la detección temprana de esta plaga en otros bancos de moluscos de interés comercial de la costa occidental de la península de Baja California.

### *Haliotis rufescens*: abulón rojo

A mediados de la década de los ochentas la industria de la acuicultura en California (Estados Unidos) comenzó la importación de abulón de Sudáfrica (*Haliotis midae*) para su cultivo. A inicios de los años 1990 se detectó una plaga que ocasionaba una deformación de los poros respiratorios, producía conchas quebradizas y ralentizaba el crecimiento del abulón rojo *H. rufescens* o inclusive, su muerte antes de alcanzar la talla comercial (Culver et al. 1997). El causante fue un poliqueto sabélido diminuto (1.5 mm de largo y 0.20 mm de ancho), esbelto y con la mitad posterior expandida en forma de bolsa, cuyo género y especie eran desconocidos para la ciencia.

Posteriormente, la especie fue descrita como *Terebrasabella heterouncinata* (Fitzhugh y Rouse, 1999) y se corroboró que fue introducida inadvertidamente a California con la importación del abulón sudafricano

(Kuris y Culver, 1999). En ese tiempo las granjas de abulón de California dependían de un número reducido de productores de larva, lo que ocasionó que la especie alcanzara rápidamente todas las granjas de California para 1995 (Moore et al. 2007). Dentro de las granjas cohabitan otras especies de gasterópodos mismas que el sabélido también logró infestar: *Tegula* spp, y *Lottia* spp (Culver y Kuris, 2000). Fuera de las granjas, *T. heterouncinata* viajó como larva en el agua de descarga de las granjas y logró establecerse en la zona intermareal, donde la infestación se limitó al área inmediata de descarga (<100 m de línea de costa), pero como la infestación fue detectada en una etapa temprana, la erradicación comenzó a las pocas semanas de su detección (Culver y Kuris, 2000). Fuera de la zona de granjas, la especie se ha detectado en acuarios públicos e instalaciones educativas que adquirieron animales infestados (Moore et al. 2007).

Debemos mencionar que hubo otras invasiones inesperadas fuera del territorio estadounidense. Por ejemplo, se remitió abulón rojo de California (*H. rufescens*), infestado con el sabélido perforador a granjas de Ensenada, Baja California, México, y Puerto Montt, Chile (Culver et al. 1997; Kuris y Culver, 1999). En Chile la plaga se registró en 2006 (Moreno et al. 2006) y aunque en México no existen registros oficiales de la presencia de *T. heterouncinata*, no se descarta la posibilidad de que la plaga se haya extendido, pues de acuerdo con la Carta Nacional Pesquera (DOF, 2006), las granjas de abulón rojo y azul (*H. fulgens*) en México son intensivas y están limitadas a la costa occidental de la península de Baja California. Por ello, es necesario estudiar moluscos en esas áreas para determinar si persiste el sabélido y si pudo colonizar otros moluscos.

Las tres especies de poliquetos antes mencionadas (*Polydora websteri*, *Polydora* sp., y *T. heretouncinata*), además de ser perforadoras, son también especies exóticas en México. Esto no es de extrañarse, puesto que la acuicultura es una de las principales vías de introducción de especies exóticas en el mundo. En México, se cuenta con un análisis de riesgo para el sabélido tubícola *T. heretouncinata* así como su ficha técnica (Tovar-Hernández y Yáñez-Rivera, 2012a).

A continuación, hablaremos sobre otras especies exóticas introducidas o con un alto potencial de introducción en México que, si bien no son perforadoras

de moluscos de interés comercial, ocasionan impactos en las especies nativas, en el medio ambiente, en las embarcaciones y en la infraestructura portuaria.

## EXÓTICOS INVASORES

Formadores de conglomerados arrecifales:  
*Ficopomatus* (Figura 2).

*Ficopomatus* es un género de poliquetos serpulídeos de gran relevancia como especies exóticas invasoras en estuarios de varias partes del mundo. Forman conglomerados de varios cientos o miles de tubos calcáreos, por lo que parecen arrecifes en las lagunas costeras (Figura 2C). Algunos otros se cementan en los cascos y en las tuberías de las embarcaciones, ocasionando obstrucciones y un aumento considerable en el peso de las mismas (Tebble, 1953; Pernet *et al.* 2016). Otros forman grandes conglomerados en la base de los pilotes de muelles, de pilotes de granjas camaronícolas (Figura 2A-B) y también en raíces de mangle (Tovar-Hernández y Yañez-Rivera, 2012b). Inclusive, en el 2008, en la boca del Río Murray, Australia, una especie de *Ficopomatus* cubrió completamente los caparazones de dos especies de tortugas de agua dulce, con lo que el peso de las tortugas se incrementó tanto que limitó su movimiento y desplazamiento (Figura 2C, recuadro derecho) (Bower *et al.* 2012).

*Ficopomatus enigmaticus*, es la especie mejor conocida y estudiada del género en términos de biología y ecología. Fue descrita para Francia, pero algunos autores han sugerido Australia como su centro de origen (Zibrowius y Thorp, 1989) sin que se haya podido demostrar aún (Styan *et al.* 2017). En América, *F. enigmaticus* ha sido reportada como invasora en ambas costas de Estados Unidos (Texas y California), y también en Uruguay y Argentina (ten Hove y Weerdenburg, 1978; Muniz *et al.* 2005; Orensanz *et al.* 2002; Schwindt *et al.* 2001; Pernet *et al.* 2016). Quizá los impactos más notorios son los ocasionados en la laguna costera Mar Chiquita (Argentina), donde *F. enigmaticus* forma enormes conglomerados que se constituyen en arrecifes de hasta 7 m de diámetro y 0.5 m de altura. La laguna esta colonizada en un 85% por estas agrupaciones que dificultan la navegación y tienen grandes



**Figura 2.** Ejemplos de gusanos tubícolas del género *Ficopomatus* y sus afectaciones. A) *Ficopomatus miamiensis* en pilotes de una granja camaronícola en Mazatlán. B) Tubos calcáreos del gusano exótico. C) Pequeños arrecifes de *F. miamiensis* en la granja camaronícola, la imagen del recuadro izquierdo muestra el cuerpo del gusano sin su tubo y el recuadro derecho a la tortuga *Emydera macquarii* cubierta por tubos de *F. enigmaticus* en Australia. Fotografías: A, C: Sergio Rendón; B y recuadro izquierdo en C: Humberto Bahena Basave, recuadro izquierdo en C: modificada de Bower *et al.* 2012.



implicaciones ecológicas, ya que altera la estructura física de los hábitats bénticos (Schwindt et al. 2001, 2004a) y tiene diversos efectos directos e indirectos en las comunidades pláncnicas (Bruschetti et al. 2008) y bénticas nativas (Schwindt et al. 2001).

*Ficopomatus enigmaticus* aún no ha sido registrada en México, pero se ha encontrado en la bahía de San Francisco y en algunas marinas de San Diego, California (Bastida-Zavala, 2008), por lo que no se debe descartar su introducción en las lagunas costeras de Baja California. Ese serpúlido figura en la lista de las “100 especies más invasoras en el Mediterráneo” (Streftaris y Zenetos, 2006).

Otra especie de *Ficopomatus* de relevancia para el territorio nacional es *F. miamiensis*, una especie caribeña registrada en el estero de Urías, Mazatlán, Sinaloa, donde está estrechamente relacionada con el cultivo de camarón (Figura 2A-C). La especie fue introducida hace 30 años cuando fueron importadas larvas de camarón desde Florida (Salgado-Barragán et al. 2004; Tovar-Hernández et al. 2009b); también se le ha encontrado en La Paz, Baja California Sur, asociado a la camaronicultura (Figura 3A) (Tovar-Hernández et al. 2014a).

En las granjas camaronícolas de Mazatlán, el impacto de *F. miamiensis* fue considerado positivo en los estanques de cultivo, debido a que las poblaciones de estos serpúlidos (más de 230000 ind./m<sup>2</sup>) filtran el agua y controlan las partículas en suspensión; sin embargo, el impacto de las colonias incrustadas en las raíces de los mangles de la periferia de la granja es negativa, ya que el serpúlido compite con otros invertebrados incrustantes nativos, en especial otros filtradores como cirrípodos, mejillones y ostiones (Tovar-Hernández et al. 2009, 2014a). Se cuenta con una ficha técnica y el análisis de riesgo de la especie para México (Tovar-Hernández y Yáñez-Rivera, 2012b).

Una tercera especie es *F. uschakovi*, descrita para Sri Lanka, en el océano Índico. En América se ha reportado en Venezuela (Liñero-Arana y Díaz-Díaz, 2012), en el noreste de Brasil (de Assis et al. 2008) y en México asociada a raíces de mangle y moluscos en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas (Bastida-Zavala y García-Madrigal, 2012), y en una laguna costera de Veracruz (Laguna del Ostión en Barrillas, cerca de

Coatzacoalcos, Figura 3A-C) (Tovar-Hernández et al. en prep). Tanto en La Encrucijada como en Laguna del Ostión, se desconocen los impactos ambientales, por lo que es necesario el monitoreo de la especie introducida en ambos sitios, evaluar la dinámica poblacional y estudiar sus efectos en las comunidades nativas.

## NAVEGANTES EXITOSOS

Entre los gusanos poliquetos, hay dos géneros cuyas especies se consideran navegantes exitosos, ya que son organismos cuyos juveniles y adultos se incrustan en los cascos y cabos de las embarcaciones, y sus larvas viajan en el agua de lastre de las mismas (Figura 4A-F). Así, han sobrevivido a viajes de larga duración, han colonizado y establecido poblaciones viables en varios puertos del mundo, donde se han convertido en plagas. Esos géneros son el sabélido *Branchiomma* y el serpúlido *Hydroides*, ambos tubícolas de los que a continuación hablaremos.

### *Branchiomma* (Figura 4F)

*Branchiomma* cuenta con varias especies invasoras alrededor del mundo (Capa et al. 2013; Keppel et al. 2015). Entre ellas, resalta *B. bairdi* (Figura 4F), un gusano originario del Caribe que se ha considerado introducida en las islas Canarias, el mar Balear, Madeira, Túnez, Australia, el Pacífico mexicano, Panamá y recientemente en California y Hawaii (Keppel et al. 2018).

En el Golfo de California, la especie es pequeña (hasta 4 cm) y muy abundante. Alcanza densidades hasta de 18000 ind./m<sup>2</sup> en sitios perturbados (marinas, puertos y granjas camaronícolas y ostrícolas), en sustratos artificiales (boyas, cascos de embarcaciones, cabos, muelles flotantes, y pilotes de concreto, fibra de vidrio y madera), como epibiontes de *Crassostrea gigas* y *C. sikamea*, y también en sustratos naturales (roca y madera) de una área natural protegida de La Paz, Baja California Sur (Tovar-Hernández et al. 2012; 2014a).

*Branchiomma bairdi* es capaz de expandirse rápidamente porque es hermafrodita simultánea, y se reproduce sexual y asexualmente (Tovar-Hernández et al. 2009a, b). Los individuos reproductores son abundantes durante todo el año, presenta cuidado





**Figura 3.** Ejemplos de gusanos tubícolas del género *Ficopomatus* y sus afectaciones. A) Granja camaronícola en Baja California Sur, en el recuadro se muestra una conglomeración de tubos de *F. miamiensis*, la cual queda descubierta una vez que se vacían los estanques de cultivo. B) Ostión *Crassostrea virginica* cubierto por tubos de *Ficopomatus uschakovi* en la Laguna del Ostión, Barrillas, Veracruz. C) Tubo calcáreo del gusano exótico, en el recuadro se muestra el cuerpo del gusano sin su tubo. Fotografías A-C: Humberto Bahena Basave.



**Figura 4.** Actividad portuaria y biota navegante. A) Embarcación vertiendo agua de lastre en el puerto de Topolobampo. B) Crucero turístico en el puerto de Mazatlán. C) Mantenimiento de un buque petrolero en un astillero de Mazatlán. D) Cabo de un yate en el puerto de Veracruz cubierto por organismos marinos incrustantes. E) Gusano serpúlido *Hydroides* sp. recolectado en las paredes de un barco en el puerto de La Paz, BCS, F) Gusano sabélido exótico invasor *Branchiomma bairdi* recolectado en una boya de señalización marítima en el puerto de Topolobampo, Sinaloa. Fotografías: A, E-F: Humberto Bahena Basave; B-D: María Ana Tovar.

de larvas y es tolerante a un amplio intervalo de temperatura y salinidad, e incluso, tolera largos periodos de desecación (Tovar-Hernández et al. 2011; Tovar-Hernández y Yáñez-Rivera, 2012c).

Es un gusano que puede desplazar a la comunidad incrustante esclerobionte (organismos que se adhieren a sustratos duros de origen antropogénico) nativa ya que su densidad supera en más de cinco órdenes de magnitud la densidad acumulada de nueve especies de sabélidos y serpúlidos nativas en un estero de Mazatlán. No se ha cuantificado el impacto económico particular de *B. bairdi* en las localidades mexicanas donde se ha reportado; sin embargo, junto con otros organismos incrustantes o esclerobiontes (balanos, poliquetos serpúlidos y moluscos, entre otros), favorece la corrosión de los sustratos metálicos, ocasionando pérdidas económicas a la industria portuaria y a la industria naviera, quienes invierten capital para mantener limpias las estructuras y usar pinturas anti-incrustantes.

Además, en el Golfo de California, este gusano tubícola invasor es parte de un ensamble de especies invasoras que incluye ascidias (*Botryllus schlosserii*, *Botrylloides nigrum*, *Botrylloides violaceus* y *Polyclinum constellatum*), briozoos (*Bugula neritina*) y copépodos (*Haplostomides hawaiiensis*). Las primeras tres ascidias y el briozoo son epizoicos adheridos a los tubos de *B. bairdi*. El copépodo es endoparásito de la papa de mar (*P. constellatum*), sobre la que *B. bairdi* adhiere sus tubos (Tovar-Hernández et al. 2010; Tovar-Hernández y Yáñez-Rivera, 2012c). Todas ellas se han encontrado en los grandes puertos del mundo, por lo que la navegación parece ser la principal vía de introducción y dispersión de estas especies esclerobiontes.

### *Hydroides* (Figura 4E)

*Hydroides* también tiene varios representantes invasores en puertos de todo el mundo (Link et al. 2009; Otani y Yamanishi, 2010). Sus tubos también forman densas agregaciones en

estructuras sumergidas como tuberías, pilotes, embarcaciones, boyas, cabos, cajas de siembra, etc., por lo que causan afectaciones en la acuicultura, en la navegación y en las plantas de generación de energía (Sun et al. 2015). La especie más estudiada es *H. elegans*, una especie de origen australiano (Sun et al. 2015), o criptogénica (de origen desconocido) para otros autores (Bastida-Zavala et al. 2017). Es uno de los organismos incrustantes más problemáticos en las aguas tropicales y templadas del mundo (ten Hove y Weerdenburg, 1974).

Compite por espacio, alimento y otros recursos con otras especies de esclerobiontes; además, es capaz de colonizar una superficie de forma rápida y con alta densidad. En Japón, causó pérdidas millonarias en la pesquería de ostión japonés, provocando la mortalidad de hasta el 60% (Arakawa, 1971; Hirata y Akashige, 2004), así como daños a las embarcaciones y a las estructuras portuarias y marítimas y también está en la lista de las “100 especies más invasoras en el Mediterráneo” (Streftaris y Zenetos, 2006).

La especie se ha establecido exitosamente en Estados Unidos, mar Mediterráneo, mar del Norte, Golfo Pérsico, entre otros sitios (Bastida-Zavala, 2008). Es una especie hermafrodita protándrica, tiene fecundación externa y del huevo surge una larva nadadora (Kupriyanova et al. 2001). El número de individuos detectados en La Paz, Baja California Sur (>1000 ind.) (Bastida-Zavala, 2008), y las densidades de 55-110 ind/m<sup>2</sup> en localidades de Sinaloa, 16 ind/m<sup>2</sup> en Sonora, y 16-152 ind/m<sup>2</sup> en Baja California Sur, sugieren que existen varias poblaciones establecidas autosuficientes en el golfo de California (Tovar-Hernández et al. 2014a).

## MARCO LEGAL EN MÉXICO SOBRE ESPECIES EXÓTICAS INVASORAS

México cuenta con una Estrategia Nacional sobre Especies Invasoras (Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras, 2010) y recientemente fue publicada en el Diario Oficial de la Federación una lista de especies exóticas invasoras en el país (DOF, 2016). En dicha lista se incluyeron seis de las especies comentadas en esta nota: *Branchiomma*

*bairdi*, *Ficopomatus enigmaticus*, *F. miamiensis*, *F. uschakovi*, *Hydroides elegans* y *Terebrasabella heterouncinata*, así como siete más (*Salvatoria clavata*, *Branchiomma curtum*, *Hydroides bispinosus*, *H. diramphus*, *Prionospio malgreni*, *Pseudopolydora kemp* y *P. paucibranchiata*). Dado que el acuerdo entró en vigor al día siguiente de su publicación (8 de diciembre de 2016), las 13 especies ya son prohibidas en el país.

La lista es un instrumento legal y requiere modificaciones ya que incluye especies que no son exóticas invasoras o que se trata de registros erróneos para el país; excluye especies que sí son exóticas invasoras y que ameritan reglamentación; e incluye una especie que es exótica en el Pacífico mexicano, más no en Veracruz, pues su rango de distribución natural corresponde al Golfo de México.

El trabajo de Okolodkov et al. (2007) constituye el primer esfuerzo en el país por compilar la información de las especies acuáticas exóticas en México y su relevancia es indiscutible. Sin embargo, algunas de las especies contenidas en esas listas no cumplen con la definición de especie exótica y los criterios que utilizaron los autores para incluir dichas especies no fueron indicados, y la bibliografía que originalmente reporta tales especies en el país no fue incluida. Posteriormente, Bastida-Zavala et al. (2014) en su compilación incluyen otras especies adicionales a Okolodkov et al. (2007). Quizá las especies listadas en el DOF (2016) fueron tomadas de esas dos compilaciones, pues por lo menos la última es un capítulo de un libro editado por la CONABIO, organismo en el que recae todo lo relacionado con el área de especies exóticas en el país. Tovar-Hernández y Yáñez-Rivera (2012d) enfatizaron la necesidad de actualizar la información de referencia sobre las especies exóticas en México y propusieron un esquema para hacerlo en cada grupo de invertebrados acuáticos.

Con base en ello, se cuenta con una revisión de los registros y una lista depurada de las especies exóticas presentes por lo menos para el Pacífico mexicano (Villalobos-Guerrero et al. 2012). Aunque ese no es un trabajo concluyente, es una buena base de la cual partir, pues conforme se va generando información de cada especie, la lista se va actualizando.

Especies que deben ser excluidas: *Salvatoria clavata*, *Branchiomma curtum*, *Hydroides bispinosus* y *Prionospio malgreni*. De acuerdo con San Martín (2005), existen diferencias en estructuras de la faringe y setas entre ejemplares referidos como *S. clavata*, por lo que esta última es un complejo de especies morfológicamente diferenciables. San Martín (2005) sugirió, además, que los registros de la especie en México representarían nuevas especies para la ciencia. Con respecto a *B. curtum*, Keppel et al. (2015) sugieren que los registros de la especie en el Caribe mexicano pueden ser erróneos puesto que tanto los sintipos de *B. curtum* como los ejemplares reportados en México corresponden a juveniles producidos asexualmente por fisión, y los caracteres diagnósticos de los adultos no son diferenciables en estado juvenil. *Hydroides bispinosus* fue descrita para Bermuda y se ha reportado en Campeche y Quintana Roo (Bastida-Zavala y ten Hove, 2002), donde no debe considerarse exótica, por lo que también debe excluirse de la lista. *Prionospio malgreni*, especie descrita con material del Golfo de Nápoles, fue reportada para el Pacífico mexicano por Fauchald (1972) pero de acuerdo con Maciolek (1985), esos ejemplares corresponden a otra especie (*P. anuncata*), por lo que también debe excluirse de la lista.

Especie que debe ser incluida: *Polydora cf. websteri* e *Hydroides sanctaecrucis*. Ambas especies se encuentran establecidas en México (Villalobos-Guerrero et al. 2012) y como se mencionó antes, la primera es una especie perforadora de moluscos de interés comercial y la segunda es miembro de un género con varios representantes invasores, por lo que amerita la inserción de ambas en la lista. La inclusión de *H. sanctaecrucis* requiere, además, una nota que clarifique que es introducida en el Pacífico mexicano, más no en el lado Atlántico. La inserción de *Polydora websteri* como *Polydora cf. websteri* obedece a un principio de precaución, porque es necesario un estudio taxonómico que ratifique su identidad, de preferencia que contemple la comparación morfológica y molecular con el material tipo o topotipo (de Connecticut, Estados Unidos).

Aclaración: La lista debe enfatizar que *F. miamiensis* es exótica invasora solo en el Pacífico mexicano, ya que sus registros en Veracruz caen dentro del rango de distribución natural de la especie.

En teoría, las especies incluidas en la lista del DOF deben contar con un análisis de riesgo que respalde su inserción. No obstante, solo 10 de las 13 especies de gusanos poliquetos de la lista cuentan con análisis de riesgo a través del Método de Evaluación Rápida de Invasividad (MERI) para especies exóticas en México propuesto por la CONABIO (Barrios Caballero et al. 2014). Dichos análisis se pueden consultar en la página del gobierno federal (<https://www.gob.mx>), pero ninguno de ellos indica la autoría y la información contenida en gran medida procede de fichas de especies en otros países y portales relacionados a especies invasoras: NIMPIS (National Introduced Marine Pest Information System), GISD (Global Invasive Species Database), CABI (Centre for Agriculture and Biosciences International), entre otras.

Por lo anterior, se sugiere que los análisis de riesgo sean elaborados por especialistas en el grupo, pues los valores de invasividad podrían variar dependiendo de la calidad de la información, de su análisis e interpretación y de su valor asignado. Por ejemplo, en contribuciones previas, Tovar-Hernández y Yáñez-Rivera (2012a, b, c) proporcionaron fichas técnicas completas y análisis de riesgo para *B. bairdi*, *F. miamiensis* y *T. heterouncinata*, los cuales fueron divulgados en una publicación formal, revisada por pares.

En ellas se hizo una búsqueda exhaustiva de información acerca de la especie, dando prioridad a artículos científicos y postergando información de blogs o páginas webs, además de la inserción de información inédita sobre la biología y ecología de las especies.

## PARADOJA

La paradoja no es nueva. En su territorio continental, insular, costero y marino, México cuenta prácticamente con todos los ecosistemas viables para albergar gusanos poliquetos. Tovar-Hernández et al. (2014b) indican que en México hay unas 1500 especies formalmente registradas, repartidas en 63 familias y 460 géneros, pero dichos autores estiman que el total de especies en el país, incluyendo todos sus litorales y zonas de aguas profundas, sería entre 3000 y 3400 especies. Entonces, no se podrían estudiar los impactos de las especies exóticas



invasoras en el medio ambiente si se desconoce la composición de la biota nativa.

En ese sentido, la taxonomía como disciplina fundamental en la biología es indispensable para la determinación de especies nativas, indicadoras o exóticas y para actividades de monitoreo. Sin embargo, ya otros colegas han alertado sobre la problemática en Latinoamérica y en particular para México sobre la crisis de la taxonomía como ciencia (Salazar-Vallejo *et al.* 2007, 2008).

La ruta crítica propuesta por Salazar-Vallejo *et al.* (2008) para hacer frente a esta problemática contempla entre otros aspectos, el incrementar el financiamiento gubernamental disponible y darle prioridad al tema; y la creación de nuevas plazas para los especialistas. Estas plazas deben incluir, de manera integral, la sistemática (morfológica y molecular), la biología y la ecología de las especies exóticas invasoras, y con ello determinar los impactos de estas en el ambiente y en la economía, e inclusive su comportamiento frente al cambio climático.

Por su parte, el gremio poliquetológico en México unió interés y esfuerzo para plantear una iniciativa a nivel nacional. El "Programa Nacional de Biota Portuaria" de Salazar-Vallejo *et al.* (2014), considera como eje principal el generar información taxonómica y ecológica, y obtener la secuencia del gen mitocondrial

COI, con el fin de conocer la composición de la biota residente y facilitar la detección de especies exóticas introducidas. Para implementar dicho programa, los autores de esta nota y ocho especialistas más de El Colegio de la Frontera Sur (Chetumal y Campeche), del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, del Instituto Tecnológico de Bahía de Banderas, la Universidad de Quintana Roo y la Universidad del Mar, sometieron la iniciativa a dos convocatorias del CONACYT sin que a la fecha haya sido beneficiada a pesar de su pertinencia, de su solidez científica, técnica y presupuestaria, y de su carácter multidisciplinario.

La Estrategia Nacional sobre Especies Invasoras debería ir acompañada de un presupuesto federal anual, que sea destinado a atender sus objetivos estratégicos. De otro modo, la estrategia deviene obsoleta, pues sus metas, acciones prioritarias y resultados esperados no se podrán alcanzar en la fecha propuesta, que fue planeada para el 2020.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Humberto Bahena Basave (ECOSUR) y Sergio Rendón Rodríguez (ICML) por tomar las fotografías que acompañan este trabajo. Sergio I. Salazar-Vallejo (ECOSUR) nos hizo recomendaciones valiosas para mejorar la nota.



## LITERATURA CITADA

- Abbott, R.T. Bivalvia. En: American seashells. 2<sup>nd</sup> Ed. Van Nostrand Reinhold Ltd., New York, 409-567 pp. 1974.
- Almeida, M. J., G. Moura, J. Machado, J. Coimbra, L. Vilarinho, C. Ribeiro, P. Soares-da Silva. 1996. Amino acid and metal content of *Crassostrea gigas* shell infested by *Polydora* sp. in the prismatic layer insoluble matrix and blister membrane. *Aquatic Living Resources*. 9 (2): 179-186. DOI10.1051/alr:1996021
- Arakawa, K. 1971. Notes on a serious damage to cultured oyster crops in Hiroshima caused by a unique and unprecedented outbreak of a serpulid worm, *Hydroides norvegica* (Gunnerus) in 1969. *Venus*. 30: 75-81.
- Barrios Caballero, Y., G. Born-Schmidt, A. I. González Martínez, P. Koleff Osorio, R. Mendoza Alfaro. 2014. Capítulo 6. *Avances en el desarrollo de criterios para definir y priorizar especies invasoras*. Pp: 113-121. En: Mendoza, R. & P. Koleff (Coords). *Especies acuáticas invasoras en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 555 pp.
- Bastida-Zavala, J.R., Ten Hove, H.A. 2002. Revision of *Hydroides* Gunnerus, 1768 (Polychaeta: Serpulidae) from the Western Atlantic region. *Beaufortia* 52, 103-178.
- Bastida-Zavala, J. R. 2008. Serpulids (Annelida: Polychaeta) from the Eastern Pacific, including a brief mention of Hawaiian serpulids. *Zootaxa*. 1722: 1-61.
- Bastida-Zavala, J. R., S. García-Madrigal. 2012. First record in the Tropical Eastern Pacific of the exotic species *Ficopomatus uschakovi* (Polychaeta, Serpulidae). *Zookeys*. 238: 45-55. doi: 10.3897/zookeys.238.3970.
- Bastida-Zavala, J. R., L. D. McCann, E. Keppel, G. M. Ruiz. 2017. The fouling serpulids (Polychaeta: Serpulidae) from United States coastal waters: an overview. *European Journal of Taxonomy*. 344: 1-76. <https://doi.org/10.5852/ejt.2017.344>
- Bastida-Zavala, J. R., J.Á. de León-González, J. L. Carballo, B. Moreno-Dávila. 2014. *Invertebrados bénticos exóticos: esponjas, poliquetos y ascidias*. Pp. 317-336. En: Mendoza, R. & P. Koleff (Coords.). *Especies acuáticas invasoras en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 555 pp.
- Blake, J. A., J. D. Kudenov. 1978. The Spionidae (Polychaeta) from Southeastern Australia and adjacent areas with a revision of the genera. *Memoirs of the National Museum of Victoria*. 39: 171-280.
- Boscolo, R., O. Giovanardi. 2002. *Polydora ciliata* shell infestation in *Tapes philippinarum* Manila clam held out of the substrate in the Adriatic Sea, Italy. *Journal of Invertebrate Pathology*. 79 (3): 197-198. DOI10.1016/S0022-2011(02)00029-0
- Bower, D., C. E. Death, A. Georges. 2012. Ecological and physiological impacts of salinisation on freshwater turtles of the lower Murray River. *Wildlife Research*. 39 (8): 705-710. <https://doi.org/10.1071/WR11214>
- Britayev, T. A., T. I. Antokhina. 2012. Symbiotic polychaetes from Nhatrang Bay, Vietnam. Pp.11-54. En: Britayev, T. A. & D. S. Pavlov (eds). *Benthic fauna of the Bay of Nhatrang, Southern Vietnam*, Chapter: 1, Publisher: KMK Scientific Press.
- Bruschetti, M., T. Luppi, E. Fanjul, A. Rosenthal, O. Iribarne. 2008. Grazing effect of the invasive reef-forming polychaete *Ficopomatus enigmaticus* (Fauvel) on phytoplankton biomass in a SW Atlantic coastal lagoon. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 354: 212-219. doi:10.1016/j.jembe.2007.11.009
- Cáceres-Martínez, J., P. Macías-Montes de Oca, R. Vásquez-Yeomans. 1998. *Polydora* sp. infestation and health of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* cultured in Baja California, NW Mexico. *Journal of Shellfish Research*. 17 (1): 259-264.
- Capa, M., J. Pons, P. Hutchings. 2013. Cryptic diversity, intraspecific phenetic plasticity and recent geographical translocations in *Branchiomma* (Sabellidae, Annelida). *Zoologica Scripta*. 42: 637-655, <https://doi.org/10.1111/zsc.12028>

- Chambon, C., A. Legeay, G. Durrieu, P. Gonzalez, P. Ciret, J. C Massabuau. 2007. Influence of the parasite worm *Polydora* sp. on the behaviour of the oyster *Crassostrea gigas*: a study of the respiratory impact and associated oxidative stress. *Marine Biology*. 152: 329-338.
- Clements, J. C., D. Bourque, J. McLaughlin, M. Stephenson, L. A. Comeau. 2017. Siltation increases the susceptibility of surface-cultured eastern oysters (*Crassostrea virginica*) to parasitism by the mudworm *Polydora websteri*. *Aquaculture Research*. 48 (9): 4707-4717. DOI: 10.1111/are.13292
- Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras. 2010. *Estrategia nacional sobre especies invasoras en México, prevención, control y erradicación*. CONABIO, SEMARNAT, CONANP, México, 114 pp.
- Costello, M. J., P. Bouchet, G. Boxshall, K. Fauchald, D. Gordon, B. W. Hoeksma, G. C. B. Poore, R. W. M. van Soest, S. Stöhr, T. C. Walter, B. Vanhoorne, W. Decock, W. Appeltans. 2013.
- Global coordination and standardization in marine biodiversity through the World Register of Marine Species (WoRMS) and related databases. *PLoS ONE*. 8 (1): e51629, 20 pp. doi:10.371/journal.pone.0051629.
- Culver, C. S., A. M. Kuris. 2000. The apparent eradication of a locally established introduced marine pest. *Biological Invasions*. 2: 245-253.
- Culver, C. S., A. M. Kuris, B. Beede. 1997. Identification and management of the exotic sabellid pest in California cultured abalone. California Sea Grant College System. La Jolla, CA, USA, 29 pp.
- de Assis, J. E., C. Alonso, M. L. Christoffersen. 2008. First record of *Ficopomatus uschakovi* (Pillai, 1960) Serpulidae (Polychaeta: Annelida) for the Western Atlantic. *Revista Nordestina de Biologia*. 19 (1): 51-58.
- Delgado-Blas, V. H. 2008. *Polydora* and related genera (Polychaeta: Spionidae) from the Grand Caribbean region. *Journal of Natural History*. 42 (1-2): 1-19.
- DOF. 2006. Carta Nacional Pesquera. Diario Oficial de la Federación. 25 de agosto de 2006.
- DOF. 2016. Lista de las especies exóticas invasoras para México. 07 de diciembre de 2016.
- Fauchald, K. 1972. Benthic polychaetous annelids from deep waters off western Mexico and adjacent areas in the eastern Pacific Ocean. *Allan Hancock Monographs in Marine Biology*. 7: 1-575.
- FAO Food and Agriculture Organization. 2011. Fisheries and Aquaculture Information and Statistics Service. En: <http://www.fao.org/fishery/statistics/en> (consultado el 21/10/2011).
- Fitzhugh, K., G. W. Rouse. 1999. A remarkable new genus and species of fan worm (Polychaeta: Sabellidae: Sabellinae) associated with marine gastropods. *Invertebrate Biology*. 118 (4): 357-390.
- Gallo-García, M. C., M. García-Ulloa Gómez, D. E. Godínez-Siordia, A. H. Díaz, V. H. Delgado-Blas. 2008. *Polydora websteri* (Annelida: Polychaeta) en el ostión del Pacífico *Crassostrea gigas* cultivado en Barra de Navidad, Jalisco. *Ciencia y Mar*. XII (35): 49-53.
- Gallo-García, M. C., D. E. Godínez-Siordia, G. M. García-Ulloa, K. Rivera-Gómez. 2001. Estudio preliminar sobre el crecimiento y sobrevivencia del ostión del Pacífico *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1873) en Barra de Navidad, Jalisco, México. *Universidad y Ciencia*. 17 (34): 83-91.
- Gallo-García, M. C., G. M. García-Ulloa, A. Rejón-Aviña, D. E. Godínez-Siordia, H. A. Díaz. 2007. Infestación de gusanos espionidos en el ostión *Crassostrea gigas* cultivado en la Laguna de Barra de Navidad, Jalisco, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 11 (3): 73-83.
- García-Garza, M. E. 2015. Presencia del espionido perforador en *Crassostrea rhizophorae* (Guilding, 1828) en la Laguna de Términos, Campeche



- México. Memorias en V Congreso sobre Manejo de Ecosistemas y Biodiversidad. La Habana, Cuba.
- Glasby, C. J. 1999. The Namanereidinae (Polychaeta: Nereididae). Part 1. Taxonomy and phylogeny. Part 2. Cladistic biogeography. *Records of the Australian Museum Supplement*. 25: 1-144.
- Glasby, C. J., P. A. Hutchings, K. Fauchald, H. Paxton, G. W. Rouse, C. Watson Russell, R. S. Wilson. 2000. Class Polychaeta. En: Beesley, P. L., G. J. B. Ross & C. J. Glasby (Eds.). *Polychaetes & Allies: The Southern Synthesis. Fauna of Australia. Vol. 4A. Polychaeta, Myzostomida, Pogonophora, Echiura, Sipuncula*. CSIRO Publishing, Melbourne, 1-296 pp.
- Glasby, C. J., T. Timm. 2008. Global diversity of polychaetes (Polychaeta: Annelida) in freshwater. *Hydrobiologia*. 595: 107-115.
- Global Biotech Consulting Group 13-001. <http://www.gbcbiotech.com/genomicaypesca/documentos/peces/ostion.pdf>
- González-Ortiz, L. 2016. *Poliquetos (Annelida: Polychaeta) y Esponjas (Porifera: Demospongiae) perforadores de la almeja Mano de León (Nodipecten subnodosus) en la Laguna Ojo de Liebre, Guerrero Negro, Baja California Sur, México*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, 179 pp.
- González-Ortiz, L., P. Hernández-Alcántara, R. Vázquez-Juárez, E. Quiroz-Guzmán, M. E. García-Garza, J. A. de León-González. 2017. Variación espacial y temporal de la infestación de la concha por *Polydora* sp. (Spionidae: Polychaeta) sobre la almeja mano de león (*Nodipecten subnodosus*) en la laguna Ojo de Liebre, Baja California Sur. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88: 845-852.
- Hirata, Y., S. Akashige. 2004. The present situation and problems of oyster culture in Hiroshima Bay. *Bulletin of Fisheries Research Agency, Supplement*. 1: 5-12.
- Keppel, E., M. A. Tovar-Hernández, G. Ruiz. 2015. First record of *Branchiomma coheni* (Polychaeta: Sabellidae) along the US East coast and update of non indigenous species. *Zootaxa*. 4058 (4): 499-518.
- Keppel E., M. A. Tovar-Hernández, G. Ruiz. 2018. New records of the non-indigenous species *Branchiomma bairdi* and *B. conspersum* (Polychaeta: Sabellidae) on the Pacific coast of North America. *BiInvasions Records*. En prensa.
- Kupriyanova, E. K., E. Nishi, H. A. ten Hove, A. V. Rzhavsky. 2001. A review of life history in serpulimorph polychaetes: ecological and evolutionary perspectives. *Oceanographic and Marine Biology: An Annual Review*. 39: 1-101.
- Kuris, A. M., C. S. Culver. 1999. An introduced sabellid polychaete pest infesting cultured abalones and its potential spread to other California gastropods. *Invertebrate Biology*. 118 (4): 391-403.
- Lavoie, R. E. 2005. Oyster culture in North America history, present and future. The First International Oyster Symposium Proceedings. Oyster Research Institute News 17, Sendai, Japan, 10 pp.
- Link, H., E. Nishi, K. Tanaka, J. R. Bastida-Zavala, E. K. Kupriyanova, T. Yamakita. 2009. *Hydroides dianthus* (Polychaeta: Serpulidae), an alien species introduced into Tokyo Bay, Japan. *JMBA2 Biodiversity Records*. 6430: 1-6.
- Liñero-Arana, I., O. Díaz-Díaz. 2012. Presencia del poliqueto exótico *Ficopomatus uschakovi* (Polychaeta: Serpulidae) en Venezuela: Descripción y comentarios sobre distribución. *Interciencia*. 37 (3): 234-237.
- Lleonart, M., J. Handlinger, M. Powell. 2003. Spionid mudworm infestation of farmed abalone (*Haliotis* spp). *Aquaculture*. 221: 85-96.
- Maciolek, N. J. 1985. A revision of the genus *Prionospio* Malmgren, with special emphasis to the genera *Apoprionospio* Foster, and *Paraprionospio* Caullery (Polychaeta: Spionidae). *Zoological Journal of the Linnean Society*. 84: 325-383.

- Martin, D., T. A. Britayev. 1998. Symbiotic polychaetes: Review of known species: 36. Pp: 217-340. En: Ansell, A. D., R. N. Gibson & M. Barnes (Eds.). *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. UCL Press.
- Moore, J. D., C. I. Juhasz, T. T. Robbins, E. D. Grosholz. 2007. The introduced sabellid polychaete *Terebrasabella heterouncinata* in California: Transmission, methods of control and survey for presence in native gastropods populations. *Journal of Shellfish Research*. 26 (3): 869-876.
- Moreno, R., P. Neill, N. Rozbaczylo. 2006. Native and non-indigenous boring polychaetes in Chile: a threat to native and commercial mollusc species. *Revista Chilena de Historia Natural*. 79: 263-278.
- Mortensen, S. H., T. van der Meeren, A. Fosshagen, I. Hernar, L. Harketstad, O. Bergh. 2000. Mortality of scallop spat in cultivation, infested with tube dwelling bristle worms, *Polydora* sp. Short communication. *Aquaculture International*. 8 (2-3): 267-271.
- Muniz, P., J. Clemente, E. Brugnoli. 2005. Benthic invasive pests in Uruguay: a new problem or an old one recently perceived? *Marine Pollution Bulletin*. 50: 993-1018.
- Okolodkov, Y. B., J. R. Bastida-Zavala, A. L. Ibáñez, J. W. Chapman, E. Suárez-Morales, F. Pedroche, F. J. Gutiérrez-Mendieta. 2007. Especies acuáticas no indígenas en México. *Ciencia y Mar*. 11 (32): 29-67.
- Orensanz, J. M., E. Schwindt, G. Pastorino, A. Bortolus, G. Casas, G. Darrigran, R. Elías, J. J. López-Gappa, S. Obenat, S. Pascual, P. Penchaszadeh, M. L. Piriz, F. Scarabino, E. D. Spivak, E. Vallarino. 2002. No longer the pristine confines of the world ocean: a survey of exotic marine species in the southwestern Atlantic. *Biological Invasions*. 4: 115-143.
- Otani, M., R. Yamanishi. 2010. Distribution of the alien species *Hydroides dianthus* (Verrill, 1873) (Polychaeta: Serpulidae) in Osaka Bay, Japan, with comments on the factors limiting its invasion. *Plankton and Benthos Research*. 5: 62-68.
- Pernet, B., M. Barton, K. Fitzhugh, L. H. Harris, D. Lizárraga, R. Ohl, C. R. Whitcraft. 2016. Establishment of the reef-forming tubeworm *Ficopomatus enigmaticus* (Fauvel, 1923) (Annelida: Serpulidae) in southern California. *BioInvasions Records*. 5 (1): 13-19.
- Powell, E. N., Y. Kim, D. Bushek. 2015. Temporal structure and trends of parasites and pathologies in U.S. oysters and mussels: 16 years of mussel watch. *Journal of Shellfish Research*. 34: 967-993.
- Radashevsky, V. I. 2005. On adult and larval morphology of *Polydora cornuta* Bosc, 1802 (Annelida: Spionidae). *Zootaxa*. 24: 1-24.
- Radashevsky, V. I., H. Hsieh. 2000. *Polydora* (Polychaeta: Spionidae) species from Taiwan. *Zoological Studies*. 39: 203-217.
- Radashevsky, V. I., Z. P. Selifonova. 2013. Records of *Polydora cornuta* and *Streblospio gynobranchiata* (Annelida, Spionidae) from the Black Sea. *Mediterranean Marine Science*. 14: 261-269. doi:10.12681/mms.415.
- Radashevsky, V. I., P. C. Lana, R. C. Nalesso. 2006. Morphology and biology of *Polydora* species (Polychaeta: Spionidae) boring into oyster shells in South America, with the description of a new species. *Zootaxa*. 1353: 1-37.
- Read, G. B. 2010. Comparison and history of *Polydora websteri* and *P. haswelli* (Polychaeta: Spionidae) as mud-blister worms in New Zealand shellfish. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 44(2): 83-100.
- Rioja, E. 1961. Estudios Anelidológicos 24. Adiciones a la fauna de anélidos poliquetos de las costas orientales de México. *Anales del Instituto de Biología, UNAM*. 31: 289-316.
- Rouse, G. W., F. Pleijel. 2001. *Polychaetes*. Oxford University Press, 354 pp.
- SAGARPA-CONAPESCA. 2012. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA). Mazatlán. 385 p. Disponible en línea en: [http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/anuario\\_2012\\_zip](http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/anuario_2012_zip)

- Salazar Vallejo, S. I., N. E. González Vallejo, E. Schwindt. 2008. Taxonomía de invertebrados marinos: necesidades en Latinoamérica. *Interciencia*. 33 (7): 510-517.
- Salazar-Vallejo, S. I., E. Escobar-Briones, N. E. González, E. Suárez-Morales, F. Álvarez, J. A. de León-González, M. E. Hendrickx. 2007. Iniciativa mexicana en taxonomía: biota marina y costera. *Ciencia y Mar*. 11: 69-77.
- Salazar-Vallejo, S. I., L. F. Carrera-Parra, N. E. González-Vallejo, S. A. Salazar-González. 2014. *Biota portuaria y taxonomía*. Pp: 33-54. En: Low Pfeng, A., P. Quijón & E. Peters (Eds.). *Especies invasoras acuáticas de México: casos de estudio*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), University of Prince Edward Island (UPEI), México.
- Salgado-Barragán, J., N. Méndez, A. Toledano-Granados. 2004. *Ficopomatus miamiensis* (Polychaeta: Serpulidae) and *Styela canopus* (Ascidiacea: Styelidae), non-native species in Urías estuary, SE Gulf of California, Mexico. *Cahiers de Biologie Marine*. 45: 167-173.
- San Martín, G. 2005. Exogoninae (Polychaeta: Syllidae) from Australia with the description of a new genus and twenty-two new species. *Records of the Australian Museum*. 57: 39-152.
- Sato-Okoshi, W., H. Abe, G. Noshitani, C. A. Simon. 2017. And then there was one: *Polydora uncinata* and *Polydora hoplura* (Annelida: Spionidae), the problematic polydorid pest species represent a single species. *Journal of the Marine Association of the United Kingdom*. 97(8): 1675-1684.
- Schwindt, E., A. Bortolus, O. O. Iribarne. 2001. Invasion of a reef-builder polychaetes: direct and indirect impacts on the native benthic community structure. *Biological Invasions*. 3: 137-149. doi: 10.1023/A:1014571916818
- Schwindt, E., O. O. Iribarne, F. I. Isla. 2004. Physical effects of an invading reef-building polychaete on an Argentinean estuarine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 59: 109-120.
- Streftaris, A., N. Zenetos. 2006. Alien marine species in the Mediterranean - the 100 'worst invasives' and their impacts. *Mediterranean Marine Science*. 7: 87-118. doi:10.12681/mms.180.
- Styan, C. A., C. F. McCluskey, Y. Sun, E. K. Kupriyanova. 2017. Cryptic sympatric species across the Australian range of the global estuarine invader *Ficopomatus enigmaticus* (Fauvel, 1923) (Serpulidae, Annelida). *Aquatic Invasions*. 12 (1): 53-65.
- Suárez-Morales, E., S. Jiménez-Cueto, S. I. Salazar-Vallejo. 2005. Catálogo de los Poliquetos Pelágicos (Polychaeta) del Golfo de México y Mar Caribe Mexicano. CONACYT, SEMARNAT & ECOSUR, México, 99 p.
- Sun, Y., E. Wong, H. A. ten Hove, P. A. Hutchings, J. Williamson, E. K. Kupriyanova. 2015. Revision of the genus *Hydroides* (Serpulidae, Annelida) from Australia. *Zootaxa*. 4009: 1-99. doi:10.11646/zootaxa.4009.1.1
- Tebble, N. 1953. A source of danger to harbour structures. Encrustation by a tubed marine worm. *Journal of the Institution of Municipal Engineers*. 80: 259-265
- ten Hove, H. A., J. C. A. Weerdenburg. 1978. A generic revision of the brackish-water serpulid *Ficopomatus* Southern 1921 (Polychaeta: Serpulinae), including *Mercieriella* Fauvel 1923 *Sphaeropomatus* Treadwell 1934, *Mercierellopsis* Rioja 1945 and *Neopomatus* Pillai 1960. *Biological Bulletin*. 154 (1): 96-120. doi: 10.2307/1540777
- Tovar-Hernández, M. A., L. F. Carrera-Parra, J. A. de León-González. Presence of two amphiamerican invasive species of *Ficopomatus* in Mexico (Polychaeta: Serpulidae). *Biological Invasions*. In prep.
- Tovar-Hernández, M. A., N. Méndez, J. Salgado-Barragán. 2009a. *Branchiomma bairdi*: a Caribbean hermaphrodite fan worm in the south-eastern Gulf of California (Polychaeta: Sabellidae). *Marine Biodiversity Records* 2: 1-8. <http://doi.org/10.1017/S1755267209000463>
- Tovar-Hernández, M. A., N. Méndez, T. F. Villalobos-Guerrero. 2009b. Fouling tubicolous polychaetes worms from the south-eastern Gulf of California:



Sabellidae and Serpulidae. *Systematics and Biodiversity*. 7(3): 1–18. <http://dx.doi.org/10.1017/S1477200009990041>

Tovar-Hernández, M. A., E. Suárez-Morales, B. Yáñez-Rivera. 2010. The parasitic copepod *Haplostomides hawaiiensis* (Cyclopoida) from the invasive ascidian *Polyclinum constellatum* in the southern Gulf of California. *Bulletin of Marine Science*. 86 (3): 637–648.

Tovar-Hernández, M. A., B. Yáñez-Rivera. 2012a. Capítulo XI: *Ficha técnica y análisis de riesgo de Terebrasabella heterouncinata Fitzhugh & Rouse, 1999 (Polychaeta: Sabellidae)*. Pp: 215–235. En: Low Pfeng, A. M. & E. M. Peters Recagno (Eds.). *Invertebrados marinos exóticos en el Pacífico mexicano*. Geomare, A. C., INE-SEMARNAT, México.

Tovar-Hernández, M. A., B. Yáñez-Rivera. 2012b. Capítulo X: *Ficha técnica y análisis de riesgo de Ficopomatus miamiensis (Treadwell, 1934) (Polychaeta: Serpulidae)*. Pp: 193–212. En: Low Pfeng, A. M. & E. M. Peters Recagno (Eds.). *Invertebrados marinos exóticos en el Pacífico mexicano*. Geomare, A. C., INE-SEMARNAT, México.

Tovar-Hernández, M. A., B. Yáñez-Rivera. 2012c. Capítulo IX: *Ficha técnica y análisis de riesgo de Branchiomma bairdi (McIntosh, 1885) (Polychaeta: Sabellidae)*. Pp: 167–190. En: Low Pfeng, A. M. & E. M. Peters Recagno (Eds.). *Invertebrados marinos exóticos en el Pacífico mexicano*. Geomare, A. C., INE-SEMARNAT, México.

Tovar-Hernández, M. A., B. Yáñez-Rivera. 2012d. Capítulo I: *Actualización de las especies de invertebrados acuáticos exóticos en el Pacífico mexicano*. Pp: 1–6. En: Low Pfeng, A. M. & E. M. Peters Recagno (Eds.). *Invertebrados marinos exóticos en el Pacífico mexicano*. Geomare, A. C., INE-SEMARNAT, México.

Tovar-Hernández, M. A., B. Yáñez-Rivera, T. F. Villalobos-Guerrero, J. M. Aguilar-Camacho, I. D. Ramírez-Santana. 2014a. *Detección de invertebrados exóticos en el Golfo de California*. Capítulo 16. Pp: 383–411. En: Low Pfeng, A., P. Quijón & E. Peters. (Eds.) *Especies invasoras acuáticas de México: casos de estudio*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), University of Prince Edward Island (UPEI), México.

Tovar-Hernández, M. A., Salazar-Silva, P., de León-González, J. A., Carrera-Parra, L. F. & Salazar-Vallejo, S. I. 2014b. Biodiversidad de Polychaeta (Annelida) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85 suplemento190: 190-196. <http://www.revistas.unam.mx/index.php/bio/article/view/32625>

Tovar-Hernández, M. A., B. Yáñez-Rivera, J. L. Bortolini-Rosales. 2011. Reproduction of the invasive fan worm *Branchiomma bairdi* (Polychaeta: Sabellidae). *Marine Biology Research*. 7 (7): 710–718. DOI:10.1080/17451000.2010.547201

Vidal-Briseño C. I., R. I. Hernández-Herrera, G. Galindo-Cortes, P. San Martín-del Ángel. 2015. Estructura poblacional de la captura del ostión *Crassostrea virginica* en las lagunas de Tamiahua y Tampamachoco, Veracruz, México. *Hidrobiológica*. 25 (2): 265–273.

Villalobos-Guerrero, T. F., B. Yáñez-Rivera, M. A. Tovar-Hernández. 2012. Capítulo IV: *Polychaeta*. Pp: 45–66. En: Low Pfeng, A. M. & E. M. Peters Recagno (Eds.). *Invertebrados marinos exóticos en el Pacífico mexicano*. Geomare, A. C., INE-SEMARNAT, México.

Wargo, R. N., S. E. Ford. 1993. The effect of shell infestation by *Polydora* sp. and infection by *Haplosporidium nelsoni* (MSX) on the tissue condition of oysters, *Crassostrea virginica*. *Estuaries*. 16 (2): 229–234. <https://doi.org/10.2307/1352494>

Zibrowius, H, C. H. Thorp. 1989. A review of the alien serpulid and spirorbid polychaetes in the British Isles. *Cahiers de Biologie Marine*. 30: 271–285.

# EL RETO TAXONÓMICO DE LA BIODIVERSIDAD EN MÉXICO

Salazar-Vallejo, S.I.\*, N.E. González, J. Barrientos-Villalobos, R.A.  
Carbajal-Márquez y J.J. Schmitter-Soto







**Palabras clave: insuficiencia taxonómica, número de especies, plan nacional, entrenamiento, plazas para taxónomos.**



*La crisis de la taxonomía es un mero síntoma de un sistema científico que da más valor a lo inmediato, mediático y aplicado que al conocimiento per se, castrando los valores innatos de que ha hecho gala nuestra actividad durante siglos.*

Juan José Ibáñez, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

## RESUMEN

Las estimaciones más recientes sobre el número de especies planetarias son realmente abrumadoras porque puede haber 1-6 mil millones de especies incluyendo bacterias y organismos más complejos (plantas y animales), y porque nuestra tradición taxonómica que ronda tres siglos, apenas ha provisto nombres para dos millones de especies. El reto parece insuperable. Por los costos de entrenamiento y por el número de estudiantes, países como Brasil y México tienen una ventaja sobre naciones más industrializadas y han alcanzado resultados muy importantes, por lo que tenemos un compromiso con el planeta. Proponemos que, desde el marco referencial de su vasta biodiversidad, y de la mano del talento y pasión de sus investigadores y estudiantes, se consolide nuestra tradición en un plan nacional para el conocimiento de la biodiversidad. La propuesta debe ser colectiva, respaldada por sociedades científicas, universidades y centros de investigación, y han de combinarse entrenamientos formales con la disponibilidad de plazas, de manera que se incremente el número de taxónomos profesionales. Harán falta definir grupos prioritarios por el nivel de ignorancia, por el número de especies estimadas, por su relevancia ecológica o económica, y con atención a la tradición formalizada en nuestras instituciones. Una vez definidas las necesidades, se requerirán gestiones correspondientes con los tomadores de decisiones, sean curadores o responsables de grupos de investigación, directores de escuelas, rectores, directores de centros, o mesas directivas de sociedades científicas. El reto es muy grande y la propuesta debe ser acorde a las necesidades definidas, a pesar del panorama negativo del financiamiento para la educación superior e investigación científica.



## BIODIVERSIDAD

La variedad de especies, su estructura genética, y las interacciones entre ellas en un sitio concreto o a nivel de paisaje para formar sistemas ecológicos conforman la biodiversidad (Noss, 1990; Salazar-Vallejo y González, 1993). El desarrollo de las poblaciones humanas, a partir de la agricultura y el establecimiento de los centros urbanos, ha ocasionado impactos sobre la naturalidad del paisaje. Dichos efectos han sido intensificados con la industrialización y las actividades extractivas necesarias para satisfacer las necesidades de casi 8 mil millones de personas. Además, de la mano del sistema de producción basado en una economía lineal (extracción de recursos-producir-usar y desechar) en contraposición con una economía circular (extracción o reúso de recursos-producir-usar-reciclar) (Hass et al., 2015), han tenido un efecto devastador sobre las especies y sobre el paisaje. La situación es tan crítica que confrontamos la sexta extinción masiva (Barnosky et al., 2011); a diferencia de las precedentes, esta ha sido generada por nuestras acciones. La magnitud e intensidad de la defaunación marina y continental ocurre con gran rapidez y nosotros somos la causa (Dirzo et al., 2014; McCauley et al., 2015). Tan es así que Steffen et al. (2016) propusieron una nueva época posterior al Holoceno y la han denominado el Antropoceno.

La situación no es promisorio porque la capacidad de carga del planeta parece haber sido rebasada desde finales de los años 70 (Wackernagel et al., 2002). Además, en la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés), más de 16,000 especies están bajo alguna categoría de riesgo, pero tras haber evaluado un 5% de la biodiversidad planetaria. Recientes estimaciones basadas en las listas de la IUCN calculan una tasa de extinción 6500 veces mayor que la tasa de extinción natural y que las poblaciones del 32% de las especies de vertebrados están disminuyendo (Ceballos et al., 2017). Además, Hambler y Speight (1996) calcularon que se extingue una especie de invertebrado no marino cada año en el Reino Unido y 20 años después, la situación es mucho más dramática (McCauley et al., 2015), especialmente en los organismos de mayor tamaño (Payne et al., 2016).

El término biodiversidad se popularizó a fines de los 1980 por el libro editado por Edward Wilson (Wilson, 1988). México respondió con rapidez al establecer una Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) en 1992, unos meses antes de la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro. Los objetivos esenciales de CONABIO se centraban en la generación de bases de datos y otras compilaciones que brindasen un panorama nacional de la biodiversidad. Empero, en su primera etapa, cuando eran una decena de personas en una casona de Coyoacán, encabezados por Jorge Llorente y con el respaldo de varios colegas brasileños, organizaron talleres y diplomados itinerantes sobre taxonomía y sistemática en varias instituciones del país, además de editar una serie de libros sobre estos y otros temas de biología comparada (Papavero y Llorente, 1993-1996).

Luego de algunos cambios del personal, ese énfasis de CONABIO en promover el conocimiento taxonómico se dejó de lado, en aras de incrementar las bases de datos, en lo que han sido particularmente exitosos. No obstante, el desdén parecía obedecer a la percepción de que la biota nacional estaba razonablemente bien conocida -quizá desde la perspectiva de aves, mamíferos y plantas superiores-, por lo que era prioritario compilar la información. No generar nueva, ni intensificar el entrenamiento de nuevos taxónomos. Fue un grave error. En las páginas siguientes explicaremos la razón de esta afirmación, pero podemos adelantar que una estimación reciente indica que conocemos un tercio del total de especies del país (Martínez-Meyer et al., 2014).

## PANORAMA

México es uno de los países considerados mega diversos por su alta riqueza en especies y endemismos. En un 1.3% de la superficie planetaria, contamos con un 10-15% del total de especies continentales (Luna-Plascencia et al., 2011). Esta disparidad que puede mover a presunción, en realidad representa un serio reto para los biólogos. La importancia que México representa para la biodiversidad del planeta, por un lado, y por el otro, para la generación de información básica para potenciar estudios adicionales y para el futuro de la nación, demuestra que estamos contra reloj.

Desde esta perspectiva, el reto adquiere dimensiones titánicas cuando dimensionamos los avances a la fecha al compararlos con las estimaciones más recientes sobre el número de especies del planeta. Si consideramos a los organismos eucariotas (con núcleo verdadero), la tradición iniciada por Lineo de nombrar las especies con dos palabras (nomenclatura binominal) empezó a mediados de 1750 y desde entonces, se han descrito unos 2 millones de especies. Las reglas para hacerlo se compilan en sendos códigos de nomenclatura (botánica y zoológica) que lamentablemente son poco conocidos incluso por los taxónomos practicantes.

Una estimación reciente (Mora et al., 2011), basada en el hallazgo de que hay una tendencia numérica entre los componentes de cada categoría taxonómica (phylum a especie), resultó en casi 9 millones de especies para el planeta, de las que un poco más de 2 millones serían especies marinas, por lo que nuestro nivel de ignorancia sería cercano al 90%, repartida en un 86% de especies terrestres y 91% de las marinas aún por describir.

Un cálculo sencillo mostraría que, de mantenerse las condiciones actuales, harían falta unos 12 siglos para terminar la tarea. Lamentablemente, nuestra intensidad de transformación del paisaje ocasionará la extinción de la mayoría de las especies antes de siquiera recolectarlas, depositarlas en colecciones y mucho menos, describirlas. Es apremiante tener un plan de acción proporcional al tamaño del reto. Nuestro objetivo es presentar una recomendación para México; otras propuestas parecidas pero limitadas a los invertebrados marinos están en otra parte (Salazar-Vallejo et al., 2007, 2008).

## IMPEDIMENTO TAXONÓMICO

El impedimento taxonómico indica que en las condiciones actuales no podremos llegar a conocer a todas las especies del planeta. El impedimento taxonómico es un problema estructural y global con dos componentes: uno hacia los usuarios y el otro hacia los practicantes (Ebach et al., 2011). En el primer caso, se refiere a que no contamos con información suficiente, actualizada y confiable sobre la biota de muchísimas regiones del mundo, lo que limita estudios sobre el uso potencial o sus relaciones



ecológicas. En el segundo, a la reducción de los taxónomos profesionales de centros de investigación, museos o universidades, ligada con el colapso de la generación de nuevas plazas y del entrenamiento de los jóvenes en taxonomía, así como la reducción de los fondos para investigación. Una de las razones para esto último sería que no hemos tenido objetivos claros y alcanzables, dado que seguimos con la incertidumbre sobre cuántas especies hay en el planeta.

Una propuesta de solución del problema de información fue la implementación de la técnica de códigos de barras del DNA (Hebert y Gregory, 2005). Se basa en la secuenciación de la fracción 1 del gen que codifica la citocromo-oxidasa mitocondrial, por lo que también es referida como COI, y tiene una resolución muy alta en la mayoría de los grupos de animales en los que se ha explorado, pero no en plantas. Hebert y Gregory (2005) enfatizaron que el método aceleraría la toma de decisiones taxonómicas sobre especies crípticas y permitiría conjugar etapas de desarrollo o dimorfismo sexual, así como reconocer posibles sinonimias. Esto ha sido posible al comparar con las secuencias disponibles y, de hecho, se ha dado un paso más al realizar análisis de muestras de agua para detectar evidencias de la presencia de especies, denominado DNA ambiental, que resulta muy útil al tratarse de exóticas (Dejean *et al.*, 2012). En realidad, la herramienta es poderosa y en tanto fuente de información, su utilidad es innegable y se han hecho recomendaciones para que sea incorporada en la taxonomía (Hubert y Hanner, 2015), en lo que se ha denominado taxonomía integrativa (Dayrat, 2005; Will *et al.*, 2005; Sukumaran y Gopalakrishnan 2015). Aunque la dinámica para la extracción y secuenciación puede hacerse con robots y en forma realmente masiva, el cuello de botella más limitante es la descripción de las especies (Pante *et al.*, 2015), lo que la convierte en una herramienta prospectiva y heurística. Entonces, debemos considerar el segundo componente del impedimento taxonómico: los taxónomos *per se*.

Las muchas crisis que enfrentan la taxonomía y los taxónomos fueron reseñadas en otra parte (Salazar-Vallejo y González, 2016); podemos mencionar que la situación es seria al colapsarse el número de taxónomos, porque en los últimos 15

años se perdieron dos tercios de los profesionales (Coleman, 2015). Incluso en grupos relativamente bien conocidos, como los peces, se ha observado en algunas sociedades científicas una disminución de los agremiados auto-identificados como taxónomos, con un aumento de los que se dedican a cuestiones "aplicadas", como pesquerías y acuicultura (Schmitter-Soto, 2002). No obstante, en el presente trabajo debemos concentrarnos en las recomendaciones para la situación mexicana y en el cómo las universidades y tecnológicos podrían ser los principales generadores del cambio urgente para mejorar la situación. La razón esencial es la masa crítica con la que cuentan las casi 50 escuelas de biología repartidas en 25 estados del país, a las que debe agregarse las tres escuelas de biología marina y otras tantas de oceanología, así como sus instalaciones, bibliotecas y colecciones.

Ante las altas estimaciones sobre la diversidad de especies del planeta, Hebert *et al.* (2016) consideraron que, como los astrónomos con las estrellas, deberíamos abandonar la práctica de nombrar especies porque hay demasiadas sin bautizar. No es ni puede ser una estrategia razonable. La mayor contribución de la taxonomía a la ciencia y humanidad está por venir y pese a las críticas de algunos biólogos despistados, estamos en una etapa que debiera ser la de la expansión de la taxonomía.

## RIQUEZA Y TAXÓNOMOS

La combinación entre riqueza biológica y talento profesional o taxónomos potenciales, nos permite considerar que podemos superar el reto que nos corresponde y, como ya han demostrado varios taxónomos talentosos, realizar estudios planetarios siempre que se disponga de tiempo, interés y recursos para hacerlo. No obstante, la relación no es tan simple por varias razones, entre las que destacan el desinterés por la taxonomía de parte de muchos biólogos profesionales, lo que desencadenó en el abandono de colecciones y tradiciones en varias escuelas. Esto no fue gratuito, pues en muchos programas universitarios de la carrera de biología o similares, los cursos básicos (botánicas y zoologías) fueron cancelados por otros supuestamente más modernos. Finalmente, y no menos importante, los fondos disponibles para plazas o proyectos de investigación son cada vez más exigüos; como



espetó alguna vez a uno de los autores un evaluador: 'Taxonomy is kind of riding in the back seat of science, don't you think?' Por supuesto que no.

No intentamos proponer que se abandone todo en aras de la taxonomía, sino que el respaldo gubernamental debe mejorarse en todos los niveles y, en particular, se requiere formalizar un plan nacional para la investigación taxonómica que incluya cursos, entrenamientos, nuevas plazas e instalaciones, y fondos para la investigación.

## EDUCACIÓN SUPERIOR

Consideramos imprescindible un nivel de educación superior para emprender investigaciones en taxonomía porque debe haber entrenamientos básicos en biología, evolución, botánica y zoología que motiven el interés de los jóvenes, seguidos de ejercicios en grupos biológicos concretos. Puede ser que luego de una licenciatura y un posgrado no se consiga una plaza como taxónomo, pero es crítica la calidad de la formación. En países en los que el nivel salarial permite tal holgura económica que puede uno dedicarse a la taxonomía como aficionado, un 60% de las publicaciones taxonómicas son realizadas por personas que no tienen contratos explícitamente como tales (Fontaine *et al.*, 2012). No obstante, debe aclararse la conformación de estos dos grupos de especialistas, especialmente porque son los taxónomos profesionales los que pueden involucrarse en iniciativas colectivas y masivas como la que estamos presentando.

**Grupo profesional** Los profesionales son los taxónomos activos, que tienen una plaza y salario por sus actividades en esa disciplina, incluso si su contrato no lo especifica tal cual. Pueden desempeñarse en museos o centros de educación superior o investigación científica. La importancia central de este grupo radica en que a él se deben la mayor parte de los entrenamientos formales.

**Grupo aficionado** Los otros taxónomos cuya plaza y actividades no son estrictamente taxonómicas, como los muchos profesionales de las ciencias ambientales, o que se retiraron siendo taxónomos, pero siguen activos, y aquellos que tienen una actividad económica distinta y distante, pero que les permite hacer investigación

taxonómica. La actividad de este grupo impacta especialmente a taxones tradicionalmente llamativos, como las mariposas, las aves o los peces, y resulta paradójico que a menudo son los aficionados quienes realizan expediciones de colecta más largas e intensas, con valiosas informaciones de campo con potencial valor taxonómico. Por ejemplo, sobre coloración en vivo. Sin embargo, también es notoria la aportación de los taxónomos jubilados sobre phyla muy poco conocidos; de hecho, el conocimiento sobre éstos se puede estancar notoriamente a la muerte del último experto nacional o mundial.

## ruta crítica

**Regiones** La regionalización biológica de México está bien definida a gran escala. La biota continental está entre las regiones biogeográficas neártica y neotropical, mientras que para la biota marina nos hallamos en el Pacífico oriental tropical, con una reducida intrusión de biota templada por la corriente de California, y el Gran Caribe. Algunas instituciones mexicanas han intentado cubrir la mayor parte de la biota nacional pero la mayoría están más o menos centradas en algunas regiones adyacentes o relativamente cercanas. Una primera consideración sería que cada una de las instituciones interesadas defina su región de interés, aunque como en otras grandes iniciativas mexicanas, como el programa de cátedras de Conacyt, deberían priorizarse las regiones menos atendidas, así como las instituciones menos consolidadas.

**Tradición** Otra consideración relevante es la tradición institucional. Es decir, deberá explicarse cuál es la cobertura de grupos de organismos, lo que puede manifestarse por las colecciones correspondientes, así como las tesis realizadas en dichos grupos. Puede adelantarse, empero, que el interés será el de ampliar la cobertura de grupos biológicos y evitar acumular las plazas o intereses en los grupos relativamente mejor conocidos, sin que esta estrategia implique abandonar éstos últimos; de hecho, es crucial buscar un relevo adecuado cuando el taxónomo responsable de una colección importante esté por retirarse.

**Expansión** Cada institución deberá realizar un ejercicio de expansión que incluya grupos biológicos poco atendidos en su tradición, pero con alguna

relevancia en términos de nivel de ignorancia, en papel ecológico, biomasa, por su relevancia agropecuaria, o para la salud pública. Esto implicará la generación de nuevas plazas y formación de taxónomos en las áreas determinadas, así como el espacio para la generación de nuevas colecciones tanto biológicas como de germoplasma.

## NECESIDADES

**Acuerdos** Es necesario consensar la elaboración de un plan de acción nacional que incluya la formación y especialización de nuevos taxónomos para la mayor parte de grupos biológicos existentes, así como su integración laboral en los centros de investigación e instituciones de educación superior en todo el país. Esta reflexión y proyección deberán realizarse desde las escuelas de ciencias ambientales. Luego, deberán ventilarse en los foros de toma de decisiones de cada institución, para generar consensos y alcanzar respaldos formales. Dichas propuestas deberán incorporarse en los presupuestos institucionales y negociarse de manera colectiva en la instancia superior que corresponda, de preferencia con respaldo en las cámaras legislativas correspondientes, como se comentará más adelante. Las sociedades científicas, por su parte, deberán involucrarse de manera participativa y propositiva en el planteamiento y toma de decisiones para optimizar la calidad de las propuestas y afinar las orientaciones deseadas para sus grupos de interés.

**Plazas** Para concretar acciones proporcionales al reto que enfrentamos es prioritario generar nuevas plazas en los centros de investigación y de educación superior del país, priorizando las áreas de interés particular de las instituciones involucradas. El definir cuáles grupos ameritan mayor atención deberá ser resultado de un ejercicio colectivo y orientado al futuro. Por ejemplo, a nivel mundial el número de taxónomos repartidos entre vertebrados, plantas e invertebrados es 1:1:1, sin considerar a los paleontólogos. No obstante, debe evitarse mantener esa proporción porque cálculos muy someros arrojan que las plantas son 10 veces más diversas que los vertebrados, mientras que los invertebrados son muchísimo más diversos que los vertebrados (May, 2011). Esta nueva proporción podría modificarse mucho más al considerar a los procariontes (bacterias y arqueas) (Larsen et al., 2017). Por ello, el

número de plazas a generarse deberá idealmente equilibrarse de manera proporcional a la diversidad calculada en cada grupo taxonómico del árbol de la vida, y los intereses de investigación determinados de manera consensada.

**Otras necesidades.** De acuerdo con los grupos biológicos concretos y con el tipo de investigación a realizar, deberán considerarse otros aspectos relevantes tales como cuestiones de espacio y mobiliario (Simmons y Muñoz-Saba, 2005), de equipo y de necesidades específicas para actividades en estudios moleculares (DeSalle et al., 2002).

**Fondos** Además de las plazas de los curadores y personal de mantenimiento, deberán considerarse recursos para el fortalecimiento y mantenimiento de las colecciones científicas del país, así como recursos adicionales para salidas de recolecta, si fuera el caso, para la realización de tesis en taxonomía, estancias de investigación en otras colecciones nacionales o del extranjero, cursos complementarios o entrenamientos adicionales. Los montos se deben calcular y consensar en cada institución en función de sus prioridades y líneas de investigación subyacentes, para ser incluidos en el Plan Nacional y se consideren en los recursos solicitados a la federación.

Una posibilidad complementaria para la entrada de recursos para colecciones puede ser la instalación de museos de historia natural para público en general, donde se puedan exhibir ejemplares (taxidermia), fósiles o sus réplicas, minerales, sala de proyecciones de películas documentales, sala de educación ambiental, espacios interactivos, sala de usos múltiples (muestras de pintura, fotografía), cafetería y tienda de souvenir de la institución de que se trate. Los ingresos podrán ser marginales, pero el beneficio en apoyo público a la taxonomía será una inversión a largo plazo.

**Entrenamiento** México cuenta con taxónomos muy destacados en los diferentes grupos del árbol de la vida. Por ello, un compromiso imprescindible es aprovechar la gran experiencia de los taxónomos activos a través de cursos intensivos u otros entrenamientos. Sólo en caso de grupos sobre los cuales no exista un especialista en nuestro país, será conveniente enviar doctorantes con dicho experto, o bien invitar a éste para una estancia larga aquí. Del mismo modo, deberá considerarse la necesidad de

incorporar nuevas herramientas para la investigación taxonómica, especialmente métodos moleculares, para realizar esfuerzos integradores.

## PROGRAMA NACIONAL

Nuestra vida presente y futura depende de la diversidad biológica; de ella obtenemos alimentos, medicinas, casa, vestido y esparcimiento, y de la actividad concertada de una gran parte de ellos podemos tener agua y aire limpios (Vellend *et al.*, 2017). El promover el conocimiento de la biodiversidad debería ser más que suficiente para motivarnos y tomar acciones concretas en ese sentido, ante la amenaza de las extinciones contemporáneas. Consideramos que un programa nacional en taxonomía debería tener una duración mínima de 25 años y someterse a revisiones periódicas para mejorarlo.

Si bien arriba hemos argumentado que la base humana del esfuerzo debe estar en centros de investigación y universidades, será preciso contar con el respaldo de secretarías de estado tales como las de Educación, Hacienda, Semarnat, SeMar, Recursos Naturales, Pesca y Marina. También, por supuesto, con las cámaras de senadores y diputados, a través de sus comisiones de Ciencia, Recursos naturales y otras. El programa debe ser federal, pero requerirá el respaldo también de las cámaras legislativas estatales y municipales. Debemos insistir que la gestión también debe ser colectiva.

Finalmente, aunque nos oponemos en principio a la idea de la ciencia como negocio, dado que el acceso y generación de conocimiento debe ser un derecho ciudadano garantizado por el Estado y no sujeto a los vaivenes del mercado, también es cierto que la iniciativa privada puede y debe coadyuvar en este esfuerzo. Por ejemplo, un buen acuario o museo puede ser fuente legítima de ingresos particulares y, al mismo tiempo apoyar el programa nacional de biodiversidad al fomentar investigaciones relevantes. Lo mismo cabe decir de comercios como el acuarístico, aunque será crucial que su interés usual por la ganancia fácil debida a la venta de variedades artificiales, se reoriente hacia la conservación y conocimiento de nuestras especies nativas.

Nuestro reto es adicionalmente abrumador si consideramos la poca consideración revelada por los presupuestos nacionales, federales o estatales, hacia la educación superior e investigación científica, en los que raramente son prioritarios y no alcanzan el 1% del PIB. Entonces, en lugar de sentirnos abatidos por ese panorama, debemos mejorar nuestra organización, la calidad de las solicitudes de financiamiento, y la gestión de proyectos de este tipo.

---

## AGRADECIMIENTOS

La lectura cuidadosa por un revisor anónimo y por Jaime Gómez-Gutiérrez resultó en una notable mejoría de esta contribución.





## LITERATURA CITADA

- Barnosky, A., N. Matzke, S. Tomiya, G.O.U. Wogan, B. Swartz, T.B. Quental, C. Marshall, J.L. McGuire, E.L. Lindsey, K.C. Maguire, B. Mersey y E.A Ferrer. 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471:51-57. doi:10.1038/nature09678.
- Ceballos, G., P.R. Ehrlich y R.Dirzo. 2017. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(30): E6089-E6096. doi: 10.1073/pnas.1704949114.
- Coleman, C.O. 2015. Taxonomy of the taxonomic impediment - Examples from the community of experts on amphipod crustaceans. *Journal of Crustacean Biology* 35:729-740. doi: 10.1163/1937240X-00002381.
- Dayrat, B. 2005. Towards integrative taxonomy. *Biological Journal of the Linnean Society* 85:407-415. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1095-8312.2005.00503.x/pdf>
- Dejean, T., A. Valentini, C. Miquel, P. Taberlet, E. Bellemain y C. Miaud 2012. Improved detection of an alien invasive species through environmental DNA barcoding: the example of the American bullfrog *Lithobates catesbeianus*. *Journal of Applied Ecology* 49:953-959. doi: 10.1111/j.1365-2664.2012.02171. x.
- DeSalle, R., G. Giribert, y W. Wheeler (Eds.). 2002. *Molecular Systematics and evolution: theory and practice*. Boston; Berlin: Birkhäuser, 309 pp. doi: 10.1007/978-3-0348-8114-2.
- Dirzo, R., H.S. Young, M. Galetti, G. Ceballos, N.J.B. Isaac y B. Collen. 2014. Defaunation in the Anthropocene. *Science* 345 (6195):401-406 doi: 10.1126/science.1251817.
- Ebach, M.C., A.G. Valdecasas y Q.D. Wheeler. 2011. Impediments to taxonomy and users of taxonomy: accessibility and impact evaluation. *Cladistics* 27:550-557. doi:10.1111/j.1096-0031.2011.00348. x.
- Fontaine, B. (+ 50 coautores). 2012. New species in the Old World: Europe as a frontier in biodiversity exploration, a test bed for 21st Century taxonomy. *PLoS ONE* 7(5): e36881, 7 pp. doi:10.1371/journal.pone.003688.
- Haas, W., F. Krausmann, D. Wiedenhofer y M. Heinz. 2015. How circular is the Global Economy? *Journal of Industrial Ecology* 19(5):765-777. doi: 10.1111/jiec.12244.
- Hambler, C. y M.R. Speight. 1996. Extinction rates in British nonmarine invertebrates since 1900. *Conservation Biology* 10:892-896. doi: 10.1046/j.1523-1739.1996.10030892.x
- Hebert, P.D.N. y T.R. Gregory. 2005. The promise of DNA barcoding for taxonomy. *Systematic Biology* 54:852-859. doi: 10.1080/1063515050035488.
- Hebert P.D.N., S. Ratnasingham, E.V. Zakharov, A.C. Telfer, V. Levesque-Beaudin, M.A. Milton, S. Pedersen, P. Jannetta y J.R. deWaard. 2016. Counting animal species with DNA barcodes: Canadian insects. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B* 371:20150333, 10 pp. doi: 10.1098/rstb.2015.0333.
- Hubert, N. y R. Hanner. 2015. DNA barcoding, species delineation and taxonomy: a historical perspective. *DNA Barcodes* 3:44-58. doi:10.1515/dna-2015-0006.
- Larsen, B.B., E.C. Miller, M. Rhodes y J.J. Wiens. 2017. Inordinate fondness multiplied and redistributed: the number of species on Earth and the new pie of life. *The Quarterly Review of Biology* 92(3):229-265. <https://doi.org/10.1086/693564>.
- Luna-Plascencia, R., A. Castañón-Barrientos y A. Raz-Guzmán. 2011. La biodiversidad en México: su conservación y las colecciones biológicas. *Ciencias* 101:36-43. <http://www.revistaciencias.unam.mx/images/stories/Articles/101/A4/CNS101A04.pdf>
- Martínez-Meyer, E., J.E. Sosa-Escalante y F. Álvarez. 2014. El estudio de la biodiversidad en México: ¿Una ruta con dirección? *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85(Suplemento):1-9. doi: 10.7550/rmb.43248.

- May, R.M. 2011. Why worry about how many species and their loss? *PLoS Biology* 9(8): e1001130. doi: 10.1371/journal.pbio.1001130.
- McCauley, D.J., M.L. Pinsky, S.R. Palumbi, J.A. Estes, F.H. Joyce y R.R. Warner. 2015. Marine defaunation: Animal loss in the global ocean. *Science* 347(6219): 247-1255641-7. doi: 10.1126/science.1255641.
- Mora, C., D.P. Tittensor, S. Adl, A.G.B. Simpson y B. Worm. 2011. How many species are there on Earth and in the ocean? *PLoS Biology* 9(8): e1001127, 8 pp. doi: 10.1371/journal.pbio.1001127.
- Noss, R.F., 1990. Indicators for monitoring biodiversity: A hierarchical approach. *Conservation Biology* 4:355-364. doi: 10.1111/j.1523-1739.1990.tb00309. x.
- Pante, E., C. Schoelink y N. Puillandre. 2015. From integrative taxonomy to species description: One step beyond. *Systematic Biology* 64:152-160. doi:10.1093/sysbio/syu083.
- Papavero, N. y J. Llorente (Eds). 1993-1996. *Principia Taxonomica*. Facultad Ciencias, UNAM, México, 7 vols.
- Payne, J.L., A.M. Bush, N.A. Heim, M.L. Knope y D.J. McCauley. 2016. Ecological selectivity of the emerging mass extinction in the oceans. *Science* 353:1284-1286. <http://science.sciencemag.org/content/sci/353/6305/1284.full.pdf>.
- Salazar-Vallejo, S.I., E. Escobar-Briones, N.E. González, E. Suárez-Morales, F. Álvarez, J.A. de León-González y M.E. Hendrickx. 2007. Iniciativa mexicana en taxonomía: biota marina y costera. *Ciencia y Mar* 11:69-77.
- Salazar-Vallejo, S.I. y N.E. González. 1993. Panorama y fundamentos para un programa nacional. Pp 6-38. En: Salazar-Vallejo, S.I. y González, N.E. (Eds.). *Biodiversidad Marina y Costera de México*. CONABIO y CIQRO, México, 865 pp.
- Salazar-Vallejo, S.I., N.E. González y E. Schwindt. 2008. Taxonomía de invertebrados marinos: Necesidades en Latinoamérica. *Interciencia* 33:510-517.
- Salazar-Vallejo, S.I. y N.E. González. 2016. Crisis múltiples en taxonomía, implicaciones para la biodiversidad y recomendaciones para mejorar la situación. *Códice, Boletín Científico y Cultural del Museo Universitario, Universidad de Antioquia* 17:42-56. [https://issuu.com/muua/docs/c\\_dice\\_29\\_web](https://issuu.com/muua/docs/c_dice_29_web).
- Schmitter-Soto, J.J. 2002. La Ictiología según la SIMAC: 1987-2000. VIII Congreso Nacional de Ictiología, Universidad del Mar/Sociedad Ictiológica Mexicana, Puerto Ángel, Oaxaca.
- Simmons, J. E y Y. Muñoz-Saba (Eds.). 2005. *Cuidado, manejo y conservación de las colecciones Biológicas*. Bogotá, D. C. Colombia. 288 pp. ISBN958-33-6969-1
- Steven, W. (+27 coautores). 2016. Stratigraphic and Earth system approaches to defining the Anthropocene. *Earth's Future* 4, 22 pp. doi: 10.1002/2016EF000379.
- Sukumaran, S. y A. Gopalakrishnan. 2015. Integrative taxonomy: Methods and applications. Pp 162-163. En: Gopalakrishnan, A. (Ed.). *Summer School on Recent Advances in Marine Biodiversity Conservation and Management*. Indian Council for Agricultural Research, Central Marine Fisheries Research Institute, Kerala, Lecture Note Series 1:1-272. [http://eprints.cmfri.org.in/10428/1/23\\_Sandhya\\_Sukumaran2.pdf](http://eprints.cmfri.org.in/10428/1/23_Sandhya_Sukumaran2.pdf)
- Vellend, M., L. Baeten, A. Becker-Scarpitta, V. Boucher-Lalonde, J.L. McCune, J. Messier, I.H. Myers-Smith y D.F. Sax. 2017. Plant Biodiversity change across scales during the Anthropocene. *Annual Review of Plant Biology* 68:563-586. doi:org/10.1146/annurev-arplant-042916-040949.
- Wackernagel, M., N.B. Schulz, D. Deumling, A.C. Linares, M. Jenkins, V. Kapos, C. Monfreda, J. Loh, N. Myers, R. Norgaard y J. Randers. 2002. Tracking the ecological overshoot of the human economy. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(14):9266-9271. doi:10.1073/pnas.142033699.
- Will, K.W., B.D. Mishler y Q.D. Wheeler. 2005. The perils of DNA barcoding and the need for integrative taxonomy. *Systematic Biology* 54:844-851. doi: 10.1080/10635150500354878.
- Wilson, E.O. (Ed.) 1988. *Biodiversity*. National Academies Press, Washington, 538 pp.

# LAS ENFERMEDADES EMERGENTES TRANSMITIDAS POR VECTORES: PALUDISMO, DENGUE, CHIKUNGUNYA Y ZIKA

Carlos Roberto Alfaro-Martínez<sup>1</sup>, Daniel Rafael Saldaña-Torres<sup>2</sup>, Miguel Guadalupe Godínez-Ríos<sup>3</sup>, Julio Cesar Verde-Millán<sup>3</sup>, Gerardo de Jesús Trujillo-Rodríguez<sup>2</sup>, Martha Patricia López-Rodríguez<sup>2</sup>, Laura Elia Martínez-de-Villarreal<sup>4</sup>, Adriana Elizabeth Flores-Suarez<sup>2</sup>, Gustavo Ponce-García<sup>2</sup>, Irám Pablo Rodríguez-Sánchez<sup>4</sup>, \*

---

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Químicas, Carretera Puerto Madero Km 1.5 Tapachula, Chiapas, México. roberto\_martinez\_ca07@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas, San Nicolás de Los Garza, Nuevo León, México. gponcealfa@gmail.com, adrflores@gmail.com, danielixdaniel09@gmail.com, martha.fcb@gmail.com, entogerry36@gmail.com

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Sinaloa, Calle Josefa Ortiz de Domínguez S/N Cd Universitaria, 80040 Culiacán Rosales, Sinaloa, México. mike\_300896@outlook.com, julio13sol@hotmail.com

<sup>4</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Departamento de Genética, Hospital Universitario "Dr. José Eleuterio González", Monterrey, Nuevo León, México. laelmar@yahoo.com, iramrodriguez@gmail.com

**\*Autor de correspondencia:**

Irám Pablo Rodríguez-Sánchez  
Departamento de Genética, Hospital Universitario "Dr. José Eleuterio González".  
Av. Gonzalitos s/n, Colonia Mitras Centro, Monterrey.  
Nuevo León 64460, México.  
Tel.: +52 81 83294217  
E-mail: iramrodriguez@gmail.com





**Palabras clave: Vector,  
zoonosis, arbovirus**

## RESUMEN

Vectors are animals that transmit pathogens, including parasites, from one person (or animal) infected to another one and they cause serious diseases in humans. These emerging and re-emerging diseases represent a serious public health problem. WHO collaborates with partners to disseminate knowledge and raise awareness so that people know how to protect themselves and their communities against these vectors. To date, diseases such as Dengue, Malaria, Chikungunya, and Zika continue to affect a large part of the world population, so it is important to have knowledge about the generalities of these diseases as well as how to identify and avoid them.

## INTRODUCCIÓN

Los vectores son animales que transmiten patógenos, entre ellos parásitos, de una persona (o animal) infectada a otra y ocasionan enfermedades graves en el ser humano. Estas enfermedades emergentes y re-emergentes representan un grave problema de salud pública en regiones tropicales y subtropicales, donde gran parte de la población está en riesgo. Los países de escasos recursos son, particularmente, vulnerables al impacto social y económico de estas enfermedades, debido a los recursos limitados en el sector de salud pública para el manejo y prevención de estos padecimientos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) colabora con asociados a fin de difundir conocimientos y sensibilizar a la población para que las personas sepan cómo protegerse a sí mismas y protejan a sus comunidades contra los mosquitos, garrapatas, chinches, moscas y otros vectores. Además, como estrategia secundaria la OMS establece programas de control de las enfermedades en los que se utilizan medicamentos donados o subvencionados (OMS, 2017).

Una de las enfermedades más importantes transmitida por vector, y que hoy en día mantiene un impacto considerable, es el dengue. El conocimiento de la población en general, para este tipo de padecimientos, se limita a que alguna vez han escuchado sobre la enfermedad; así mismo, más de la mitad conocen la principal forma de transmisión a través de la picadura de un mosquito infectado e identifican a la fiebre como el síntoma más frecuente de la enfermedad. Tienen el conocimiento general sobre las principales medidas preventivas en el hogar, por ejemplo, evitar la acumulación de agua en recipientes. Además, identifican los medicamentos que pueden utilizarse para mitigar los síntomas.

Existen evidencias de que la variabilidad climática tiene influencia en la epidemiología de las enfermedades transmitidas por vectores. Tanto que ha sido evaluada a nivel continental para determinar las posibles consecuencias del futuro cambio climático esperado. Para el año 2100 se estima que las temperaturas globales promedio habrán aumentado entre 1.0 y 3.5 °C, lo que incrementa la probabilidad de que las enfermedades transmitidas por vectores se expandan en nuevas áreas.

La malaria es otra enfermedad transmitida por insectos vectores en zonas tropicales y subtropicales. Por su parte, la enfermedad de Lyme es la enfermedad vector-transmitida más común en los EEUU y Europa. La encefalitis también se está convirtiendo en un problema de salud pública. Los riesgos para la salud debido a los cambios climáticos serían diferentes entre los países que han desarrollado infraestructuras sanitarias y los que no lo han hecho. Los patrones de asentamientos humanos en las diferentes regiones influyen de manera importante en las tendencias de estas enfermedades (Githeko, 2000).

# ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR VECTOR EN MEXICO

## PALUDISMO

Actualmente, en México, la incidencia de paludismo continua disminuyendo, mientras que en el resto del mundo esta re-emergiendo y por lo que la OMS ubica a este padecimiento como prioridad mundial. El paludismo es considerado por los expertos internacionales como de menor relevancia, debido a su ubicación geográfica y a su avance en el control e innovación de sus acciones. La mayoría de los casos son producidos por *Plasmodium vivax* y por *Plasmodium falciparum* en la frontera sur; también existen casos importados de diferentes continentes, los cuales con frecuencia presentan resistencia a los medicamentos utilizados en el país. El ciclo de vida del *plasmodium* se divide en asexual en el humano y sexual en el mosquito *Anopheles* hembra. (Arias, A. 2009). (Figura 1).

A pesar de los señalamientos internacionales, la receptividad para desarrollar brotes es alta. En los años sesenta se registraron 174,497 casos de paludismo y para los setenta fueron detectados 285,322 casos. Sin embargo, en la década de los ochenta fueron diagnosticados 874,340 casos, casi el total de casos registrados en un año en América. En los años noventa se necesitó un gran esfuerzo para volver a llevar al paludismo a niveles de prioridad y se logró descender a 171,236 casos. En el decenio 1990-1999, comparado con la región de Centro América, la tasa de morbilidad en México tuvo una tendencia descendente, menor a uno por 100 mil habitantes.

En 1981 se diseñó el Tratamiento de Dosis Única (TDU) en Tapachula, Chiapas, controlando la endemia y eliminando la transmisión de *Plasmodium falciparum*. La dosis única ha sido recomendada por la OMS, pero en México, su utilización se ha adecuado, primero, a evitar más casos en las familias; segundo, la dosis consiste en un incremento de primaquina (medicamento antirecaídas), con lo cual se tiene la posibilidad de evitar las recaídas o fracasos de los tratamientos tradicionales; tercero, en Sinaloa se ha encontrado que los enfermos que

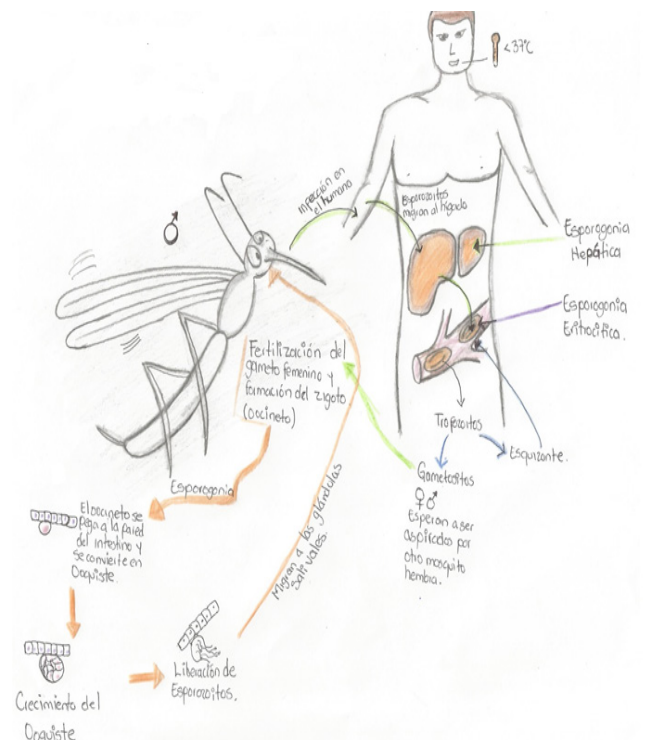


Figura 1. Ciclo biológico del plasmodium.

reciben el tratamiento después de 30 días del inicio de la enfermedad presentan un mayor número de recaídas; y cuarto, las infecciones pueden persistir hasta por tres años, sintomáticas o asintomáticas. Para optimizar los recursos del Programa se considera tratar a los casos asintomáticos que no detecta el sistema, evitar familias con varios enfermos y administrar un tratamiento oportuno del TDU 3x3x3 (SSA, 2001).

## DENGUE

La enfermedad del virus del dengue se transmite por los mosquitos vectores, *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*, y se ha propagado por todas las regiones tropicales del mundo en los últimos años. Según estimaciones recientes, se producen 390 millones de infecciones de dengue cada año, de las cuales 96 millones se manifiestan clínicamente. En décadas anteriores, solo 9 países reportaban casos de dengue, ahora la enfermedad es endémica en más de 100 países. El número de casos aumenta a medida que la enfermedad se propaga a nuevas zonas. En este año hasta la fecha se han reportado 50,172 casos positivos a dengue en los países del continente Americano (OMS, 2017).

Se debe sospechar que una persona padece dengue cuando una fiebre elevada (40 °C) se acompaña de dos de los síntomas siguientes: dolor de cabeza muy intenso, dolor detrás de los globos oculares, dolores musculares y articulares, náuseas, vómitos, agrandamiento de ganglios linfáticos o salpullido. Los síntomas se presentan al cabo de un periodo de incubación de 4 a 10 días después de la picadura de un mosquito infectado y, por lo común, duran entre 2 y 7 días.

El dengue es una enfermedad de tipo gripal que afecta a bebés, niños pequeños y adultos, pero raras veces resulta mortal. No obstante, el dengue grave es una complicación potencialmente mortal porque cursa con extravasación de plasma, acumulación de líquidos, dificultad respiratoria, hemorragias graves o falla orgánica. Los signos que advierten de esta complicación se presentan entre 3 y 7 días después de los primeros síntomas y se acompañan de un descenso de la temperatura corporal (menos de 38 °C), tales signos incluyen dolor abdominal intenso, vómitos persistentes, respiración acelerada, hemorragias de las encías, fatiga, inquietud y presencia de sangre en el vómito (Figura 6). Las siguientes 24 a 48 h de la etapa crítica pueden ser letales; hay que brindar atención médica para evitar otras complicaciones y disminuir el riesgo de muerte. Entre finales de 2015 y principios de 2016 se aprobó en varios países el uso de la primera vacuna contra el dengue —Dengvaxia (CYD-TDV), de Sanofi Pasteur— en personas de 9 a 45 años residentes en zonas endémicas. La OMS recomienda que los países

consideren la posibilidad de introducir la vacuna CYD-TDV contra el dengue solo en entornos geográficos en los que los datos epidemiológicos indiquen que hay una gran carga de enfermedad. Las recomendaciones completas pueden consultarse en el documento de posición de la OMS sobre la vacuna contra el dengue.

El vector principal del dengue en México es el mosquito *Aedes aegypti*. El virus se transmite a los seres humanos por la picadura de mosquitos hembra infectados. Tras un periodo de incubación del virus que dura entre 4 y 10 días, un mosquito infectado puede transmitir el agente patógeno durante toda la vida (Figura 2).

Los factores que favorecen el contagio del virus son por carencias en la higiene doméstica y deficiencias en los servicios de distribución de agua entubada y recolección de basuras, al favorecer sitios de reproducción de los vectores (Figura 3). Las acciones para el control del vector deben ser más estrictas para lograr la eliminación de larvas del vector (mosquito), ya que cualquier incremento de este vector se traducirá en riesgos de mayor trascendencia. También por eso es necesaria la transferencia de responsabilidades a la comunidad y a los municipios.



Figura 3. Medidas de prevención contra Dengue.



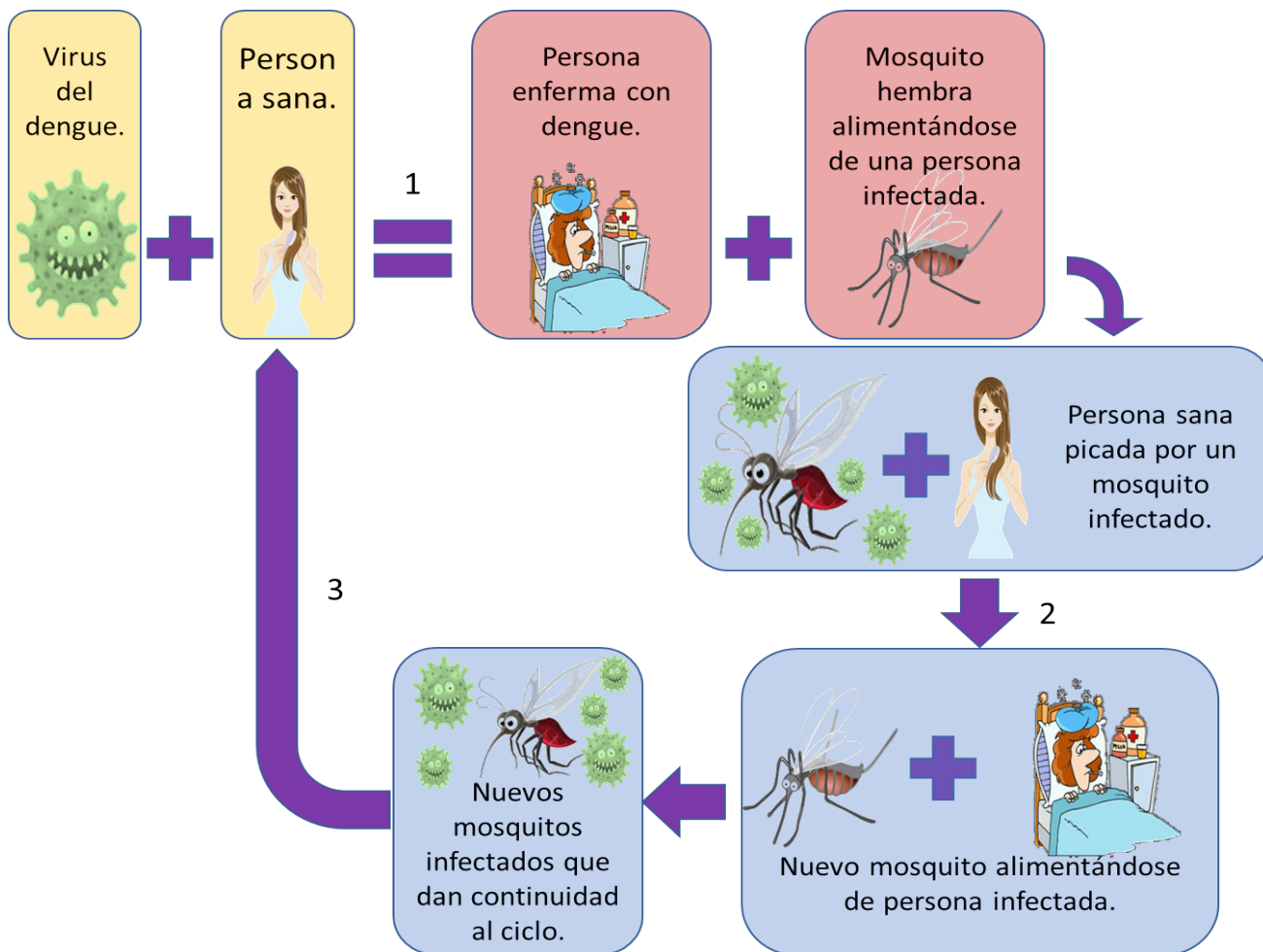


Figura 2. Ciclo de transmisión del virus dengue.

## VIRUS DE CHIKUNGUNYA

El virus Chikungunya es un arbovirus miembro del género Alphavirus, perteneciente a la familia Togaviridae causante de la fiebre Chikungunya. El primer reporte se generó en Tanzania en el año 1952 y desde entonces ha sido atribuido a brotes en muchos países; geográficamente está distribuido en África, sur de Asia e India. Desde que se reportó un brote en Bangkok (Tailandia), en 1958, se han registrado otros en Camboya, Vietnam, Laos, Myanmar, Malasia, Filipinas e Indonesia. Desde enero de 2005 países en el océano Índico están enfrentando brotes de chikungunya, más de un millón de casos han sido reportados (Lahariya y Pradhan, 2006). Antes de los casos en San Martín,

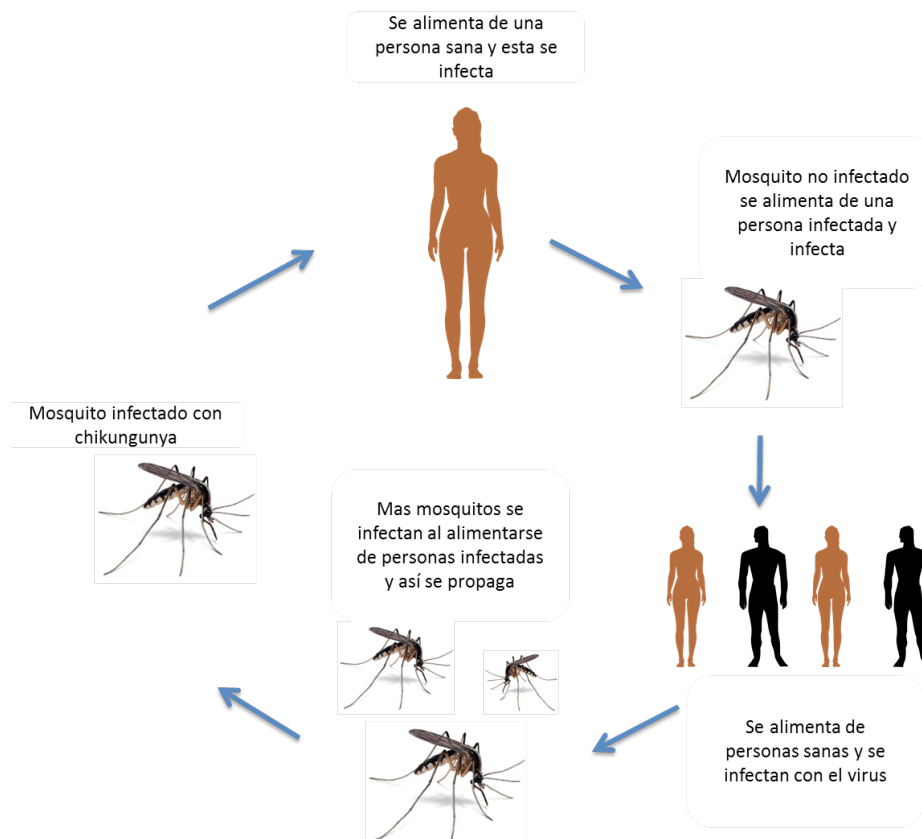
los únicos casos que se encontraban en América era de viajeros o de áreas endémicas conocidas. Ninguno de estos casos resultó de brotes o transmisión local (Fischer, D. 2013). En diciembre de 2013 se reportó la primera transmisión local en el hemisferio occidental con casos autóctonos identificados en San Martín, a partir de ahí se han identificado en 17 países en el territorio caribeño y sudamericano. Para el 30 de mayo del 2014 ya se sospechaba de 103,018 casos y 4406 estaban confirmados por pruebas de laboratorio. Más del 95% de los casos reportados pertenecían a República Dominicana (38,656), Martinica (30,715), Guadalupe (24,428), Haití (6,318) y San Martín (4,113). El primer caso reportado en México fue en mayo del 2014 y se dio en una mujer de 39 años de edad con antecedentes

de viaje al caribe, quien regreso a la Ciudad de México presentando los síntomas pero fue en el estado de Jalisco donde se presentó la mayor parte de la sintomatología (Rivera-Ávila, 2014) (Figura 6).

La enfermedad causada por el virus Chikungunya se divide en aguda, sub-aguda y crónica. La fase aguda dura de 3-10 días con artralgia en el 87% de los casos, dolor de espalda en 67% de los casos y cefalea en el 62% de los casos. Los síntomas desaparecen de 1-3 semanas, sin embargo algunos pacientes pueden sufrir una recaída de los síntomas reumatológicos en los meses después de la enfermedad aguda. La fase sub-aguda dura de 11-90 días y se presentan recaídas clínicas en el segundo y tercer mes con artralgias inflamatorias persistentes en el carpo y metacarpo, falángicas múltiples, alteraciones vasculares periféricas, fatiga y depresión. La fase crónica dura más de 90 días con la presencia de los síntomas.

Hasta ahora no existe un tratamiento farmacológico antiviral, sin embargo, se recomienda el tratamiento sintomático luego de excluir enfermedades graves como malaria, dengue e infecciones bacterianas. Se indica reposo y el uso de acetomifen o paracetamol, para el alivio de la fiebre, e ibuprofeno, naproxeno o algún otro agente antiinflamatorio no esteroideo para aliviar el componente artrítico de la enfermedad (Martínez, L. 2015).

El virus chikungunya es transmitido a los humanos por la picadura de mosquitos. Los mosquitos se infectan cuando se alimentan de una persona que ya está infectada con el virus. Los mosquitos infectados esparcen el virus a otras personas mediante la picadura (Figura 4). El virus es principalmente transmitido por los mosquitos *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*, siendo los mismos mosquitos que transmiten el virus del dengue (Rivera-Ávila, R. C. 2014).



**Figura 4.** Ciclo de transmisión del virus Chikungunya.



## VIRUS ZIKA

El virus del zika (ZIKV) es un arbovirus emergente transmitido por mosquitos *Aedes*. Este virus pertenece al género flavivirus y es relacionado con otros flavivirus relevantes de salud pública como dengue (DENV), fiebre amarilla y Virus del oeste del Nilo (Zanluca et al., 2015).

Fue inicialmente aislado el 18 de abril de 1947 en un mono Rhesus en el bosque Zika, en Uganda. Este mono era un animal centinela de un programa para el estudio de fiebre amarilla. A inicios de 1948, el ZIKV había sido aislado en mosquitos *Aedes africanus* del mismo bosque. El ZIKV fue aislado en humanos en Nigeria en el año 1968. De 1951 a 1981 se obtuvo evidencia serológica de infecciones por ZIKV en otros países como Uganda, Tanzania, Egipto, República Centroafricana, Sierra Leona, así también como en regiones de Asia, entre las cuales se menciona India, Malasia, Filipinas, Tailandia, Vietnam e Indonesia (Hayes, 2009) Los casos anteriores fueron reportados esporádicamente, no fue hasta el 2007 que se reportó el primer brote de ZIKV en la isla de Yap en Estados Federados de Micronesia, el 70% de la población mayor a 3 años se estimó que estuvo infectada (Hennessey et al., 2016). En el 2013 una gran epidemia fue reportada en la Polinesia francesa combinada con una epidemia de dengue causada por los serotipos 1 y 3 (Zanluca et al., 2015). En mayo de 2015 la OMS reportó la primera transmisión local de Zika en América con casos autóctonos identificados en Brasil. En noviembre de 2015 se reportó el primer caso autóctono en el estado de Chiapas, a partir de este se fueron reportando en diferentes estados de la república (Guerbois, M. 2016)

Para febrero del 2016 en México la Secretaría de Salud reporto confirmados 160 casos autóctonos de

Zika en los estados de Chiapas, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Nuevo León, Oaxaca, Sinaloa, Veracruz y Yucatán, así como 4 casos importados. Se reportan entre ellos 30 casos de mujeres embarazadas principalmente en Chiapas (Sánchez-González et al., 2016).

Las manifestaciones clínicas más comunes de la enfermedad son fiebre leve (menor a 38.5°C), conjuntivitis no purulenta, artritis o artralgias transitorias (principalmente en articulaciones pequeñas de manos y pies), mialgias, astenia, cefalea y exantema maculopapular que inicia en cara y se disemina al resto del cuerpo. En general los síntomas son leves y de corta duración (Tabla 1). Las complicaciones neurológicas, como síndrome de Guillan Barré y meningoencefalitis, y autoinmunes, como purpura trombocitopenica y leucopenia, han sido descritas en la Polinesia Francesa y, recientemente, en Brasil. Una de cada cuatro personas que son picadas por un mosquito infectado no desarrolla síntomas de la enfermedad.

Este virus se transmite principalmente por los mosquitos *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus* infectados por el virus, estos se infectan cuando se alimentan de personas que ya están infectadas, posteriormente estos mosquitos infectados se alimentan de personas no infectadas a las que contagian y, por último, mosquitos no infectados se alimentan de estas personas y el ciclo de infección se lleva a cabo. Aunado a esto, existen otros modos de transmisión son: la vía transplacentaria, por transfusión sanguínea y transmisión sexual (Figura 5).

Las estrategias para la prevención y control de la enfermedad causada por el virus Zika debe considerar el uso de repelentes de insectos y el control de mosquitos (loos, 2014).



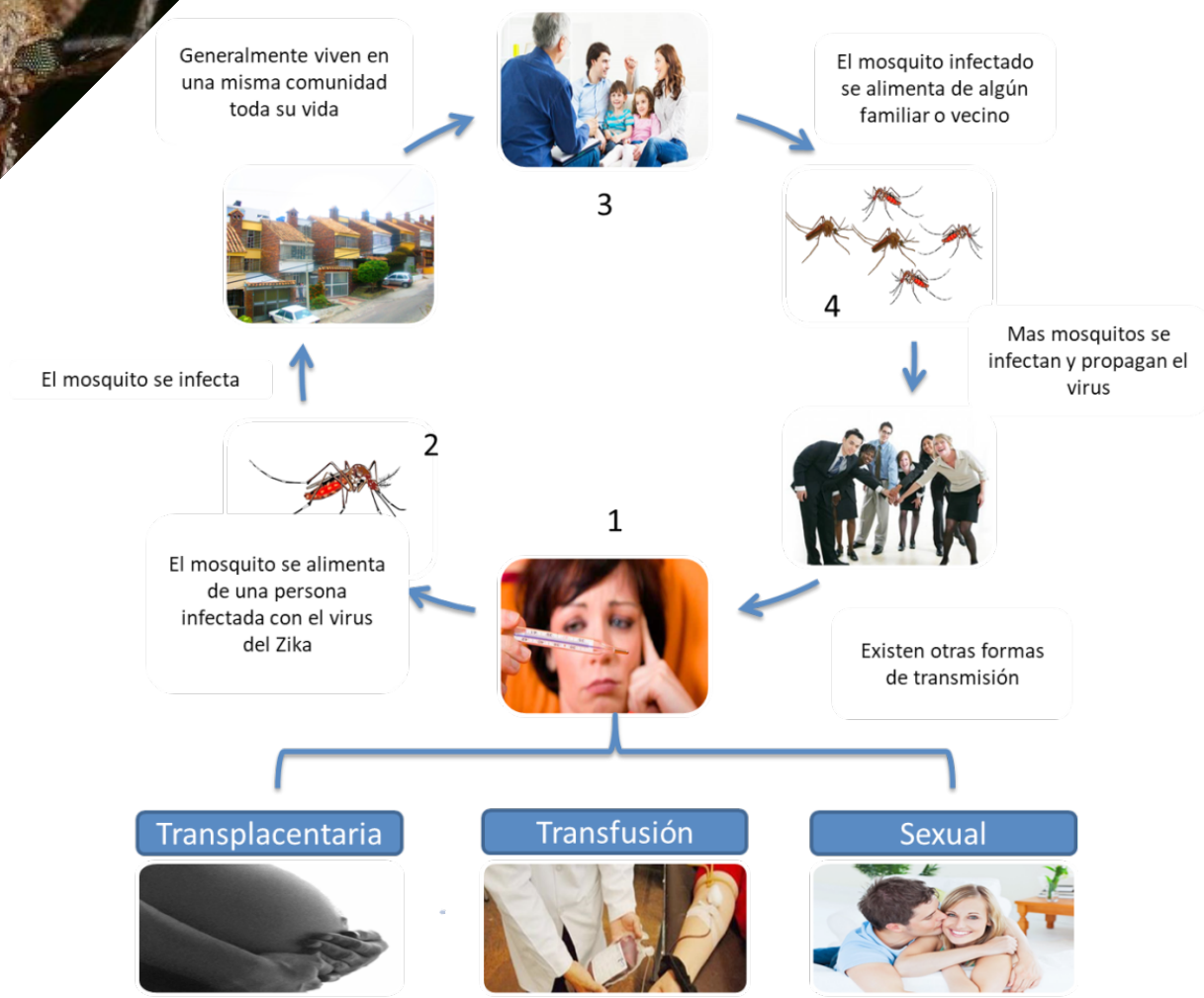
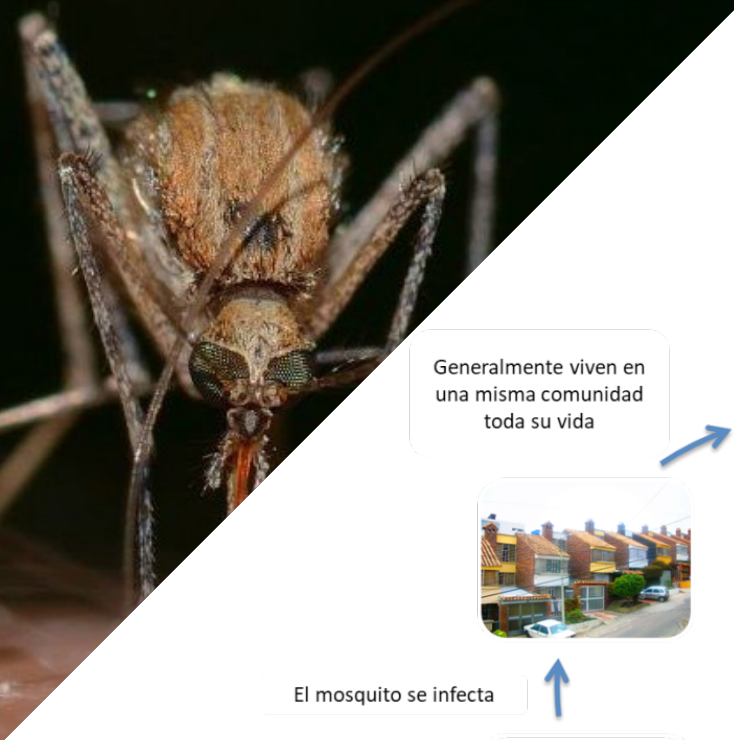
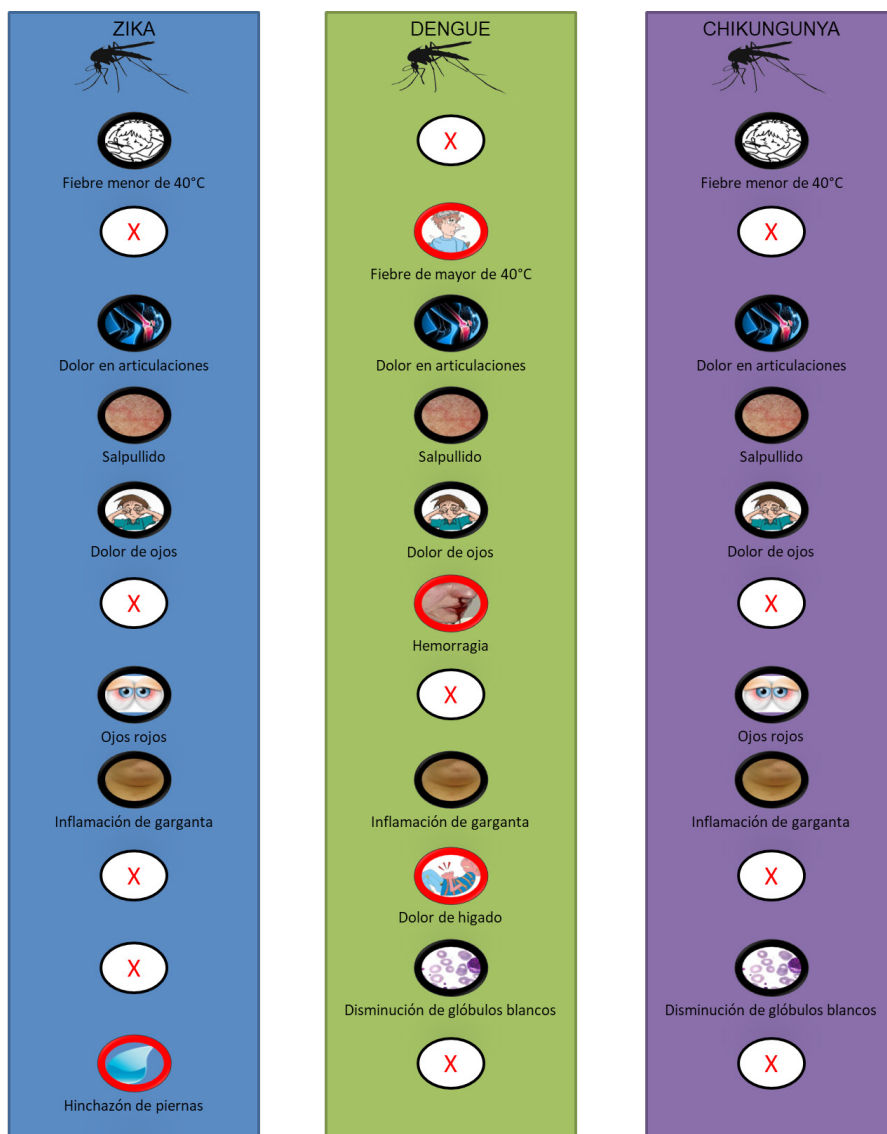


Figura 5. Ciclo de transmisión de la enfermedad del virus del zika

Tabla 1. Comparación de las manifestaciones clínicas de las enfermedades causadas por arbovirus.

	DENV	CHIKV	ZIKV
Fiebre	++++	+++	+++
Mialgia/Artralgia	+++	++++	++ ↓
Edema en extremidades	0	0	++ ↑
Rash maculopapular	++	++	+++ ↑
Dolor retro-orbital	++	+	++
Conjuntivitis	0	+	+++ ↑
Linfoadenopatias	++	++	+ ↓
Hepatomegalia	0	+++	0
Leucopenia/ Trombocitopenia	+++	+++	0
Hemorragia	+	0	0

SINTOMATOLOGIA



**Figura 6.** Sintomatología presentada en las enfermedades zika, dengue y chikungunya.

CONCLUSIONES

La Organización Mundial de la Salud (OMS), establece que el cambio climático es un factor importante en el brote de las enfermedades transmitidas por vector. Los cambios de temperatura propician la abundancia de mosquitos en las zonas tropicales. Teniendo conocimiento de los cambios climáticos y el ciclo biológico de los vectores, se pueden proponer estrategias de control donde se ataque a los vectores en etapas tempranas de su maduración.

De acuerdo con esta revisión, se conoce que los brotes de estas enfermedades se dan principalmente en los trópicos debido a que presentan temperaturas más cálidas, lo cual permite la propagación de los mosquitos, ya que el clima es óptimo para su supervivencia. Los tratamientos para estas arbovirosis generalmente son fármacos para mitigar el malestar, sin embargo no se controla el agente causal. Existen tratamientos alternativos generalmente usados por personas que viven en zonas rurales, un ejemplo de esto es la herbolaria, sin embargo hay carencia de información precisa sobre las plantas utilizadas. Se espera que para los siguientes años estos virus sean analizados de acuerdo a su genoma y así poder determinar las variantes de los virus motivando el desarrollo der vacunas.



## LITERATURA CITADA

Fernandez-Cristina 2015. Virus Zika. Revista clínica hospital san juan de Dios. Volumen 5 numero 6.

Fischer, D., Thomas, S. M., Suk, J. E., Sudre, B., Hess, A., Tjaden, N. B. y Semenza, J. C. 2013. Climate change effects on Chikungunya transmission in Europe: geospatial analysis of vector's climatic suitability and virus' temperature requirements. *International journal of health geographics*, 12(1), 1.

Githeko, A.K, Lindsay, S.W, Confalonieri, U.E, y Patz, J.A. 2000. Cambio climático y enfermedades transmitidas por vectores: un análisis regional. *Boletín de la Organización Mundial de la Salud*, 78 (9), 1136-1147.

Guerbois, M., Fernandez-Salas, I., Azar, S. R., Danis-Lozano, R., Alpuche-Aranda, C. M., Leal, G.,... y Del Río-Galván, S. L. 2016. Outbreak of Zika virus infection, Chiapas State, Mexico, 2015, and first confirmed transmission by *Aedes aegypti* mosquitoes in the Americas. *Journal of Infectious Diseases*, jiw302.

Hayes, E. B 2009. Zika virus outside Africa. *Emerging infectious diseases*, 15(9), 1347.

Hennessey, M., Fischer, M., y Staples, J. E. 2016. Zika virus spreads to new areas—region of the Americas, May 2015–January 2016. *American Journal of Transplantation*, 16(3), 1031-1034.

Ioos S, Mallet HP, Leparac Goffart I, Gauthier V, Cardoso T., Herida. M. 2014. Corriente Epidemiología del virus Zika y epidemias recientes. *Med Mal Infect.* 2014 Jul; 44 (7): 302 - 307. doi: 10.1016 / j.medmal.2014.04.008. Epub 2014 Jul 4. PubMed PMID: 25001879.

Lahariya, C., y Pradhan, S. K. 2006. Emergence of chikungunya virus in Indian subcontinent after 32 years: a review. *Journal of vector borne diseases*, 43(4), 151.

Martinez, L., Torrado, Y 2015. Fiebre Chikungunya. *Revista Cubana de Medicina*. 54(1): 74-96.

Rivera-Ávila, R. C. 2014. Fiebre chikungunya en México: caso confirmado y apuntes para la respuesta epidemiológica. *Salud Pública de México*, 56(4), 402-404.

Secretaria de Salud México (2001) Programa de acción: Enfermedades transmitidas por vector. Primera edición 2001-2006

Sánchez-González, J. M., Ramos-Remus, C., Jácome-Sánchez, B., García-Ortiz, R., Flores-Ramos, J., y Hernández, F. S. 2016. Virus Zika en México. *Revista Latinoamericana de Patología Clínica y Medicina de Laboratorio*, 63(1), 4-12.

Zanluca, C., Melo, V. C. A. D., Mosimann, A. L. P., Santos, G. I. V. D., Santos, C. N. D. D., y Luz, K. 2015. First report of autochthonous transmission of Zika virus in Brazil. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 110(4), 569-572.

Arias, A., Soto, M. 2009. Malaria. *Revista médica de costa rica y centro america* LXVI(587), 89-93.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

<http://www.who.int/csr/disease/zika/en/> (Consultado en 20/07/2017)

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs387/en/> (Consultado en 18/08/2017)

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs117/en/> (Consultado en 05/08/2017)

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs327/en/> (Consultado en 17/07/2017)





# LAS RADIACIONES Y EL AMBIENTE

Heredia-Rojas, J.A.<sup>1</sup>, O. Heredia-Rodríguez<sup>1</sup>, A. O. Rodríguez de la Fuente<sup>\*1</sup>, L. E. Rodríguez-Flores<sup>2</sup>, M. A. Santoyo-Stephano<sup>1</sup> y E. Castañeda-Garza<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias Exactas y Desarrollo Humano, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.

<sup>2</sup>Departamento de Patología, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Nuevo León \*Autor de correspondencia: [abraham.rodriguezdz@uanl.edu.mx](mailto:abraham.rodriguezdz@uanl.edu.mx)



**Palabras clave: Radioecología,  
radiaciones ionizantes,  
radiaciones no-ionizantes,  
Radiobiología.**

## RESUMEN

El advenimiento de la era nuclear, aunado al desarrollo de diversas tecnologías sobre todo en lo referente a telecomunicaciones, ha producido un incremento generalizado de diversos tipos de radiaciones en nuestro ambiente. Además, el ya conocido decremento de la capa de ozono, provoca cambios tan rápidos en el entorno radiológico que no hay a la fecha suficientes estudios que demuestren concluyentemente el potencial riesgo que estas radiaciones representan para los seres vivos. Las Ciencias Biológicas han llegado a tal grado de especialización, que actualmente existe una rama de la Ecología, la así llamada "Radioecología" que se ocupa del estudio del impacto de la energía provocada por diversos tipos de radiaciones en los ecosistemas. En el presente artículo, presentamos información con objeto de mostrar una panorámica acerca de la influencia de las radiaciones en los organismos y su ambiente. Basándonos en estudios recopilados de la literatura, e investigaciones llevadas a cabo en nuestro laboratorio, se tratarán de manera general las consecuencias que tiene el incremento de la cantidad de radiación en la biósfera.

## INTRODUCCIÓN

La radiación es un factor físico del ecosistema que ha estado presente desde la formación del planeta. Los sistemas biológicos han desarrollado una variedad de mecanismos adaptativos que han permitido la supervivencia de las especies frente a la exposición a esta radiación de origen natural (Møller y Mousseau, 2013). Por otro lado, actualmente existe una diversidad de fuentes de radiación no natural derivada de la actividad humana. La presencia de esta radiación antropogénica ha planteado la pregunta: ¿Hasta qué punto los organismos podrán adaptarse a los cambios que estas radiaciones producen en la fisiología celular?

Toda radiación produce un efecto al ser absorbida por los materiales, aparentemente no dañino en el momento. Sin embargo, la segunda ley de la termodinámica establece que cualquier cantidad de energía que ingresa a un sistema trae consigo un aumento en el desorden (entropía) del mismo, lo que conduce a una disminución en la energía libre necesaria para todas las funciones biológicas (Bor-Sen et al., 2015).

Actualmente, hay estudios que indican el deterioro de una variedad de especies biológicas que se atribuye a la excesiva carga energética provocada por diversas clases de radiaciones (Jeggio y Lobrich, 2006). Un problema adicional, radica en el hecho de que la mayoría de las radiaciones no son sensorialmente perceptibles por el ser humano, es decir, son cantidades físicas a las que nuestros sentidos no responden y solamente con instrumental especializado podemos detectar su presencia.

Dado lo anterior, decidimos presentar en este artículo una panorámica general del impacto ecológico de diversos tipos de radiaciones, desde las de alta carga energética, producto del decaimiento radiactivo, hasta aquéllas que portan una cantidad muy pequeña de energía, como las relacionadas con telecomunicaciones, sub-estaciones eléctricas, y líneas de alta tensión, pero a las que también se les atribuyen efectos biológicos relevantes.

## TIPO DE RADIACIONES

La radiación se define como la propagación de energía, ya sea en forma de ondas o partículas a través del espacio. Por su modo de interacción con la materia, las radiaciones se agrupan en **ionizantes** y **no-ionizantes**. Las primeras, tienen ese calificativo debido a su capacidad de formar iones a partir de los átomos y moléculas con los cuales interactúan. Por su parte, las no-ionizantes no son capaces de inducir la ionización de los materiales que impactan, pero al interactuar con la materia producen efectos térmicos y modificación del entorno electromagnético del sistema biológico (Swiderek, 2006).

Entre las radiaciones ionizantes, se cuentan aquellas que provienen del fenómeno de radiactividad, propiedad que se define como la emisión de masa y/o energía por un átomo inestable, e incluyen a los rayos Alfa, Beta y ondas electromagnéticas Gamma, rayos X producidos en máquinas de rayos catódicos, y también aquella radiación proveniente del espacio sideral denominada "Radiación Cósmica". Al respecto de ésta última, se sabe que la radiación originada en el espacio está conformada por ondas electromagnéticas más una gran variedad de partículas ionizantes, y se ha considerado que los rayos cósmicos son las radiaciones ionizantes más penetrantes de las conocidas hasta el momento. La incidencia de radiación cósmica en el planeta está directamente influenciada por variables geográficas como la altitud y latitud, se sabe que la intensidad de esta radiación se incrementa proporcionalmente al aumentar estas variables (Maalouf et al., 2011).

Las sustancias que emiten radiaciones ionizantes en nuestro medio se denominan radioisótopos, y son elementos inestables que se caracterizan por tener un número desbalanceado de neutrones con respecto a los protones en su núcleo atómico. Generalmente son isótopos de número atómico alto, en sí, todos los elementos con número atómico 83 en adelante son radiactivos. Por su parte, hay radioisótopos ligeros que por tener un desbalance en sus neutrones pueden ser también radiactivos, tenemos por ejemplo al primer elemento, el Hidrógeno, que lo podemos encontrar como Tritio o Hidrógeno-3 y que es inestable. Solo los elementos inestables emiten radiaciones, ningún elemento estable lo hace, a éstos últimos se les denomina isótopos no-

radiactivos. Es por lo tanto importante, el conocer la tabla periódica de los elementos, saber cuáles son considerados radiactivos y por lo tanto de potencial peligro debido a la radiación que emiten, ya que muchos de ellos se encuentran en forma natural en diversos minerales como la Uraninita y la Monacita, ricos en Uranio y Torio respectivamente (Bonin y Tsilanizara, 2017). Al respecto, es pertinente mencionar que si se es aficionado a la espeleología (exploración de grutas y cavernas) se deberá poner especial atención al coleccionar rocas, sobre todo de colores oscuros y de grandes profundidades, ya que pudiera tratarse de material sedimentario que ha incorporado diversos radioisótopos. Debido a que nuestros sentidos físicos no detectan la presencia de la radiación proveniente de la radiactividad, será necesario utilizar instrumental especializado para saber si las rocas en cuestión emiten radiación.

Por otro lado, las radiaciones no-ionizantes incluyen la mayor parte del espectro electromagnético y abarcan las de los campos electromagnéticos (CEM) producidas por muy diversos aparatos eléctricos, líneas de conducción y sub-estaciones eléctricas, a éstas se les ha denominado radiaciones electromagnéticas de frecuencia extremadamente baja (entre 50 y 60 Hertz para el caso de la electricidad doméstica). Se cuentan también como no ionizantes; las de telefonía, incluyendo desde luego a la telefonía móvil, las de radio, ondas de radar, microondas, infrarrojas o también llamadas caloríficas, la luz visible con los siete colores del espectro (rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta), y la luz ultravioleta. Una atención especial tiene la radiación ultravioleta (UV), ya que en este rango de longitudes de onda es donde se hace la separación entre la no-ionizante y la ionizante (Figura 1). En la escala del espectro electromagnético, se considera que la UV es no-ionizante, debido a que no forma iones con todos los materiales que impacta. Sin embargo, por el hecho de hacer blanco en moléculas informacionales de las células, como son los ácidos nucleicos y las proteínas y provocar desplazamiento de electrones en éstas, es que se les considera de gran importancia radiobiológica (Robson et al., 2015).

## EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Muy poco tiempo después de que el profesor alemán Wilhelm Conrad Roentgen, trabajando con un tubo de

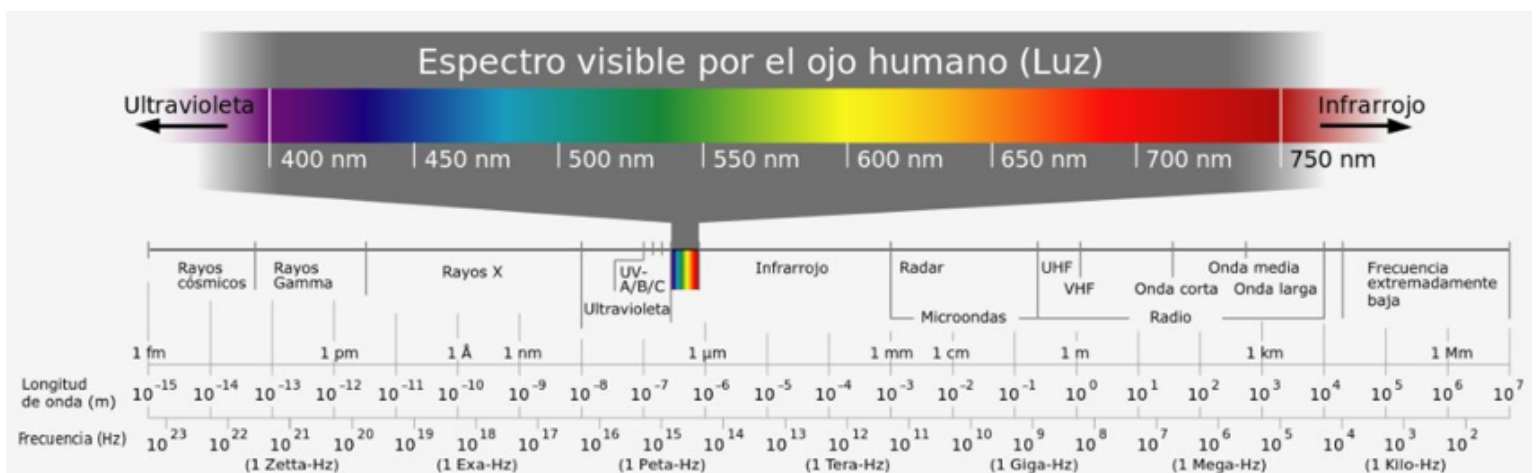


rayos catódicos descubriera los rayos X en 1895 (Figura 2), de los experimentos de Becquerel en 1896, y de los esposos Curie en 1898 en Francia, se sospechó que estas fuentes de radiación causaban efectos biológicos indeseables aun y cuando en ese entonces poco o casi nada se sabía de la naturaleza física de estas emisiones. Para 1906, los trabajos de los franceses Bergonié y Tribondeau condujeron al establecimiento de categorías de radio-sensibilidad celular y se concluyó desde entonces que sería preciso protegerse en contra de esta energía pues era capaz de enfermar a los seres humanos (Yalemar et al., 2001). Actualmente, se sabe que el efecto primario de la radiación sobre la materia viva consiste en la ionización del agua, la así llamada "Radiólisis del agua" representa un problema serio toda vez que esta molécula es la más abundante en los seres vivos. Una vez ionizada el agua, se forman radicales libres que afectan muchos procesos metabólicos que llegan a producir desde bloqueos de reacciones químicas, hasta mutaciones en el ADN y desnaturalización de proteínas. Se ha estudiado a profundidad el efecto de estos radicales libres en las diversas funciones orgánicas, y ahora se atribuye a ellos una serie de enfermedades degenerativas, incluyendo el envejecimiento prematuro de las especies y el cáncer. Asimismo, los radicales libres ocasionan una serie de disfunciones celulares, que a su vez trastornan la delicada homeostasia de los sistemas biológicos provocando su degeneración y muerte (Joshi et al., 2012).

Por otra parte, han sido muy bien estudiados los efectos genéticos de la radiación ionizante y por esto se le considera un agente clastogénico (rompe los cromosomas en el núcleo de las células eucarióticas), mutagénico (altera la secuencia del material genético), y teratogénico (puede producir malformaciones congénitas). Además, se le considera un agente oncogénico, ya que este tipo de radiación es capaz de inducir una diversidad de neoplasias (Brehwens et al., 2010).

## EFFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN POBLACIONES HUMANAS

Después de la segunda guerra mundial, con el dominio de la energía nuclear, durante la década de 1950 se empezó a utilizar la expresión "era nuclear" pensando que con esta energía se substituirían todas las fuentes energéticas convencionales. La era nuclear empezó entonces en el momento en que se tuvo control de la reacción nuclear en cadena que desarrollara inicialmente en 1942 el físico italiano Enrico Fermi, hecho que posteriormente condujo a la fabricación de la llamada bomba atómica, que con más propiedad debería llamarse "bomba nuclear", ya que implica el proceso de fisión del núcleo del



**Figura 1.** Diagrama del espectro electro-magnético. Se muestran los tipos de radiación electromagnética ordenados por longitud de onda y frecuencia. Además de las radiaciones de tipo ondulatorio, existe una diversidad de partículas que actúan asimismo como radiaciones, tal y como se explica en el texto.

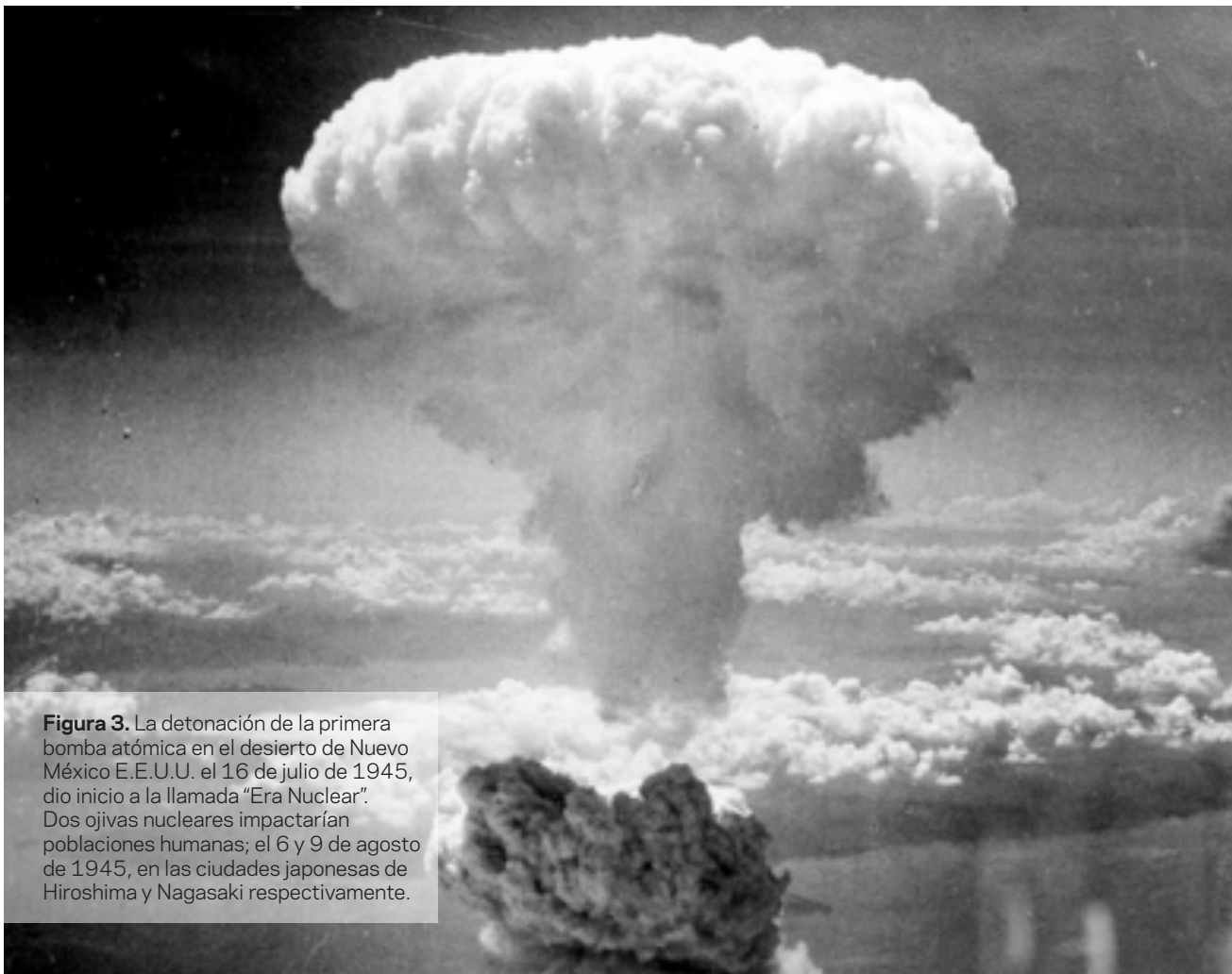
átomo. Después de la prueba secreta y exitosa, de la explosión de la primera bomba atómica el 16 de Julio de 1945 en el desierto de Nuevo México en los Estados Unidos de América, el mundo conocería el poder nuclear con dos acontecimientos que cambiaron el rumbo de la historia humana; las detonaciones de armas nucleares en las ciudades japonesas de Hiroshima, el 6 de agosto de 1945, y en Nagasaki el 9 de agosto del mismo año (Figura 3). En esos ataques nucleares, miles de personas murieron instantáneamente carbonizadas en una hoguera de la que no se tenía ningún precedente en la historia de la humanidad. Otros tantos miles murieron por los efectos de la onda de choque, que es un intenso viento provocado por la fuerza explosiva. El aire adquirió una rigidez como de sólido, destruyendo todo alrededor y no dejó prácticamente ninguna edificación sin dañar en un radio de aproximadamente 20 kilómetros. En total, alrededor de cien mil personas murieron instantáneamente, la mayoría afectados por el calor, otros golpeados por las ondas de choque o por los fragmentos de los edificios destruidos que actuaban como proyectiles. Varios miles más murieron en los días posteriores a la detonación, y para diciembre de 1945 habían fallecido a consecuencia de esta catástrofe 140,000 seres humanos. Aparte de esto,

cabe mencionar que los efectos de la radiactividad generada en la explosión, volvió prácticamente inhabitable la zona y los efectos genéticos de la radiación en las personas se mantuvieron por varias generaciones (Cullings et al., 2017).

Pese a esta terrible experiencia, las investigaciones sobre armas nucleares no cesaron, por el contrario, se incrementaron y se inició así la llamada "guerra fría" que involucraba el dominio militar de las dos grandes potencias mundiales de ese tiempo; los Estados Unidos de América y la extinta Unión Soviética. Para 1952 se comprobó que era posible fabricar una bomba de fusión nuclear, es decir, que la fusión de dos átomos de hidrógeno era factible y que esto producía la liberación de una energía mil veces mayor que la liberada en la fisión atómica. La así llamada "Bomba-H" o bomba de hidrógeno, fue probada exitosamente en la isla Bikini en octubre de 1952. Su poder destructivo fue de 10 megatonnes, es decir el equivalente explosivo de 10 millones de toneladas de dinamita. Esta sola bomba que destruyó la pequeña isla donde se probó, evaporándola completamente y desapareciéndola del mapa geográfico, tuvo un poder destructivo mayor que las bombas arrojadas durante la segunda guerra mundial (Nagataki, 2016).



**Figura 2.** Los rayos X fueron el primer tipo de radiación ionizante descubierto por el profesor alemán Wilhelm Conrad Roentgen en 1895. Casi inmediatamente después de este hallazgo, esta radiación fue utilizada para imagen diagnóstica y diversos usos médicos, y hasta nuestros días se sigue usando. Sin embargo, ahora se sabe que todas las radiaciones ionizantes tienen diversos efectos biológicos que incluyen mutaciones y carcinogénesis



**Figura 3.** La detonación de la primera bomba atómica en el desierto de Nuevo México E.E.U.U. el 16 de julio de 1945, dio inicio a la llamada “Era Nuclear”. Dos ojivas nucleares impactarían poblaciones humanas; el 6 y 9 de agosto de 1945, en las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki respectivamente.

Por otro lado, también en la década de los 1950's hubo algunos incidentes sobre todo en plantas nucleoelectricas que provocaron exposición accidental en humanos. Sin embargo, el accidente nuclear más importante se produjo en 1986, cuando un reactor de la central nuclear de Chernobyl en Ucrania sufrió un calentamiento que terminó por colapsar la tapa del reactor liberando al ambiente cien veces más radiactividad que la generada por las explosiones atómicas de Japón. Este accidente trajo muy graves consecuencias para los ecosistemas, no solo en la zona sino prácticamente globales, la nube radiactiva dio la vuelta al mundo y afectó lo mismo a campos de cultivo con la consecuente contaminación de los alimentos, como a cuerpos de agua incluyendo los océanos (Jaworowski, 2010). Estas catástrofes nucleares suelen ser de enorme repercusión en la cadena alimenticia de la biósfera, y sus efectos se mantienen por mucho tiempo debido a que los isótopos radiactivos suelen tener vidas medias largas, es decir un tiempo prolongado en el que se mantienen emitiendo radiaciones ionizantes.

En vista de lo anterior, se deduce que es necesario contar con medidas preventivas para evitar sobreexposiciones a las radiaciones ionizantes. Desde los primeros años del siglo pasado, comenzaron a

establecerse medidas de seguridad radiológica y nuclear que a la fecha garantizan que una persona que requiera el manejo de radioisótopos no reciba más energía de la que el organismo es capaz de absorber y aun así reparar los daños potencialmente ocasionados. Considerando que todos recibimos radiaciones ionizantes de fuentes minerales (radioisótopos) o de la ya mencionada radiación cósmica, suponemos entonces que hay una “radiación de fondo” a la que definitivamente estamos adaptados ya que hemos vivido con ella prácticamente desde la formación del planeta. Los factores prácticos que se manejan en la seguridad radiológica son: Distancia, Tiempo y Blindaje. Esto es, en el caso de la *distancia*, el alejarse de la fuente emisora nos garantiza una disminución de la dosis que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Por su parte, el *tiempo*, se refiere a que entre menos períodos de exposición continua tengamos, menor será la probabilidad de sufrir un efecto biológico por radiación. En el caso del *blindaje*, se manejan diversas barreras protectoras que detienen o reducen la energía de las radiaciones, por lo general se utilizan metales pesados como el plomo, pero actualmente hay una variedad de materiales incluyendo acrílicos, parafina, y hasta contenedores de agua, para neutralizar el efecto de la emisión radiactiva (Parikh et al., 2017).



Existen organismos internacionales que se encargan de establecer la normativa en seguridad radiológica; la Comisión Internacional de Radio-Protección (ICRP por sus siglas en inglés) y la Agencia Internacional de Energía Atómica, quienes basados en estudios científicos establecen las dosis máximas permisibles (DMP) de exposición a radiación que un ser humano puede recibir sin sufrir daño aparente. En México, el organismo regulador de la energía nuclear es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) que depende de la Secretaría de Energía. En un consenso mundial, se establece que la DMP para el ser humano es de 50 mSv/año (el Sv es una unidad de absorción de radiaciones ionizantes y es específica para el humano. 1Sv = 100 rems, y 1 rem es el equivalente del Roentgen para el hombre). Con referencia a lo anterior, la dosis de 50 mSv (5 rems por año) es realmente baja, si consideramos que un humano puede morir en un lapso de 30 días, pero solo si recibiera de 250 a 400 rems de rayos X o Gamma irradiado de cuerpo entero (Gifford, 1989).

## EL PROBLEMA DE LA PRECIPITACIÓN RADIATIVA

El polvo radiactivo que cae a la tierra después de que se realizan pruebas nucleares se designa como precipitación radiactiva (fall-out). Estos materiales se mezclan con partículas que naturalmente existen en la atmósfera originando un coctel tóxico que con la lluvia caerá a tierra tarde o temprano (Libby, 1955). Esta radiactividad se adhiere al estrato vegetal donde producirá no solo daño por radiación en el tejido de las plantas, sino que podrá ser ingerida por animales herbívoros incorporando así los radioisótopos a la cadena alimenticia. Debido a que los isótopos radiactivos acumulados en el organismo no son biodegradables, se produce el llamado fenómeno de "Magnificación Biológica" lo que produce una cantidad creciente de isótopos acumulados que puede llegar a niveles tróficos más altos, y si consideramos que el ser humano es un consumidor final en la cadena alimenticia, tendremos como resultado que la concentración de las sustancias radiactivas será potencialmente peligrosa cuando éste ingiera leche o carne de animales contaminados con esta precipitación radiactiva. Como un ejemplo crítico mencionaremos el caso del estroncio-90, que es un radioisótopo muy común en la atmósfera y que tiene un comportamiento químico parecido al del calcio.

Una vez que va siendo concentrado al pasar a través de diferentes niveles de la cadena alimenticia, pasa al ser humano en concentraciones consideradas de alta radiotoxicidad. Si consideramos que el estroncio-90 está concentrado primordialmente en la leche de animales que previamente pastaron en zonas contaminadas, y que los niños son los que más consumen este alimento, tendremos una alta concentración del radioisótopo en el producto. Ahora bien, uno de los destinos finales del calcio es el hueso, y en este caso el estroncio podría ocupar el lugar de este catión bivalente en el tejido óseo de los niños predisponiéndolos a leucemias al verse alterada la médula ósea. La cantidad de radioisótopos de precipitación que penetra en las cadenas de alimentos y es transferida finalmente al hombre, dependerá no solo de la cantidad recibida del aire, sino también de la estructura del ecosistema y del carácter de sus ciclos biogeoquímicos. En términos generales, entrará una porción mayor de precipitación radiactiva en medios pobres en elementos nutritivos. Por el contrario, en los medios ricos, las elevadas capacidades de intercambio y almacenamiento diluyen la precipitación ya que las plantas tienen una absorción relativamente pequeña de las sustancias radiactivas, de ahí la importancia de mantener nuestros ecosistemas estables y no alterarlos indiscriminadamente (Besson et al., 2009).

## USOS PACÍFICOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

A pesar de los riesgos y el peligro potencial que representa una instalación donde hay isótopos radiactivos y de las aplicaciones bélicas destructivas, también hay muchas aplicaciones benéficas de la energía nuclear aparte de la ya mencionada generación de energía eléctrica. De particular aplicación son aquellas relacionadas con la biomedicina. Hay una diversidad de terapias que emplean radiaciones ionizantes, sobre todo para el tratamiento del cáncer. Asimismo, una variedad de pruebas diagnósticas no invasivas que emplean pequeñas cantidades de radiactividad y que han mostrado ser bastante toleradas por el paciente. Por otra parte, en ciencias de la tierra y agronómicas son incontables los usos de esta energía. Desde la determinación de edades fósiles utilizando el llamado método del radio-carbono, hasta el denominado método del radio-trazador, en el que se marcan compuestos de interés particular y se rastrean por su emisión radiactiva con el fin de conocer su ruta metabólica. Así también, el control de insectos

dañinos, esterilizando machos en fase de pupa para posteriormente liberarlos al ambiente y que éstos compitan sexualmente con machos no irradiados y así controlar poblaciones de un modo más natural, sin necesidad de aplicar insecticidas (Chang et al., 2015).

## EFFECTOS BIOLÓGICOS Y AMBIENTALES DE LAS RADIACIONES NO-IONIZANTES

Aunque un poco menos estudiadas, se sabe que las radiaciones no-ionizantes tienen efectos biológicos, en algunos casos como el de la luz ultravioleta, muy bien documentados (Alexieva et al., 2001; Hollósy, 2002; Sarghein et al., 2011). La principal fuente natural de este tipo de radiaciones, que como anteriormente se comentó incluyen una gran parte del espectro electromagnético, son las estrellas. El sol, comprende en su espectro en forma general; un 45% de luz visible, otro 45% de luz infrarroja o también llamada "ondas de calor" y un 10% de UV. Con solo este 10% de radiación UV que llegara íntegramente a la superficie terrestre sin ser apropiadamente filtrada, sería suficiente para eliminar prácticamente cualquier tipo de vida como la conocemos actualmente en la plataforma continental. En todo caso, si se mantuvieran formas vivas, serían aquellos organismos acuáticos, ya que el agua es capaz de absorber la mayoría de las longitudes de onda de la radiación (Bancroft et al., 2007).

Para evitar que las longitudes de onda UV, y más cortas lleguen al planeta, existe en la estratósfera de La Tierra una zona de oxígeno triatómico que es llamada "capa de ozono" y que detiene prácticamente todas las radiaciones de longitud de onda igual o menor a 287 nanómetros, espectro que comprende las formas más peligrosas de radiación UV. Esta capa atmosférica que se localiza a una altitud de 20,000 metros, está siendo actualmente amenazada por actividades antropogénicas que promueven su destrucción (Boucher, 2010). Los gases llamados clorofluorocarbonos, que se utilizan principalmente como gases refrigerantes, destruyen rápidamente el ozono adelgazado la capa con la consecuente entrada de mayores cantidades de radiación UV y otras ondas electromagnéticas, incluso ionizantes, como son los rayos cósmicos anteriormente mencionados (Figura 4).

Mucho se ha publicado al respecto del debilitamiento de este escudo de ozono, y a la fecha se sabe que hay zonas

principalmente hacia el hemisferio sur, en particular la Antártida, donde este gas casi ha desaparecido provocando daños a los organismos por sobre-exposición a estas longitudes de onda corta (Newman, 2009). El aumento de patologías de la piel en diversas latitudes, confirman el hecho de que el espectro solar se ha modificado drásticamente y que definitivamente se deberán tomar medidas antes de que la radiación del sol cause más estragos. En particular, algunos tipos de cáncer de piel como el melanoma, se ven incrementados cuando el ADN celular es afectado en forma directa por la radiación UV. Además, se sabe que el envejecimiento prematuro de la piel e incluso efectos sobre el sistema inmune, se derivan de una exposición indiscriminada al sol. Para prevención, se recomienda tomar las debidas precauciones en zonas de alta insolación, donde los niveles de radiación UV son grandes. En latitudes medias, por ejemplo, evitar exponerse entre las 11:00 de la mañana y 4:00 de la tarde. Se debe de considerar también el hecho de que la irradiación solar a grandes altitudes tendrá un efecto mayor, toda vez que es más intensa, ya que a nivel del mar la radiación va siendo filtrada por partículas atmosféricas atenuando en cierta medida su intensidad. El problema con el llamado "sol de montaña" es que, al reducirse la temperatura por efecto de la altitud, tenemos la tendencia a no sentir el calor del sol y por lo tanto corremos el riesgo de sobre-exponernos a radiaciones UV altamente intensas y penetrantes. Por su parte, el empleo de bloqueadores solares que incluyen un factor de protección solar (FPS) y que es un valor indicador del poder de protección, es una medida preventiva casi obligada en estos tiempos. Este factor no deberá ser menor de 40, de acuerdo a especificaciones de asociaciones dermatológicas internacionales. En ningún caso deberá confundirse el uso de un bronceador, que tiene un efecto más bien cosmético, con el de un producto que contiene bloqueador solar. Un bloqueador contiene compuestos químicos que comprometen a la radiación en una reacción fotoquímica, evitando su penetración a la piel y su potencial efecto sobre el ADN, ARN y las proteínas celulares (Osterwalder et al., 2014).

## RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS DE BAJA FRECUENCIA

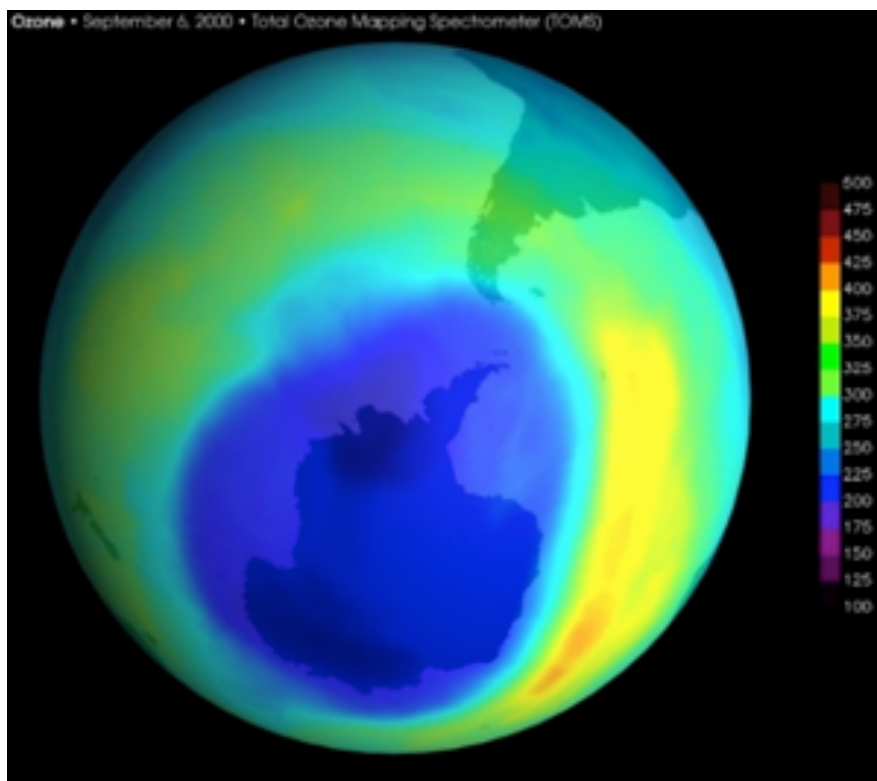
Como anteriormente se mencionó, dentro de las radiaciones no-ionizantes hay una porción del espectro que incluye radiaciones de frecuencia extremadamente baja, del orden de 0 - 300 Hertz y donde se ubican radiaciones tan comunes en

nuestro medio debido a la conducción de corrientes eléctricas. Desde que el hombre apareció en el planeta, ha estado expuesto al campo magnético de la tierra y a los provenientes del espacio exterior, los que tuvieron y aún hoy tienen influencia sobre los sistemas biológicos. Sin embargo, como una de tantas consecuencias que conlleva el aumento en el uso de la energía eléctrica, en estos últimos años el ser humano está cada vez más expuesto a campos electromagnéticos (CEM). Asimismo, el incremento en las telecomunicaciones provoca que tengamos más contacto con electromagnetismo inducido, en forma muy particular por la telefonía móvil.

A finales de los años setenta, aparecieron informes científicos que sugerían la asociación entre CEM y cáncer, en particular con leucemias infantiles (Wertheimer y Leeper, 1979; Pool, 1990). A partir de entonces, se han llevado a cabo una gran cantidad de estudios, tanto epidemiológicos como de laboratorio, para tratar de establecer una relación entre la exposición a este tipo de radiaciones y enfermedad en seres humanos (Zhang et al., 2016). En un consenso general, se acepta que los CEM son capaces de alterar diversas funciones en los organismos, pues debido a su composición electrolítica, los seres vivos son por lo general buenos conductores de la electricidad. A través de las membranas celulares y de los fluidos corporales, existen corrientes iónicas que al verse alteradas conducen a disfunción celular. Además, en los seres vivos existen estructuras magnéticamente influenciadas

como los radicales libres, que tienen gran importancia en el origen de una gran diversidad de enfermedades degenerativas y envejecimiento humano. En nuestro laboratorio, hemos realizado diversas investigaciones que sugieren que los CEM de 60 Hz de frecuencia son capaces de alterar el comportamiento celular; incrementando la proliferación de linfocitos humanos (Heredia-Rojas et al., 2001), modificando la respuesta inmune (Valadez-Lira et al., 2017), actuando como agente citotóxico (Rodríguez de la Fuente et al., 2008), alterando la expresión génica *in vitro* (Rodríguez-De la Fuente et al., 2009) e *in vivo* (Rodríguez-De la Fuente et al., 2012). Por otro lado, también hemos observado que en algunas células de mamífero los CEM no producen efectos significativos (Heredia-Rojas et al., 2004). Sin embargo, el número creciente de estudios cuyos resultados indican efectos potencialmente dañinos atribuidos a esta clase de radiaciones, nos debe poner en alerta para en la medida de lo posible, reducir o limitar la exposición de seres vivos a estas energías. Además, es importante recalcar que cualquier cambio externo en el ambiente eléctrico modificará al fin de cuentas los delicados procesos bioeléctricos del organismo. Para el caso de estas radiaciones, el blindaje es mucho más complicado, y aunque de hecho

**Figura 4.** La capa de Ozono situada en la estratósfera terrestre, actúa como un escudo protector contra radiaciones potencialmente peligrosas que de otra forma llegarían a la superficie del planeta. En el gráfico se aprecia el "agujero" en la capa de ozono medido desde satélites. Los códigos de color indican la concentración del ozono: La máxima, en naranja, la mínima, en violeta. Inicialmente se detectó una drástica disminución del ozono en el hemisferio sur, en particular en la Antártida.





existen materiales que son capaces de desviar estas energías, muchos de ellos aún están en estudio. Lo que sí se puede aplicar, y como anteriormente se explicó para radiaciones ionizantes, son los factores de *distancia* y *tiempo*, ya que también esta radiación disminuye de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, y entre menos tiempo se esté en contacto con la fuente, menos será el efecto biológico.

Por otra parte, es de gran importancia en los ecosistemas el campo geomagnético, ya que todos los seres vivos se desplazan en el seno de un campo magnético de enormes dimensiones como el terrestre. Debido a esto, se induce una diferencia de potencial que puede alterar su motilidad. Aunque el campo geomagnético es relativamente débil, estos efectos se han observado en elasmobranchios. Se sabe que los tiburones y rayas tienen mecanismos basados en la inducción electromagnética con el fin de orientarse y localizar a sus presas. También se sabe que las aves migratorias poseen un mecanismo de orientación para la navegación basado en la generación de potenciales eléctricos inducidos electromagnéticamente (Wiltshko y Wiltshko, 2005). De igual forma, se ha observado que algunos microorganismos, particularmente bacterias, tienen la capacidad de orientar su movimiento en respuesta a un campo magnético externo, propiedad llamada "magneto-tactismo". Estas bacterias contienen una o dos cadenas intracelulares ricas en partículas de hierro. Asimismo, se han descrito propiedades de magneto-sensibilidad para una gran diversidad de insectos migratorios y aún se ha propuesto que el ser humano responde a orientación magnética y que el punto magneto-receptor se localiza en depósitos ferromagnéticos del hueso vomero-nasal, aunque esta observación aún es controversial (Belova y Acosta-Avalos, 2015).

## USOS BENÉFICOS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA NO-IONIZANTE

Es bien conocido actualmente, que los CEM pueden producir una variedad de efectos benéficos en los sistemas biológicos. Los campos magnéticos pulsantes, por ejemplo, son utilizados con bastante eficacia en la reparación de fracturas óseas (Androjna et al., 2014). Se ha informado también, que la calcificación del hueso es promovida tanto por campos eléctricos como por magnéticos, favoreciendo en casos de osteoporosis (Hu et al., 2015). Asimismo, se ha reportado la regeneración de tejidos aplicando CEM de 60 Hz. Muchos de estos procedimientos están aprobados y regulados internacionalmente. Se ha presentado también evidencia de que ciertas frecuencias de radiación electromagnética del tipo de las radiofrecuencias son capaces de eliminar microorganismos patógenos de los alimentos (Qin et al., 1996).

Para otros tipos de radiaciones no-ionizantes, hay también muchas aplicaciones. Los rayos infrarrojos, por su parte, se usan en fisioterapia y diversos procedimientos quirúrgicos y estéticos (Rutkowski et al., 2011). También la ya comentada radiación UV, tiene aplicaciones microbicidas toda vez que la gran mayoría de los microorganismos son muy eficientemente inactivados por este tipo de radiaciones (Ko et al., 2001). Por otra parte, son muy bien conocidas las aplicaciones de las microondas, no solamente en la industria alimentaria, sino también en biomedicina (Shruthi et al., 2013).

## CONCLUSIONES

En base a lo anteriormente expuesto, se puede afirmar que nuestro entorno radiológico se ha modificado drásticamente sobre todo en los últimos 60 años, debido principalmente al irresponsable comportamiento de la especie humana. Actualmente, mucho se habla y poco se hace al respecto del llamado “desarrollo sustentable”, es decir crecer, pero con planeación, considerando la calidad del ambiente y los recursos bióticos para las futuras generaciones. Crecer usando, y no abusando de los recursos. No estamos en contra del progreso, pues como ya se ha expuesto, son muchos y variados los usos y aplicaciones de las radiaciones que han hecho nuestra vida más confortable, e incluso en biomedicina han contribuido a incrementar el promedio de vida del ser humano. Sí estamos en contra de aquellas medidas, que, sobreponiendo intereses económicos no toman en cuenta el impacto que sobre el ecosistema se produce. Al fin de cuentas, el mismo ser humano pagará las consecuencias de un desarrollo carente de planeación alguna.

Si bien es cierto, los sistemas biológicos tienen una capacidad de adaptación sorprendente, el hecho de que cada vez más se incrementa la intensidad de la radiación en el ecosistema, nos lleva a la pregunta: ¿Hasta cuándo soportarán las células esta carga energética extra? Como ya se mencionó, el exceso de energía que reciben ahora los sistemas biológicos aumenta la entropía del sistema, reduciendo la energía libre de la cual se valen las células para reparar los daños ocasionados por las radiaciones y otros factores físicos y químicos.

Con referencia a la exposición a CEM, aunque si bien no podemos prescindir del uso de la electricidad, si deberán considerarse medidas para evitar la sobre-exposición a los mismos.

Sin caer en catastrofismos, se puede vislumbrar que con tantos agresores físicos de tipo radiación en el ambiente, progresivamente será necesario que las fuerzas evolutivas actúen para dotar a los seres vivos de cualidades adaptativas mejores, en este caso surge otra pregunta: ¿Habrá el tiempo suficiente para ello?



## LITERATURA CITADA

- Alexieva, V., I. Sergiev, S. Mapelli, E. Karanov. 2001. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell & Environment*. 24(12) 1337-1344. doi:10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x
- Androjna, C., B. Fort, M. Zborowski, R.J. Midura. 2014. Pulsed electromagnetic field treatment enhances healing callus biomechanical properties in an animal model of osteoporotic fracture. *Bioelectromagnetics*. 35(6) 396-405. doi:10.1002/bem.21855
- Bancroft, B.A., N.J. Baker, A.R. Blaustein. 2007. Effects of UVB radiation on marine and freshwater organisms: A synthesis through meta-analysis. *Ecology Letters*. 10(4) 332-345. doi:10.1111/j.1461-0248.2007.01022.x
- Belova, N.A., D. Acosta-Avalos. 2015. The effect of extremely low frequency alternating magnetic field on the behavior of animals in the presence of the geomagnetic field. *Journal of Biophysics*. 2015, 1-8. doi:10.1155/2015/423838
- Besson, B., L. Pourcelot, E. Lucot, P. Badot. 2009. Variations in the transfer of radiocesium ( $^{137}\text{Cs}$ ) and radiostrontium ( $^{90}\text{Sr}$ ) from milk to cheese. *Journal of Dairy Science*. 92(11) 5363-5370. doi:10.3168/jds.2009-2357
- Bonin A., A. Tsilanizara. 2017. A method to improve dose assessment by reconstruction of the complete isotopes inventory. *Radiat Prot Dosimetry*. 175(1): 46-57. doi:10.1093/rpd/ncw266
- Bor-Sen, C., W. Shang-Wen, L. Cheng-Wei. 2015. On the calculation of system entropy in nonlinear stochastic biological networks. *Entropy*. 17(10) 6801-6833. doi:10.3390/e17106801
- Boucher, O. 2010. Stratospheric ozone, ultraviolet radiation and climate change. *Weather*. 65:105-110. doi:10.1002/wea.451
- Brehwens, K., E. Staaf, S. Haghdoost, A.J. González, A. Wojcik. 2010. Cytogenetic damage in cells exposed to ionizing radiation under conditions of a changing dose rate. *Radiation Research*, 173(3), 283-289. doi:10.1667/RR2012.1
- Chang, C., M. Villalun, S. Geib, C. Goodman, J. Ringbauer, D. Stanley. 2015. Pupal X-ray irradiation influences protein expression in adults of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis*. *Journal of Insect Physiology*. 76, 7-16. doi:10.1016/j.jinsphys.2015.03.002
- Cullings, H.M., E.J. Grant, S.D. Egbert, T. Watanabe, T. Oda, F. Nakamura, T. Yamashita, H. Fuchi, S. Funamoto, K. Marumo, R. Sakata, Y. Kodama, K. Ozasa, K. Kodama. 2017. DS02R1: Improvements to atomic bomb survivors' input data and implementation of dosimetry system 2002 (DS02) and resulting changes in estimated doses. *Health Phys*. 112(1):56-97. doi:10.1097/HP.0000000000000598
- Gifford, D. 1989. Dose limits for ionizing-radiation. *Contemporary Physics*. 30(5), 367-376. doi: 10.1080/00107518908213775
- Heredia-Rojas, J. A., A.O. Rodríguez-De la Fuente, M. Velazco-Campos, C.H. Leal-Garza, L.E. Rodríguez-Flores, B. De la Fuente-Cortez. 2001. Cytological effects of 60 Hz magnetic fields on human lymphocytes in vitro: Sister-chromatid exchanges, cell kinetics and mitotic rate. *Bioelectromagnetics*. 22(3)145-149. doi:10.1002/bem.32
- Heredia-Rojas, J.A., D.E. Caballero-Hernández, A.O. Rodríguez-De la Fuente, G. Ramos-Alfano, L.E. Rodríguez-Flores. 2004. Lack of alterations on meiotic chromosomes and morphological characteristics of male germ cells in mice exposed to a 60 Hz and 2.0 mT magnetic field. *Bioelectromagnetics*. 25(1)63-68. doi:10.1002/bem.10184
- Hollósy, F. 2002. Effects of ultraviolet radiation on plant cells. *Micron*. 33(2)179-197. doi:10.1016/S0968-4328(01)00011-7



- Hu, J., T. Zhang, D. Xu, J. Qu, L. Qin, J. Zhou, H. Lu. 2015. Combined magnetic fields accelerate bone-tendon junction injury healing through osteogenesis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 25(3) 398-405. doi:10.1111/sms.12251
- Jaworowski, Z. 2010. Observations on the Chernobyl disaster and LNT. *Dose-Response*. 8(2)148-171. doi:10.2203/dose-response.09-029.Jaworowski
- Jeggo, P., M. Lobrich. 2006. Radiation-induced DNA damage responses. *Radiation Protection Dosimetry*. 122(1-4) 124-127. doi:10.1093/rpd/nc1495
- Joshi, R., R. Gangabagirathi, S. Venu, S. Adhikari, T. Mukherjee. 2012. Antioxidant activity and free radical scavenging reactions of gentisic acid: In-vitro and pulse radiolysis studies. *Free Radical Research*. 46(1) 11-20. doi:10.3109/10715762.2011.633518
- Ko, G., M.W. First, H.A. Burge. 2001. The characterization of upper-room ultraviolet germicidal irradiation in inactivating airborne microorganisms. *Environmental Health Perspectives*. 110(1) 95-101. doi:10.1289/ehp.0211095
- Libby, W. F. 1955. Radioactive Fall-out. *Bulletin of The Atomic Scientists*. 11(7), 256-260.
- Maalouf M., M. Durante, N. Foray. 2011. Biological effects of space radiation on human cells: history, advances and outcomes. *J Radiat Res*. 52 (2): 126-146. doi:10.1269/jrr.10128
- Møller, A.P., T.A. Mousseau. 2013. The effects of natural variation in background radioactivity on humans, animals and other organisms. *Biological Reviews*. 88(1) 226-254. doi:10.1111/j.1469-185X.2012.00249.x
- Nagasaki S. 2016. Thoughts on relief for atomic bomb survivors since Obama's visit to Hiroshima. *Lancet*. 388(10054):1878-1879. doi: 10.1016/S0140-6736(16)31728-7.
- Newman, P.A., L.D. Oman, A.R. Douglass, E.L. Fleming, S.M. Frith, M.M. Hurwitz, S.R. Kawa, C.H. Jackman, N.A. Krotkov, E.R. Nash, J.E. Nielsen, S. Pawson, R.S. Stolarski, G.J.M. Velders. 2009. What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? *Atmospheric Chemistry and Physics*. 9(6) 2113-2128. doi.org/10.5194/acp-9-2113-2009
- Osterwalder, U., M. Sohn, B. Herzog. 2014. Global state of sunscreens. *Photodermatology. Photoimmunology & Photomedicine*. 30: 62-80. doi: 10.1111/phpp.12112.
- Parikh J.R., R.A. Geise, E.I. Bluth, C.E. Bender, G. Sze, A.K. Jones. 2017. Potential radiation-related effects on radiologists. *AJR Am J Roentgenol*. 208(3):595-602. doi: 10.2214/AJR.16.17212.
- Pool R. 1990. Is there an EMF-cancer connection? *Science*. 249(4973):1096-1098.
- Qin, B., U.R. Pothakamury, G.V. Barbosa-Cánovas, B.G. Swanson. 1996. Nonthermal pasteurization of liquid foods using high-intensity pulsed electric fields. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 36(6) 603-627.
- Robson, T. M., S.M. Hartikainen, P.J. Aphalo. 2015. How does solar ultraviolet-B radiation improve drought tolerance of silver birch (*Betula pendula* Roth.) seedlings? *Plant Cell Environ*. 38: 953-967. doi:10.1111/pce.12405
- Rodríguez-De la Fuente, A.O., J.A. Heredia-Rojas, B.D. Mata-Cárdenas, J. Vargas-Villarreal, L.E. Rodríguez-Flores, I. Balderas-Candanosa, J.M. Alcocer-González. 2008. Entamoeba invadens: Influence of 60 hz magnetic fields on growth and differentiation. *Experimental Parasitology*. 119(2) 202-206. doi:10.1016/j.exppara.2008.01.006
- Rodríguez de la Fuente, A.O., J.M. Alcocer-González, J.A. Heredia-Rojas, I. Balderas-Candanosa, L.E. Rodríguez-Flores, C. Rodríguez-Padilla, R.S. Tamez-Guerra. 2009. Effect of 60 Hz electromagnetic fields on the activity of hsp70 promoter: An in vitro study. *Cell Biology*

International. 33(3) 419-423. doi:10.1016/j.cellbi.2008.09.014

Rodríguez-De la Fuente A.O., J.M. Alcocer-González, J.A. Heredia-Rojas, C. Rodríguez-Padilla, L.E. Rodríguez-Flores, M.A. Santoyo-Stephano, E. Castañeda-Garza, R.S. Tamez-Guerra. 2012. Effect of 60 Hz electromagnetic fields on the activity of hsp70 promoter: an in vivo study. *Cell Biol Int Rep.* 26;19(1):e00014. doi: 10.1042/CBR20110010.

Rutkowski, R., A. Straburzyńska-Lupa, P. Korman, W. Romanowski, M. Gizińska. 2011. Thermal effectiveness of different IR radiators employed in rheumatoid hand therapy as assessed by thermovisual examination. *Photochemistry and Photobiology.* 87: 1442-1446. doi: 10.1111/j.1751-1097.2011.00975.x

Sarghein, S., J. Carapetian, J. Khara. 2011. The effects of UV radiation on some structural and ultrastructural parameters in pepper (*Capsicum longum* A.DC.). *Turkish Journal of Biology.* 35(1) 69-77. doi:10.3906/biy-0903-11

Shruthi, B., P. Vinodhkumar, B. Kashyap, P. Reddy. 2013. Use of microwave in diagnostic pathology. *Journal of Cancer Research and Therapeutics.* 9(3), 351-355. doi:10.4103/0973-1482.119301

Swiderek, P. 2006. Fundamental processes in radiation damage of DNA. *Angew. Chem. Int. Ed.* 45: 4056-4059. doi: 10.1002/anie.200600614

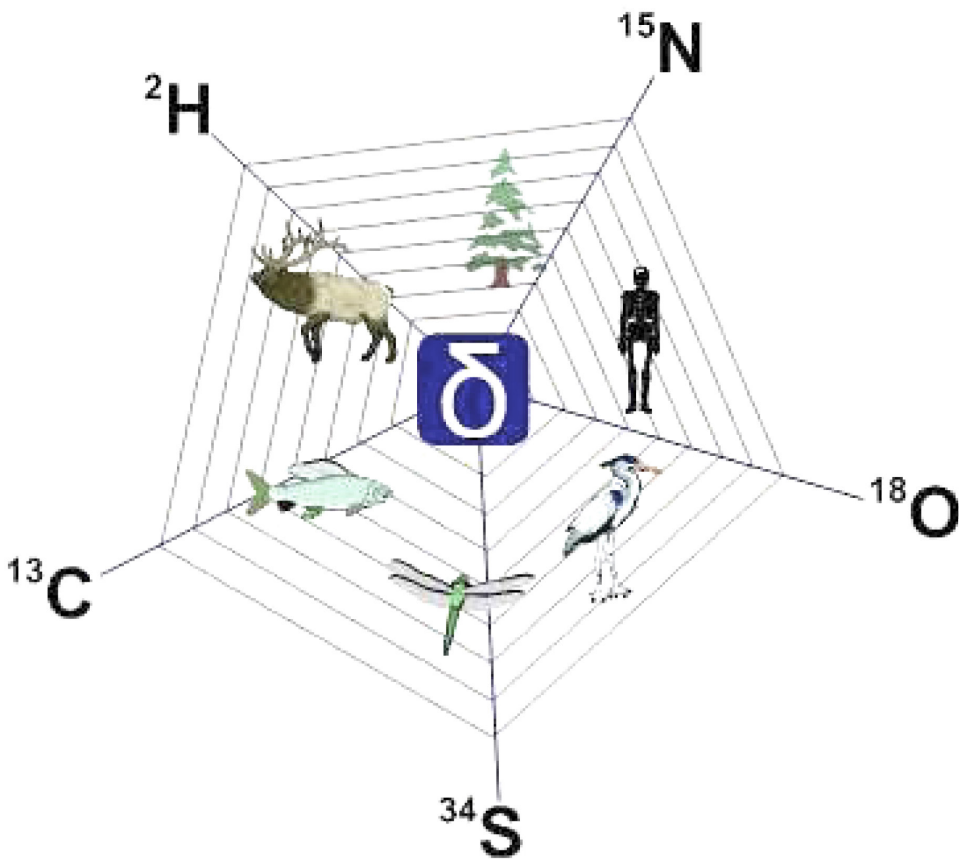
Valadez-Lira, J.A., N. Medina-Chávez, A. Orozco-Flores, J.A. Heredia-Rojas, A.O. Rodríguez-de la Fuente, R. Gómez-Flores, J.M. Alcocer-González, P. Tamez-Guerra. 2017. Alterations of immune parameters on *Trichoplusia ni* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae exposed to extremely low-frequency electromagnetic fields. *Environmental Entomology.* 46(2) 376-382. doi:10.1093/ee/nvx037

Wertheimer N., E. Leeper. 1979. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology.* 109:273-284. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/453167>.

Wiltschko, W., R. Wiltschko. 2005. Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology.* 191(8) 675-693. doi:10.1007/s00359-005-0627-7

Yalemar, J.A., A.H. Hara, S.H. Saul, E.B. Jang, J.H. Moy. 2001. Effects of gamma irradiation on the life stages of yellow flower thrips, *Frankliniella schultzei* (Trybom) (Thysanoptera: Thripidae). *Annals of Applied Biology.* 138: 263-268. doi: 10.1111/j.1744-7348.2001.tb00111.x

Zhang, Y., J. Lai, G. Ruan, C. Chen, D. Wang. 2016. Meta-analysis of extremely low frequency electromagnetic fields and cancer risk: A pooled analysis of epidemiologic studies. *Environment International.* 88: 36-43. doi:10.1016/j.envint.2015.12.012



# LAS TÉCNICAS ISOTÓPICAS Y SUS RECIENTES APLICACIONES EN LAS CIENCIAS BIOLÓGICAS

Julián Gamboa-Delgado  
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias  
Biológicas, Programa Maricultura, Departamento de Ecología.

## RESUMEN

Diversas técnicas analíticas han sido utilizadas en todas las disciplinas de la biología para generar un conocimiento más claro sobre algún fenómeno en particular. Un grupo de estas metodologías analíticas migró lentamente desde las ciencias geológicas hacia las ciencias biológicas. Tales metodologías están basadas en la determinación de las firmas isotópicas naturales presentes en diversos tipos de materiales, tanto inorgánicos como orgánicos. La mayoría de los elementos químicos que conforman la materia están presentes como dos o más isótopos. La única diferencia entre un isótopo de un mismo elemento y otro, es el número de neutrones, lo cual le otorga una masa ligeramente diferente a cada isótopo. Los isótopos estables han sido ampliamente utilizados como marcadores nutricionales no-peligrosos para estimar la forma en la cual nutrientes y energía son movilizados en los ecosistemas. De igual forma, las técnicas pueden usarse para determinar las rutas migratorias de varias especies y más recientemente han sido de gran utilidad en estudios nutricionales enfocados a evaluar nuevos ingredientes. La ciencia forense de los alimentos también ha utilizado técnicas isotópicas para detectar productos adulterados o falsos. El presente manuscrito muestra una breve revisión de las aplicaciones de los isótopos estables en diversas disciplinas de la biología, enfatizando aquellas áreas en las cuales existe un incremento importante de generación de conocimiento basado en estas técnicas.





**Palabras clave: Isótopos estables, técnicas analíticas, biología, ecología trófica, nutrición animal, trazabilidad de productos.**

## INTRODUCCIÓN

Los isótopos pueden definirse como formas químicas diferentes de un mismo elemento; por ejemplo, el carbono tiene dos isótopos estables (el C12, muy abundante en la naturaleza, y el C13, más escaso) y un isótopo radioactivo (C14). La única diferencia entre un isótopo de un mismo elemento y otro isótopo, reside en el número de neutrones presentes en el núcleo. Debido a su abundancia natural en los diversos tejidos animales y vegetales, el carbono y el nitrógeno son los elementos más frecuentemente analizados para determinar sus proporciones isotópicas (expresadas como  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$ ).

Los isótopos pesados y ligeros participan en todas las reacciones metabólicas y a pesar de que las diferencias de masa entre isótopos pesados y ligeros son minúsculas, resultan perfectamente detectables por medio de técnicas analíticas (espectrometría IRMS).

En vista de que los elementos químicos (y sus isótopos) se encuentran ampliamente distribuidos por la litosfera, atmósfera y biósfera, estos han sido muy útiles para trazar nutrientes. Una ventaja adicional es que los isótopos más pesados tienden a acumularse en los tejidos de los animales consumidores, lo cual hace que las firmas isotópicas de sus tejidos sean diferentes a sus alimentos o a los de otros animales. En otras palabras, la dieta de un organismo define el valor isotópico de ese organismo y de sus tejidos. Estudios recientes han aplicado técnicas isotópicas para definir los alimentos preferidos por animales silvestres y para evaluar en laboratorio nuevos ingredientes destinados a la nutrición animal (Gamboa-Delgado *et al.*, 2016; Phillips, 2012).

En vista de que cada animal y planta conservan sus propias firmas isotópicas y estas son influenciadas por las condiciones de cultivo o crianza, otra serie

de estudios se enfocan sobre la medición de firmas isotópicas para verificar que diversos productos de origen animal y vegetal realmente sean producidos de la forma que indica el empaque (producto silvestre, de granja, de agricultura orgánica, etc.) (Gamboa-Delgado *et al.*, 2014; Serrano *et al.*, 2007; Vinci *et al.*, 2013).

Por otro lado, la alta sensibilidad de la técnica ha apoyado varios estudios médicos orientados a la detección de afecciones estomacales. Por ejemplo, la detección de la bacteria *Helicobacter pylori* en el tracto digestivo puede realizarse por medio de determinaciones isotópicas. En este tipo de diagnóstico, el paciente ingiere un sustrato marcado con isótopos estables específicos (carbono pesado, o  $\text{C}^{13}$ ) y si la bacteria está presente, ésta consume el sustrato y los productos de degradación generados ( $^{13}\text{CO}_2$ ) son detectados en el aire exhalado por el paciente (Delvin *et al.*, 1999).

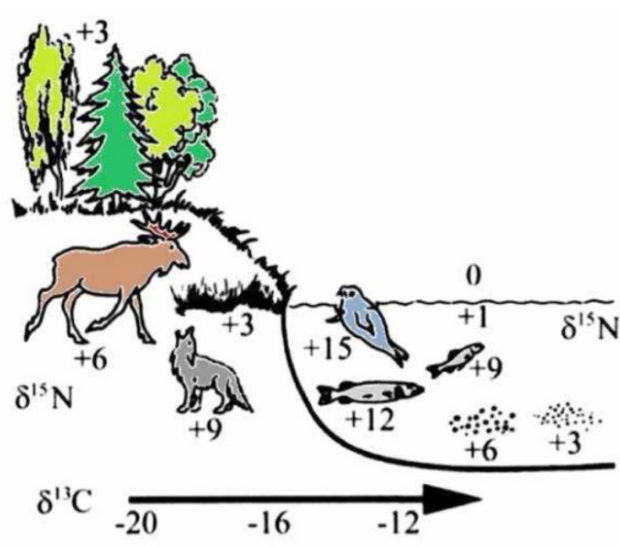
## ISÓTOPOS ESTABLES Y APLICACIONES EN ECOLOGÍA

El uso de isótopos estables como trazadores nutricionales representa una poderosa herramienta para estimar flujos de nutrientes y energía dentro de los ecosistemas terrestres y acuáticos (Abrantes y Sheaves, 2010). Diversos organismos animales y vegetales tienden a tener valores isotópicos diferentes; por ejemplo, las plantas presentan valores isotópicos de nitrógeno muy bajos, mientras que los animales herbívoros que se alimentan de estas plantas tienden a acumular los isótopos pesados que estaban en las plantas, y en general, los animales herbívoros presentan valores isotópicos en sus tejidos que son 3 unidades mayores que las plantas consumidas.

De igual forma, los depredadores de estos herbívoros, a su vez, aumentan el valor isotópico de sus tejidos en otras 3 unidades (Figura 1). Estas diferencias han permitido aplicar una gran cantidad de estudios sobre alimentación de especies silvestres y es posible determinar qué es lo que prefiere comer cierto organismo y se apoya la determinación de su posición en las pirámides alimenticias.

Técnicas isotópicas se han aplicado también para reconstruir la dieta de animales extintos al analizar los valores isotópicos de hueso y colágeno, para después asociarlos a los valores presentes en diversos frutos, granos, tejidos animales, etc. La estructura poblacional de ciertos ecosistemas se ha visto fuertemente afectada por la introducción de especies no nativas y en este contexto, los análisis basados en isótopos han arrojado interesante información acerca de que es lo que consume la nueva especie introducida, con quien compete y/o a quien la depreda (Caut *et al.*, 2008).

Una aplicación muy reciente de los isótopos en ecología es la determinación de rutas migratorias. Por ejemplo, se han realizado estudios con la mariposa monarca en los cuales se mide la firma isotópica de las alas de las mariposas, las cuales no cambian su valor isotópico una vez alcanzado el estado adulto. Después de las migraciones, se mide la firma isotópica y se compara con las firmas



**Figura 1.** Diferencias isotópicas del nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ , partes por mil) y carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) constituyentes de animales y vegetales en diferentes ecosistemas y niveles tróficos. Tomado de Salazar-García (2009).

isotópicas de las plantas consumidas en estado de oruga. Como estas plantas se encuentran en regiones muy definidas, es posible trazar una migración hasta su origen. Estudios similares se han realizado con plumas de varias especies de aves que presentan largas migraciones (Zimmo *et al.*, 2012).

## USO DE METODOLOGÍAS ISOTÓPICAS EN ESTUDIOS SOBRE NUTRICIÓN

Existe un dicho popular que dice "somos lo que comemos"; esto es particularmente verdadero cuando se considera a los isótopos estables, es decir, los isótopos de los elementos presentes en los alimentos terminan ya sea en los tejidos de los consumidores o participando en diversas funciones metabólicas. Si a una persona vegetariana se le analizan los isótopos estables de nitrógeno en cabello, tendrían un valor muy diferente al determinado en las personas que mantienen una dieta predominantemente basada en carne. Gracias a que los diversos alimentos (cereales, granos, carne, frutos) pueden exhibir firmas isotópicas naturalmente distintas, es posible establecer una relación entre un organismo consumidor y su dieta.

Estos valores pueden integrarse en modelos matemáticos (Phillips y Gregg, 2001; Fry, 2006) para determinar cuáles son los alimentos que más contribuyen al crecimiento de un animal o de una población de animales. Tales técnicas se han aplicado en estudios de ecología trófica y han sido de amplia utilidad para la nutrición animal porque permiten estimar la contribución al crecimiento que aportan nuevos ingredientes en comparación a ingredientes tradicionales.

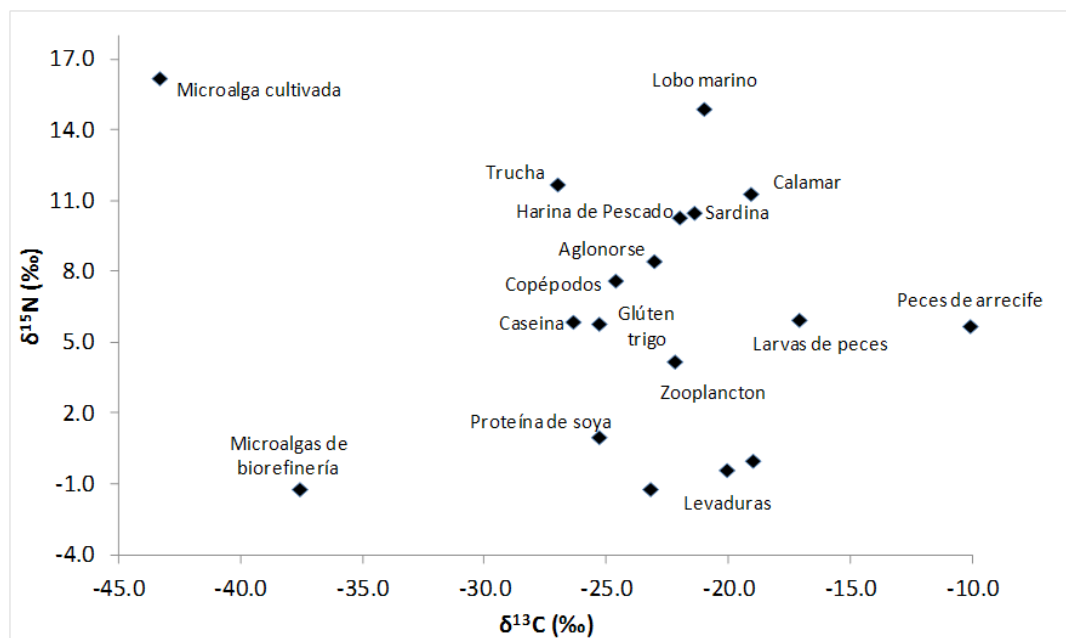
De forma similar, otras aplicaciones se orientan a la investigación acerca de las dinámicas de nutrientes en diversos ambientes acuáticos y terrestres. Mientras que, en condiciones de laboratorio, han sido de utilidad para cuantificar la incorporación de nutrientes en animales muy pequeños en los cuales otras técnicas no se pueden aplicar para investigar el consumo de alimento. Por ejemplo, en la crianza de animales acuáticos que tienen valor comercial ya sea como alimento u ornamentales, muchas empresas requieren criar larvas de peces y crustáceos. Estas larvas presentan un tamaño extremadamente pequeño y en este contexto, la aplicación de técnicas isotópicas en estudios de nutrición larval ha sido muy útil porque se requiere un tamaño de muestra muy pequeño (1 mg) y porque las técnicas otorgan una alta sensibilidad. En animales planctónicos, ha sido

posible estimar tasas de ingestión y asimilación tan bajas como 2.5 nanogramos de carbono por individuo por hora (Verschoor *et al.*, 2005).

La firma isotópica de un animal silvestre refleja el perfil isotópico del material dietario que fue asimilado y usado para construir nuevos tejidos, por lo tanto, es posible determinar los aportes al crecimiento que proveen los nutrientes de una dieta. Como se mencionó antes, diversos animales, plantas y sus productos, presentan diferentes valores isotópicos de forma natural (Figura 2). Ésta característica ha sido de utilidad para diseñar estudios nutricionales en los cuales es posible evaluar nuevos ingredientes que tienen diferentes valores isotópicos, lo cual permite eventualmente evaluar el valor isotópico de animales alimentados con estos para determinar cuál(es) de los ingredientes aportan menor o mayor cantidad de nutrientes al crecimiento.

Estudios recientes se han enfocado en aplicar técnicas isotópicas en organismos acuáticos de valor comercial con el fin de comparar la asimilación de la proteína aportada por nuevos ingredientes de origen microbiano en comparación con las fuentes animales tradicionales, como lo es la harina de pescado (Gamboa-Delgado & Márquez-Reyes, 2016).

**Figura 2.** Valores isotópicos de carbono y nitrógeno ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) determinados en diversos organismos y productos derivados de estos. Debido a que los isótopos pesados tienden a acumularse conforme se asciende en las pirámides tróficas, los valores más positivos se encuentran arriba a la derecha y corresponden a organismos depredadores. Las microalgas cultivadas presentan valores extremos debido a las propiedades químicas (e isotópicas) de los fertilizantes y dióxido de carbono suplementario usados para su producción.





## APLICACIONES DE LOS ISÓTOPOS ESTABLES EN FISIOLÓGÍA ANIMAL

El metabolismo de las proteínas ha sido ampliamente estudiado como un medio para entender y mejorar el proceso de crecimiento en los animales de crianza (Carter *et al.*, 1994). Los isótopos estables pueden ser utilizados como indicadores confiables para determinar la incorporación de la proteína dietaria en un tejido. El metabolismo de las proteínas también ha sido evaluado utilizando trazadores a base de isótopos estables como una alternativa a los isótopos radioactivos.

Estudios sobre síntesis proteica realizados en trucha han demostrado que los resultados obtenidos utilizando isótopos estables son similares a aquellos generados mediante el uso de aminoácidos radio-marcados (Houlihan *et al.*, 1995). La tasa de incorporación de un nutriente (en un tejido específico u organismo completo) también puede ser estimada mediante la medición de los cambios isotópicos que ocurren en algún tejido (músculo, cabello, escamas, plumas, etc.) al alimentar a los animales experimentales con dietas conocidas (Pearson *et al.*, 2003). De esta

forma, se obtiene un indicador adicional del desempeño nutricional debido a que los tejidos de animales que exhiben crecimiento rápido también incorporan rápidamente la señal isotópica de los ingredientes o dieta consumida.

Lo anterior ha sido muy útil para estimar eficiencias de asimilación en estudios en laboratorio enfocados a probar ingredientes alternativos para especies marinas (Tabla 1).

## ISÓTOPOS ESTABLES COMO HERRAMIENTAS EN LA DETECCIÓN DE PRODUCTOS FRAUDULENTOS

El actual mercado de productos alimenticios alcanza una escala global sin precedentes. Distinguir el origen o el método de producción de un producto que ya se encuentra en el mercado requiere de

protocolos de trazabilidad que generalmente no se aplican, lo cual conlleva a prácticas fraudulentas. La descripción errónea y deliberada en el etiquetado de diversos productos alimenticios es un problema

**Tabla 1.** Ejemplos de eficiencias de asimilación de diferentes tipos de biomasa microbiana (BM) evaluada como sustituto de la harina de pescado (HP) en dietas experimentales para camarón blanco del Pacífico *Litopenaeus vannamei*. Los datos muestran las proporciones relativas de proteína suministrada por cada tipo de ingrediente al crecimiento. Estimaciones basadas en lecturas isotópicas del nitrógeno contenido en ingredientes y en tejido animal al final de los bioensayos.

	Proporción en la dieta (%)		Contribución al crecimiento (%)		Referencia
	HP	BM	HP	BM	
Levadura <i>Torula Candida utilis</i>	70	30 a	73	27 a	Gamboa-Delgado et al. 2016
Microalgas <i>Spirulina + Nannochloropsis</i>	33	33a 33	36	50 b 14	Gamboa-Delgado et al. datos no publ.
Microalgas <i>Grammatophora</i>	90	10 a	93	7 a	Pacheco-Vega et al. en prensa
<i>Schizochytrium</i>	90	10 a	92	8 a	
Harina de bioflóculos	50	50 a	59	41b	Gamboa-Delgado et al. 2017

\* Los superíndices indican diferencias significativas entre los valores esperados (proporciones de proteína de cada ingrediente en las dietas) y los valores observados (estimados en camarones) contribuidos al crecimiento.

frecuente y extendido en el cual se ofrece un producto animal que no corresponde al indicado en los empaques. De igual forma, diferenciar productos derivados de pesquerías (sujetos a vedas temporales) o de prácticas de cultivo es difícil y existen varios métodos subjetivos que no son fiables, tales como la coloración, textura y palatabilidad del producto. Una diferenciación puede realizarse al **identificar** y medir un trazador químico específico como lo es el perfil de ácidos grasos o la firma isotópica del producto (Moretti et al., 2003).

La relativamente nueva ciencia forense de los alimentos (Primrose et al., 2010) ha empleado un rango de técnicas isotópicas emergentes, las cuales han permitido I) detectar la adulteración de productos tales como vino y miel de abeja (Cabañero et al., 2008; Kropf et al., 2010), II) identificar productos farmacéuticos falsos (Felton et al., 2011), III) diferenciar entre la producción convencional u orgánica de plantas y animales (Bell et al., 2007; Flores et al., 2007), IV) identificar los métodos de producción (Rogers, 2009; Vinci et al., 2013) y V) autenticar el origen geográfico de alimentos (Zhang et al., 2012).

Varios estudios han aplicado técnicas isotópicas para diferenciar la forma de producción de aves, peces y hortalizas. Por ejemplo, la adulteración de la miel de abeja es una práctica muy común en nuestro país. Se agrega jarabe de maíz bajo el argumento que esto evita la cristalización, sin embargo, se trata de una dilución del producto que ocurre de forma cotidiana. Varios países han adoptado técnicas isotópicas para detectar si los lote de miel importados son puros, o si presentan alguna adulteración. El principio es muy simple: generalmente, las abejas solamente generan miel a partir de productos obtenidos de plantas con flores varaderas, las cuales tienen valores isotópicos diferentes a las plantas gramíneas con

espiga (caña de azúcar y jarabes derivados). En otro tipo de investigación para diferenciar productos, un estudio reciente realizado en dos países demostró que se puede distinguir claramente entre camarones extraídos de altamar (sujetos a vedas temporales y posibles prohibiciones de importación) de aquellos animales producidos por acuicultura (Gamboa-Delgado et al., 2014). Las metodologías isotópicas incluso presentan potencial para apoyar los protocolos de trazabilidad y verificación del modo de producción del producto camarón, el cual es fomentado por nuevas normas oficiales (NOM-047-PESC-2012) (COFEMER, 2013).

## ISÓTOPOS ESTABLES COMO TRAZADORES DE CONTAMINACIÓN

Los isótopos estables también han sido utilizados para determinar las dinámicas de nutrientes en que ocurren en suelos dedicados a la agricultura y ganadería, así como en los efluentes derivados de estanques de producción acuícola (Bombeo-Tuburan et al., 1993; Epp et al., 2002). Mediante el análisis isotópico de los componentes de cierto alimento para animales, es posible realizar un trazado de nutrientes desde los alimentos hasta los cuerpos de agua o los sedimentos cercanos al presunto sitio contaminante (Yokoyama et al., 2006).

En operaciones de cultivo de camarón, isótopos estables han sido aplicados mediante la formulación de dietas enriquecidas con nitrógeno pesado con el fin de generar productos metabólicos trazables desde las granjas de producción y hacia los efluentes que se vierten, frecuentemente sin tratamiento, hacia los diversos ecosistemas.

## CONCLUSIONES

Las determinaciones isotópicas se han vuelto más comunes y asequibles debido a la presencia de un creciente número de laboratorios ofreciendo análisis de isótopos estables. De igual forma, algunos investigadores que trabajan en disciplinas biológicas han encontrado diversas ventajas y formas de aplicación para las técnicas isotópicas, las cuales no son ofrecidas por otras técnicas analíticas. Un gran número de aplicaciones actuales más refinadas incluyen el marcaje de componentes o precursores biológicos específicos con isótopos estables pesados para posteriormente trazar estos componentes hacia diferentes tejidos e incluso células individuales. Un compuesto de interés puede separarse en subunidades más pequeñas (por ejemplo, por medio de cromatografía) y estas subunidades pueden ingresarse directamente en los espectrómetros IRMS para determinar los valores isotópicos individuales en aminoácidos, ácidos grasos, vitaminas, etc.

La facilidad de manipular los valores isotópicos de las plantas y sus productos por medio de nutrientes y medios de cultivo específicos, amplía el alcance de futuros estudios sobre fisiología y nutrición animal. Existe una gran variedad de ingredientes de origen vegetal, microbiano y animal que muestran un alto potencial para ser evaluados nutricionalmente usando isótopos estables debido a los contrastantes valores isotópicos que estas fuentes presentan de forma natural.

La creciente adopción del uso de análisis isotópicos, representa una oportunidad para trazar nutrientes y contaminantes en el medio natural, mientras que otra serie de estudios desarrollados en laboratorio se enfoca en la detección de productos alimenticios adulterados y fármacos falsos. Estas últimas aplicaciones presentan un significativo crecimiento y es posible prever la creación de centros de autenticación de productos en los cuales las técnicas isotópicas jueguen un papel central.



## LITERATURA CITADA

- Abrantes, K.G., M. Sheaves. 2010.** Importance of freshwater flow in terrestrial-aquatic energetic connectivity in intermittently connected estuaries of tropical Australia. *Marine Biology* 157: 2071-2086. DOI: 10.1007/s00227-010-1475-8
- Bell, J., T. Preston, J. Bron, R.J. Henderson, F. Strachan, K. Cooper, D.J. Morrison. 2007.** Discrimination of wild and cultured European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) using chemical and isotopic analyses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55(15): 5934-5941. DOI: 10.1021/jf0704561
- Bombero-Tuburan, I., N.G. Guanzon, Jr., G.L. Schroeder. 1993.** Production of *Penaeus monodon* (Fabricius) using four natural food types in an extensive system. *Aquaculture* 112: 57-65. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(93\)90158-U](https://doi.org/10.1016/0044-8486(93)90158-U)
- Cabañero, A.I., J.L. Recio, M. Rupérez. 2008.** Isotope ratio mass spectrometry coupled to liquid and gas chromatography for wine ethanol characterization. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 22: 3111-3118. doi: 10.1002/rcm.3711
- Carter, C.G., S.F. Owen, Z.Y. He, P.W. Watt, C. Scrimgeour, D.F. Houlihan, M.J. Rennie. 1994.** Determination of protein synthesis in rainbow trout, *Onchorhynchus mykiss*, using a stable isotope. *Journal of Experimental Biology* 189: 279-284. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9317802>
- Caut, S., E. Angulo, F. Courchamp. 2008.** Dietary shift of an invasive predator: rats, seabirds and sea turtles. *Journal of Applied Ecology* 45:428-437. 10.1111/j.1365-2664.2007.01438.x
- COFEMER. 2013.** Comisión Federal de Mejora Regulatoria. Dictamen final sobre el anteproyecto denominado Norma Oficial Mexicana NOM-047-PESC-2012 para la identificación del origen de camarones cultivados, de aguas marinas y esteros, marismas y bahías. 14 pp. [http://207.248.177.30/expediente/v99/\\_COFEME.13.0292.pdf](http://207.248.177.30/expediente/v99/_COFEME.13.0292.pdf) [accessed 1 July 2013].
- Delvin, E.E., J.L. Brazier, C. Deslandres, F. Alvarez, P. Russo, E. Seidman. 1999.** Accuracy of the (<sup>13</sup>C)-urea breath test in diagnosing *Helicobacter pylori* gastritis in pediatric patients. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition* 28:59-62. [http://journals.lww.com/jpgn/Abstract/1999/01000/Accuracy\\_of\\_the\\_13C\\_Urea\\_Breath\\_Test\\_in.14.aspx](http://journals.lww.com/jpgn/Abstract/1999/01000/Accuracy_of_the_13C_Urea_Breath_Test_in.14.aspx)
- Epp, M.A., 2002.** Stable isotopes in shrimp aquaculture. *World Aquaculture* 33: 18-19.
- Felton, L.A., P.P. Shah, Z. Sharp, V. Atudorei, G.S. Timmins. 2011.** Stable isotope-labeled excipients for drug product identification and counterfeit detection. *Drug Development and Industrial Pharmacy* 37: 88-92. doi:10.3109/03639045.2010.492397
- Flores, P., J. Fenoll, P. Hellin. 2007.** The feasibility of using <sup>15</sup>N and <sup>13</sup>C values for discriminating between conventionally and organically fertilized pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55: 5740-5745. DOI: 10.1021/jf0701180
- Fry, B. 2006.** *Stable Isotope Ecology*. Springer Science. Nueva York, USA, 390 pp.
- Gamboa-Delgado, J., J.M. Márquez-Reyes. 2016.** Potential of microbial-derived nutrients for aquaculture development. *Reviews in Aquaculture*. In press. doi: 10.1111/raq.12157
- Gamboa-Delgado, J., B. Fernández-Díaz, M.G. Nieto-López, L.E. Cruz-Suárez. 2016.** Nutritional contribution of torula yeast and fish meal to the growth of shrimp *Litopenaeus vannamei* as indicated by natural nitrogen stable isotopes. *Aquaculture* 453: 116-121. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.026>
- Gamboa-Delgado, J., C. Molina-Poveda, D.E. Godínez-Siordia, D. Villarreal-Cavazos, D. Ricque-Marie, L.E. Cruz-Suárez. 2014.** Application of stable isotope analysis to differentiate shrimp extracted by industrial fishing or produced through aquaculture practices. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 71(10): 1520-1528. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0005>
- Gamboa-Delgado, J., G.A. Rodríguez Montes de Oca, J.C. Román-Reyes, D. Villarreal-Cavazos, M. Nieto-López, L.E. Cruz-Suárez. 2017.** Assessment of the relative contribution of dietary nitrogen from fish meal and biofloc meal to the growth of shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Research* 48: 2963-2972. DOI: 10.1111/are.13129
- Houlihan, D.F., Carter, C.G., McCarthy, I.D. 1995.** *Protein turnover in animals*. Chapter 1. En: Nitrogen metabolism and excretion. Walsh, P.J. y P. Wright (Eds.). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA, pp. 1-31
- Kropf, U., T. Golob, M. Nečemer, P. Kump, M. Korošec, J. Bertoneclj, N. Ogrinc. 2010.** Carbon and nitrogen natural stable isotopes in Slovene honey: adulteration and botanical



and geographical aspects. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 58: 12794-12803. doi:10.1021/jf102940s.

**Moretti, V.M., G.M. Turchini, F. Bellagamba. 2003.** Traceability issues in fishery and aquaculture products. *Veterinary Research Communications* 27: 497-505. doi:10.1023/B:VERC.0000014207.01900.5c.

**Pearson, S.F., D.J. Levey, C.H. Greenberg, C. Martínez del Río. 2003.** Effects of elemental composition on the incorporation of dietary nitrogen and carbon isotopic signatures in an omnivorous songbird. *Oecologia* 135: 516-523. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1221-8>

**Phillips, D.L. 2012.** Converting isotope values to diet composition: the use of mixing models. *Journal of Mammalogy* 93: 342-352. <https://academic.oup.com/jmammal/article-lookup/doi/10.1644/11-MAMM-S-158.1>

**Phillips, D.L., J.W. Gregg. 2001** Uncertainty in source partitioning using stable isotopes. *Oecologia* 127: 171-179. (see also erratum, *Oecologia* 128: 204). doi:10.1007/s004420000578

**Primrose, S., M. Woolfe, S. Rollinson. 2010.** Food forensics: Methods for determining the authenticity of foodstuffs. *Trends in Food Science and Technology* 21: 582-590. doi:10.1016/j.tifs.2010.09.006.

**Rogers, K.M. 2009.** Stable isotopes as a tool to differentiate eggs laid by caged, barn, free range, and organic hens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57: 4236-4242. DOI:10.1021/jf803760s

**Serrano, R., M.A. Blanes, L. Orero. 2007.** Stable isotope determination in wild and farmed gilthead sea bream (*Sparus aurata*) tissues from the western Mediterranean. *Chemosphere* 69(7): 1075-1080. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.04.034.

**Salazar-García, D.C. 2009.** Interrogando a los muertos mediante isótopos estables. OrJIA (eds.) Actas de las II Jornadas de Jóvenes en Investigación Arqueológica (Madrid, 6, 7 y 8 de mayo de 2009). JIA 2009, Tomo II pp: 587-593. [https://www.academia.edu/4650774/Interrogando\\_a\\_los\\_muertos\\_mediante\\_is%C3%B3topos\\_estables](https://www.academia.edu/4650774/Interrogando_a_los_muertos_mediante_is%C3%B3topos_estables)

**Verschoor, A., H. Boonstra, T. Meijer. 2005.** Application of stable isotope tracers to studies of zooplankton feeding, using the rotifer *Brachionus calyciflorus* as an example. *Hydrobiologia* 546: 535-549. [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F1-4020-4408-9\\_54](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F1-4020-4408-9_54)

**Vinci, G., R. Preti, A. Tieri, S. Vieri. 2013.** Authenticity and quality of animal origin food investigated by stable-isotope ratio analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 93(3): 439-448. doi:10.1002/jsfa.5970.

**Yokoyama, H., K. Abo, Y. Ishihi. 2006.** Quantifying aquaculture-derived organic matter in the sediment in and around a coastal fish farm using stable carbon and nitrogen isotope ratios. *Aquaculture* 254, 411-425. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.10.024>

**Zhang, L., J. Pan, C. Zhu. 2012.** Determination of the geographical origin of Chinese teas based on stable carbon and nitrogen isotope ratios. *Journal of Zhejiang University- Science B* 13: 824-830. doi: 10.1631/jzus. B1200046

**Zimmo, S. J. Blanco, S. Nebel. 2012.** The use of stable isotopes in the study of animal migration. *Nature Education Knowledge* 3(12): 3. <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-use-of-stable-isotopes-in-the-96648168>

# LA NANOTECNOLOGÍA EN LAS CIENCIAS BIOLÓGICAS

Armendáriz Barragán B.<sup>1,3</sup>, Álvarez Román R.<sup>2</sup>, Elaissari A.<sup>3</sup>, Hatem F.<sup>3</sup>, Oranday Cárdenas A.<sup>1</sup>, Galindo Rodríguez S.A.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas, Departamento de Química Analítica. Av. Pedro de Alba s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 66455. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. Tel. +52 (81) 14 93 93 10.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Medicina, Departamento de Química Analítica. Av. Francisco I. Madero y Dr. Aguirre Pequeño s/n, Mitras Centro, C.P. 64460. Monterrey, Nuevo León, México. Tel. +52 (81) 83 29 41 54.

<sup>3</sup>Université Claude Bernard Lyon I, Laboratoire d'Automatique et des Génie des Procédés (ESCP, CNRS UMR 5007). Bât. 308G, 43 Bd. 11 du Novembre 1918, 69622. Villeurbanne, Cedex, Francia. Tel. +33 (0)4 72 43 18 45.

\*sergio.galindord@uanl.edu.mx



**PALABRAS CLAVE:** *nanotecnología, nanomateriales, nanomedicina.*

## RESUMEN

La Nanotecnología ha acompañado al hombre en varias etapas de su evolución, permitiendo el desarrollo de productos innovadores que han mejorado su calidad de vida. Actualmente, ésta es una de las áreas de mayor crecimiento a nivel mundial en lo que a investigación y aplicación tecnológica se refiere. En este contexto, áreas de las Ciencias Biológicas en constante desarrollo, como la agricultura, los alimentos, el medio ambiente y la medicina, han incorporado avances nanotecnológicos de alto impacto en los últimos años. Dentro de los productos desarrollados con mayor aplicación se incluyen nanomateriales, nanosistemas de liberación, nanopelículas, nanorobots, nanodispositivos electrónicos, nanotubos de carbono y nanopartículas metálicas, entre otros. El presente trabajo aborda los principales productos desarrollados a partir de la nanotecnología y su aplicación en las Ciencias Biológicas, destacando la importancia y el avance que otorgan a la vida del hombre.

## INTRODUCCIÓN

En el siglo XVII, con el invento del microscopio de Robert Hooke se abre por primera vez la posibilidad de estudiar y entender el comportamiento de la materia a escalas invisibles para el ojo humano. Sin embargo, en épocas anteriores de la historia de la humanidad, ya había indicios sobre el efecto de manipular la materia para cambiar sus propiedades visibles. Se sabe que las pinturas que los egipcios y chinos utilizaban para colorear sus vitrales y objetos cerámicos estaban constituidas por oro coloidal, es decir, nanopartículas de oro suspendidas en un medio líquido. Debido a sus características físicas, estas nanopartículas absorben una parte de la luz visible de manera diferente dependiendo de su tamaño, su forma o la orientación de la fuente de luz, ofreciendo una amplia gama de colores, que van del rojo al azul. Así como éste, existen diversos ejemplos de cómo los materiales a escala nanométrica cambian radicalmente sus propiedades y comportamiento, permitiendo así, utilizar sus características fisicoquímicas para incrementar al máximo su aprovechamiento en tecnologías benéficas para el ser humano. En este contexto, la presente revisión pretende acercar al lector a la revolución invisible en las Ciencias Biológicas: la Nanotecnología.

## ¿QUÉ ES LA NANOTECNOLOGÍA Y CÓMO MODIFICA LA MATERIA?

De manera general, la Nanotecnología se define como el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a escala nanométrica; esto incluye, la explotación de fenómenos y propiedades que presenta la materia a nivel atómico o molecular (Figura 1).

Ahora bien, ¿Cómo con la Nanotecnología se logra un cambio tan grande en las propiedades fisicoquímicas de la materia? Esto se debe a que cualquier modificación de la materia se acompaña de un cambio radical en las relaciones que los objetos mantienen sobre los otros objetos. Considerando lo anterior, la reducción sobre el tamaño de un objeto en un factor de 2x, implica una reducción sobre su superficie de 4x y una reducción sobre su volumen de 8x. Para comprender lo anterior, si se tiene un individuo que mide 1.80 m con un peso de 80 kg es capaz, a *grosso modo*, de poder llevar una carga equivalente a su peso. Pero ¿Qué pasa si reducimos su tamaño en un factor de 100, es decir a sólo 18 mm? Su fuerza será reducida a un factor de 10,000 veces. Así, él sólo podría cargar alrededor de 8 g y su peso habrá disminuido en un factor de 1,000,000, con sólo 80 mg de peso, el individuo podrá cargar 100 veces su peso. Un principio similar es el que explica la capacidad que tienen las hormigas para levantar en promedio 20 veces su peso.

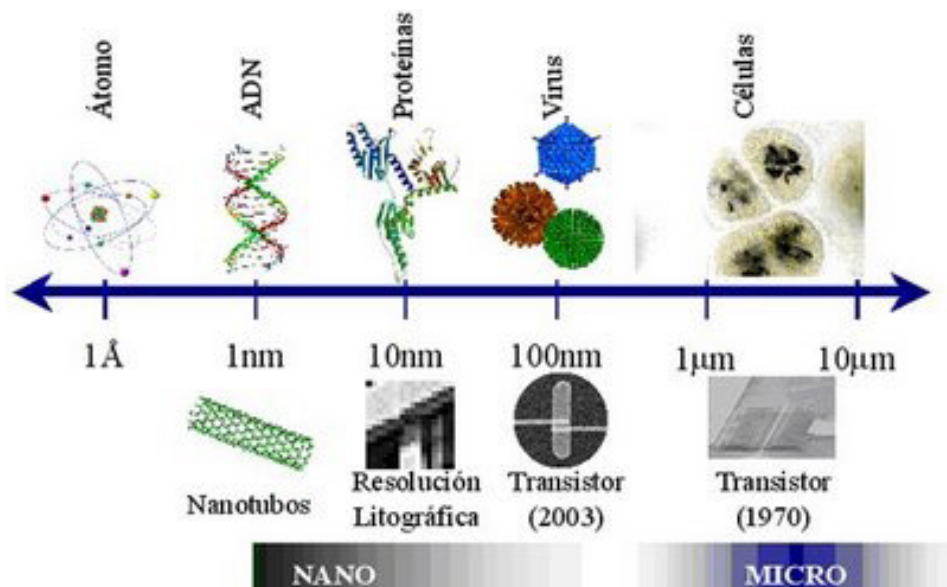
Si la analogía anterior se transfiere a todos los cambios de tamaño a escala nanométrica que se pueden realizar sobre, prácticamente, cualquier tipo de material, se vuelve evidente que el aprovechamiento de estos fenómenos puede aumentar las ventajas que presentan los objetos elaborados con o a partir de dicho nanomaterial y, por lo tanto, permitir la generación de nuevos e innovadores productos.

## APROVECHAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE LA MATERIA A ESCALA NANOMÉTRICA EN DIVERSAS ÁREAS

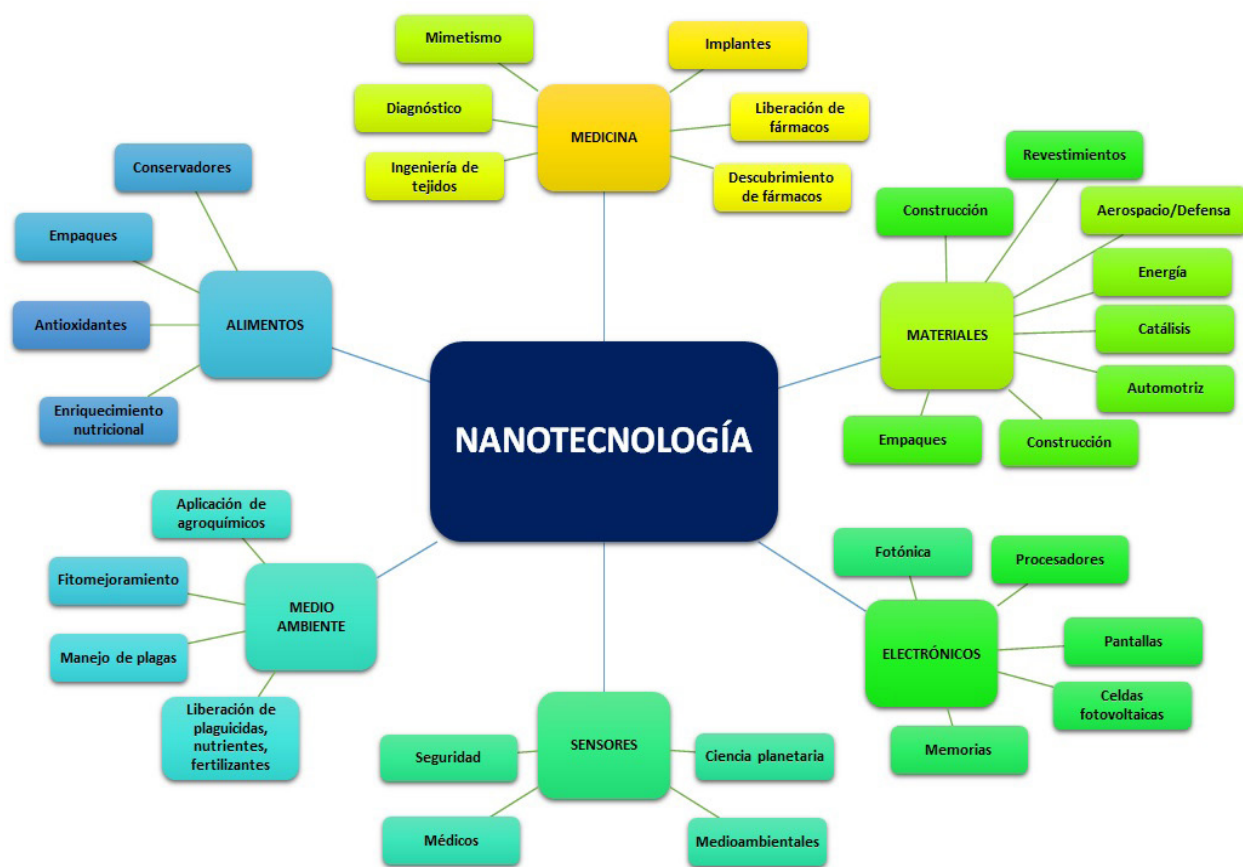
La Nanotecnología ha venido a revolucionar diversos aspectos implicados en la vida cotidiana del hombre. Al ser un área de estudio completamente multidisciplinaria, necesita de la incorporación de conocimientos generados, a su vez, en otras disciplinas. Campos como la biología molecular, física, química, medicina, informática e ingeniería, son tan sólo algunos de los que nutren a la Nanotecnología aplicada. Es precisamente, este aspecto multidisciplinario el que le confiere a la Nanotecnología una aplicación tan variada y extensa dentro de diversos aspectos de la vida, por lo que, hoy en día, los productos y servicios generados a través de la Nanotecnología invaden, poco a poco, las industrias y el mercado mundial (Figura 2). Evidentemente, esta área ha venido a revolucionar la existencia del hombre, marcando una tendencia mundial hacia el uso de la misma para la resolución de diversos problemas.

A continuación, se enumeran algunos de los avances tecnológicos más importantes generados a través de la Nanotecnología, los cuales han tenido como fin el desarrollo de diversos sectores relacionados con la Biología, entre los que destacan los alimentos, la agricultura, el medio ambiente, los materiales médicos y la medicina.





**Figura 1.** Diagrama dimensional de objetos con tamaños dentro de las micro- y nano-escalas. (Tomado del sitio electrónico: <http://www.nanotecnologia.cl/que-es-nanotecnologia/>)



**Figura 2.** Avances tecnológicos basados en la aplicación de la Nanotecnología.

## APLICACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA EN DIFERENTES SECTORES

### NANOTECNOLOGÍA EN LOS ALIMENTOS

Uno de los sectores con mayor interés para el hombre es la Nanotecnología en alimentos. En particular, la Nanotecnología representa una de las alternativas más innovadoras para resolver problemas relacionados con el incremento nutricional de los alimentos, el aumento en su vida de anaquel y el mejoramiento de empaques que los contienen (Figura 3).

En este contexto, la protección de los alimentos contra el deterioro bacteriano ha sido uno de los principales objetivos a cumplir por medio del uso de la Nanotecnología. El deterioro bacteriano de los alimentos sucede durante su producción, procesamiento, transporte y almacenaje. Agentes *nanoantimicrobianos* han demostrado tener efectos significativos al contrarrestar el deterioro de distintos alimentos. Químicamente, estos antimicrobianos pueden estar constituidos de nanomateriales metálicos y óxidos metálicos. Debido a sus propiedades fisicoquímicas, estos nanomateriales incrementan la formación de especies óxido reactivas que, en alta concentración, generan daño celular a los

microorganismos. Un ejemplo es la plata coloidal, la cual ha sido utilizada desde hace varios años para este fin, mostrando una alta eficiencia y poca migración de iones a los alimentos. Adicionalmente, zeolitas con plata han sido autorizadas por la FDA (*Food & Drug Administration*, agencia de los Estados Unidos de América) para la desinfección de los artefactos que están en contacto con los alimentos (US FDA, 2015a).

Otro tipo de materiales, los nanocompositos poliméricos, los cuales se definen como materiales compuestos de nanopartículas metálicas y polímeros en una dispersión homogénea, han sido utilizados para el mismo fin. Por ejemplo, empaques elaborados con nanocompositos de ZnO/gelatina (Arfat *et al.*, 2016; Shankar *et al.*, 2015; Umamaheswaria *et al.*, 2015) (FPI, ZnO/policarbonato (Dhapte *et al.*, 2015) y ZnO/ácido poliláctico (De Silva *et al.*, 2015; Marra *et al.*, 2016) se han propuesto para el diseño de empaques evitando la migración de iones al alimento. Así mismo, nanocomplejos de cobre coloidal u ZnO con quitosán, poliestireno, polivinilprolidona y cloruro de polivinilo se han utilizado en películas para inhibir el crecimiento microbiológico en alimentos (Cárdenas *et al.*, 2009; Jin *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2009).

Otro aspecto que ha llamado la atención en los alimentos es el incremento de la biodisponibilidad



Figura 3. Potenciales aplicaciones de la Nanotecnología en los alimentos.

(Adaptado del sitio electrónico del Consejo Europeo de Información Alimentaria, EUFIC: <http://www.eufic.org/en/food-production/article/opportunities-for-nanotechnology-in-food-and-feed>)

de compuestos bioactivos, que funcionan como suplementos nutricionales. Así, compuestos como la coenzima Q10, vitaminas, hierro, calcio, curcumina, entre otros, se han incorporado en sistemas de liberación nanométricos. Dichos nanosistemas poseen propiedades fisicoquímicas que permiten una mayor biodisponibilidad de las moléculas encapsuladas cuando se administran por vía oral. Por ejemplo, la Coenzima Q10, un compuesto altamente hidrofóbico y, por lo tanto, difícil de absorber y de incorporar en formulaciones alimenticias, se formuló en un novedoso nanosistema con surfactantes libre de lípidos, demostrando un incremento en su incorporación y biodisponibilidad, así como en la permeación intestinal (Zhou *et al.*, 2014). Por otro lado, nanoemulsiones (o/w) de catequinas, obtenidas del té verde, han permitido incrementar su permeación gastrointestinal (Bhushani *et al.*, 2016).

Otro grupo de compuestos bioactivos utilizados para prevenir la oxidación y el daño de los alimentos por agentes externos, son los antioxidantes. Para permitir mayor residencia y protección de los antioxidantes aplicados, nanosistemas poliméricos y metálicos se han propuesto para este fin. Por ejemplo, para controlar la oxidación en cortes de frutas y verduras, nanopartículas de ZnO han sido aplicadas directamente sobre los empaques de estos alimentos; esto ha mostrado mantener la frescura de manzanas "Fuji" bajo condiciones de anaquel (Li *et al.*, 2011). En otro estudio, cortes de manzanas de la variedad "Red Delicious" fueron tratadas con nanocápsulas de  $\alpha$ -tocoferol, lo que mostró disminuir de manera significativa el índice de oxidación del producto (Zambrano-Zaragoza *et al.*, 2014)

Para mejorar la apariencia de los alimentos, la FDA aprobó el uso de  $\text{TiO}_2$  como nanoaditivo de color en alimentos, siempre y cuando no exceda el 1% (p/p) dentro del producto (US FDA, 2002). En el caso de mezclas de nanoaditivos de color elaborados con  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  y/o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pueden ser utilizados sin exceder el 2% (p/p) (US FDA, 2015b).

También los nanocompositos poliméricos con silicatos han sido utilizados para la elaboración de empaques con el fin de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas en términos de resistencia de tensión, rigidez, permeabilidad a gases, resistencia al agua y

al calor, entre otras. Dichos empaques resisten mejor la tensión, el calor y se pueden utilizar en métodos de protección a la luz UV (Laoutid *et al.*, 2009; Lizundia *et al.*, 2016; Podsiadlo *et al.*, 2007).

Es evidente que la investigación en el campo de la Nanotecnología aplicada en alimentos ha generado un incremento en el potencial de la misma para expandir su uso en esta área y, por lo tanto, una mayor exposición de los humanos, directa o indirectamente, ante tales productos. Hoy en día existen pocos estudios toxicológicos orientados a los posibles efectos de los alimentos que incorporan cualquier tipo de nanomaterial, por lo que, la Nanotoxicología en alimentos debería de ser una disciplina que se desarrolle a la par de la aplicación tecnológica.

## LA NANOTECNOLOGÍA EN LA AGRICULTURA

Como en otras áreas, la Nanotecnología también ha venido a revolucionar la agricultura mundial. Actualmente, la agricultura es un campo que se enfrenta a múltiples desafíos ante la gran demanda de productos agrícolas por parte de los consumidores. La Nanotecnología podría aportar avances significativos al desarrollo de la agricultura (Figura 4). Las principales investigaciones dentro de este campo incluyen: i) el manejo de plagas y protección a cultivos, ii) el uso de nanomateriales para evitar la dispersión de grandes cantidades de agroquímicos, iii) la aplicación de nanosistemas para la liberación efectiva y prolongada de pesticidas, nutrientes y fertilizantes, iv) el diseño de nanodispositivos para el fitomejoramiento y transformación genética de cultivos y v) la elaboración de nanopartículas por plantas para la producción de nanomateriales (Parisi *et al.*, 2015). Particularmente, para la protección de productos agroquímicos (p.e. pesticidas y biopesticidas) se han utilizado nanosistemas de liberación, como nanocápsulas, nanopartículas y nanoemulsiones. Por ejemplo, se han preparado nanocápsulas de poli- $\epsilon$ -caprolactona (PCL) para encapsular herbicidas como la ametrina, atrazina y simazina. Particularmente, la encapsulación de atrazina permitió no sólo controlar el crecimiento de las especies blanco, sino también obtener una formulación segura para especies no blanco. Además, las nanocápsulas cargadas con el compuesto activo fueron estables y redujeron la dispersión de la atrazina (Pereira *et al.*, 2014). Por otro lado, nanopartículas de

ZnO recubiertas con macronutrientes (fertilizantes) fueron elaboradas con el fin de mejorar la absorción de estos nutrientes en plantas en sitios específicos (Milani *et al.*, 2012).

En cuanto a las estrategias para mejorar la calidad de los suelos, nanomateriales como la zeolita y nanoarcillas han sido empleados para la retención de agroquímicos y agua (Geohumus GmbH, 2017). Aunado a esto, filtros basados en nanomateriales (p.e. membranas con nanopartículas de TiO<sub>2</sub>) han permitido mejorar la calidad del agua de riego en cultivos, eliminando sustancias tóxicas, como pesticidas y herbicidas (McMurray *et al.*, 2006). Por otro lado, los dispositivos electrónicos que se utilizan para la detección de pesticidas en suelos han adoptado avances basados en la Nanotecnología, incorporando nanobiosensores con liposomas (Vamvakaki y Chaniotakis, 2007).

Los ejemplos mencionados evidencian como la Nanotecnología, en conjunto con otras disciplinas, ha permitido establecer nuevas pautas para los desafíos agrícolas que el mundo requiere. En un futuro no muy lejano se advierte que la Nanotecnología será una de las áreas que brinde mejores e innovadoras soluciones a los problemas que enfrenta este sector tan importante en el desarrollo humano.

## LA NANOTECNOLOGÍA MEDIOAMBIENTAL

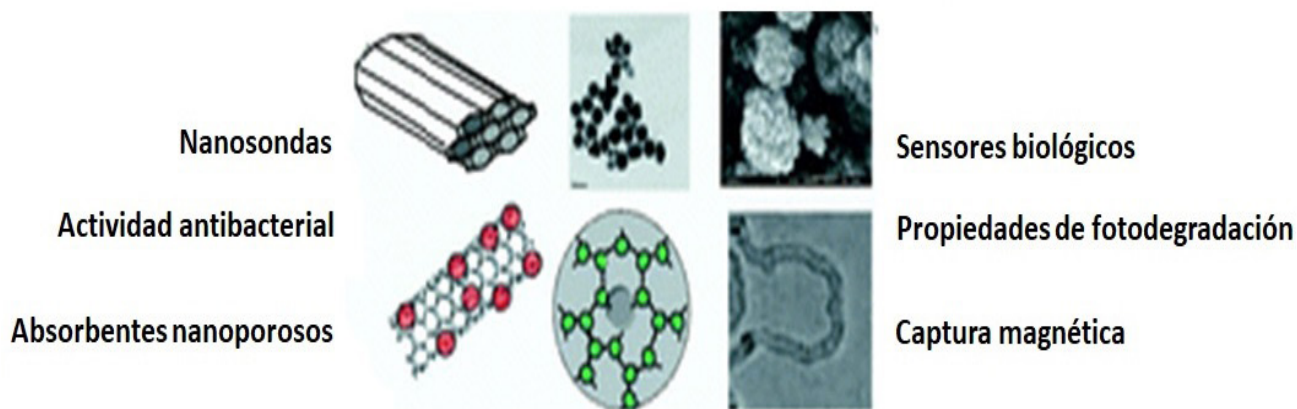
Otro de los sectores que más preocupa a la sociedad y a la economía mundial es el medio ambiente, por lo que los grandes avances tecnológicos que se requieren en esta área van de la mano del desarrollo y aplicación de la Nanotecnología (Figura 5). Posiblemente, durante los próximos años, la Nanotecnología jugará un papel importante en el sector medioambiental, debido a que existen dos preocupaciones principales. Por un lado, los altos índices de contaminación y acumulación de sustancias nocivas han provocado una contingencia ambiental severa, por lo que, los avances basados en la Nanociencia serán primordiales para la solución de este problema. Por otro lado, el incremento en el uso de nanomateriales, y tecnología derivada de los mismos, ha aumentado la preocupación mundial porque se conoce poco o casi nada sobre sus posibles efectos nocivos y acumulación en el medio ambiente, por lo que, en los próximos años, la Nanotoxicología ambiental se convertirá en un área de estudio muy importante.

Con el objetivo de abordar la problemática de la contaminación ambiental, nanopartículas de diferentes agentes oxidantes, reductores y nutrientes han sido implementados para promover



**Figura 4.** Potenciales aplicaciones de la Nanotecnología en la agricultura. (Adaptado de Front. Environ. Sci., 22 March 2016. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>)





**Figura 5.** Aplicaciones nanotecnológicas en el medio ambiente.  
(Adaptado del sitio electrónico: <http://www.lawandenvironment.com/2009/12/16/nanotechnology-epa-regulations-on-the-horizon/>)

la transformación de contaminantes y estimular el crecimiento bacteriano de consorcios que puedan degradar a dichas sustancias. Por ejemplo, nanopartículas de ZnO han mostrado tener propiedades como sensores y fotocatalizadores para el tratamiento de fenoles clorados (Kamat *et al.*, 2002). Además, las nanopartículas pueden ser ancladas a matrices sólidas como carbón, zeolita o membranas y así, incrementar la eficiencia en el tratamiento de agua, purificación de aguas residuales o contaminantes atmosféricos emitidos por industrias (Ponder *et al.*, 2000) reducing the chromium to Cr(III).

Las nanopartículas bimetálicas elaboradas con fierro/paladio, fierro/plata o zinc/paladio pueden servir como potentes agentes “reductores” y catalíticos de compuestos contaminantes, tales como, policlorobifenilos, organoclorados, pesticidas y solventes orgánicos halogenados (Zhang *et al.*, 1998) Pd/Zn, Pt/Fe, Ni/Fe.

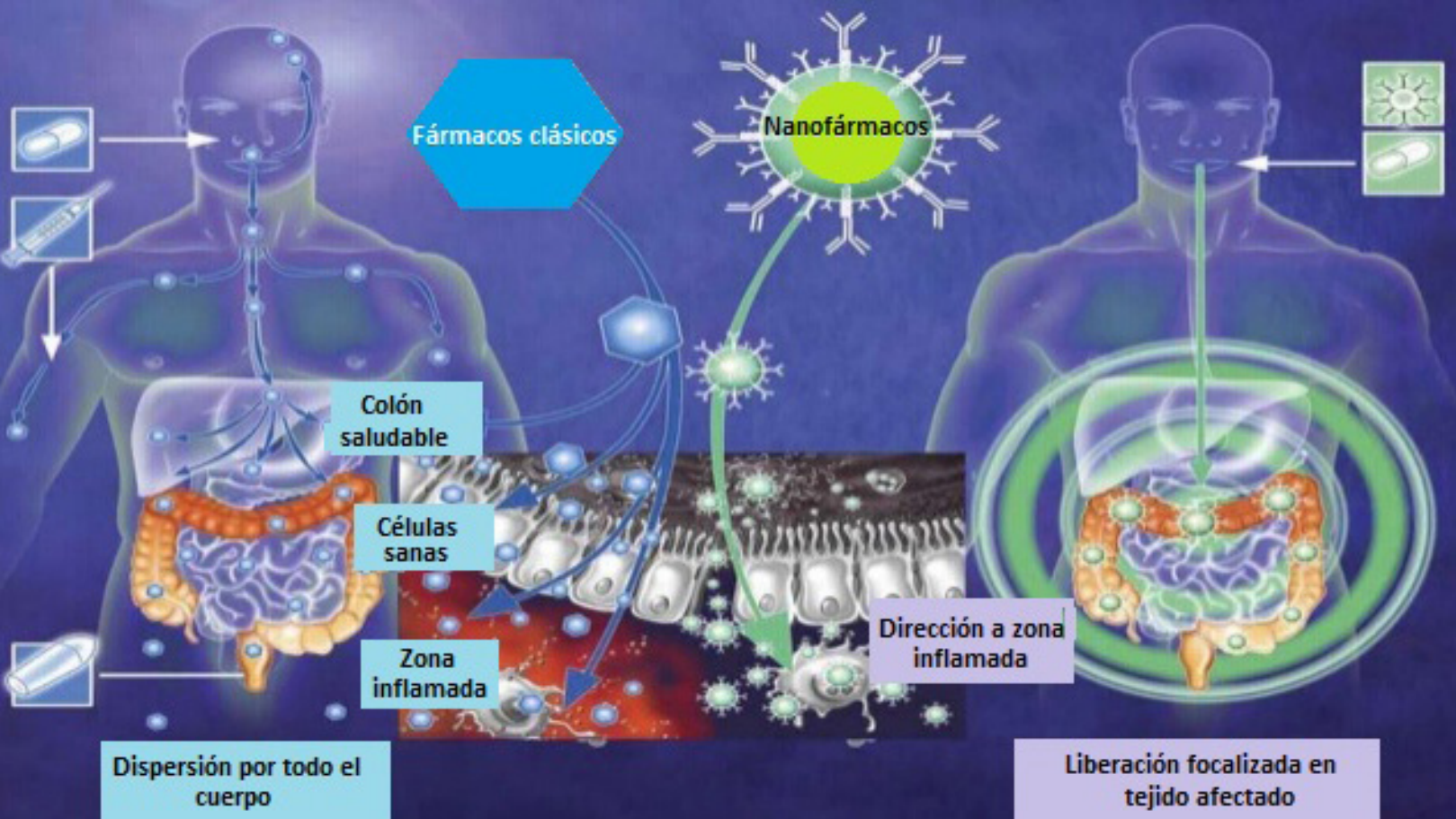
Por su parte, sistemas como los nanotubos de carbón han despertado gran interés en la remediación medioambiental, al ser declarados “absorbentes superiores” de dioxinas. Se ha demostrado que los nanotubos pueden absorber dioxinas hasta tres veces más que el carbón activado convencional (Long y Yang, 2001). Así mismo, la manipulación a nanoescala de materiales como agentes quelantes en nanoestructuras como dendrímeros, que son

utilizados en la fabricación de soportes poliméricos de ultrafiltración, permite un proceso de ultrafiltración más eficiente y dirigido hacia el contaminante que se requiere remover, disminuyendo costos durante este proceso (Diallo *et al.*, 1999).

Durante los últimos años, con la aplicación de la Nanotecnología medioambiental se han podido diseñar nuevos y mejores dispositivos para la detección de contaminantes. Nanotubos sensores han mostrado tener un alto nivel de detección de dióxido de nitrógeno o amonio en comparación con los sensores convencionales (Kong *et al.*, 2000). Particularmente, nanoredes de silicón han sido diseñadas para crear dispositivos sensores en tiempo real más eficientes, con el objetivo de detectar especies químicas. Si, además, estos sensores son funcionalizados con anticuerpos, pueden no sólo detectar metabolitos bacterianos, sino también, patógenos presentes en agua, alimentos y aire (Cui *et al.*, 2001).

## LA NANOTECNOLOGÍA APLICADA AL ÁREA DE LA SALUD: NANOMEDICINA

La medicina es una de las disciplinas con mayor crecimiento tecnológico debido a la constante demanda de nuevas estrategias de tratamiento y de manejo de afecciones médicas por parte de la población mundial,. Durante las últimas décadas, dentro de las Ciencias



**Figura 6.** Liberación de fármacos a partir de sistemas nanométricos.

Biológicas, la Nanomedicina se ha convertido en uno de los sectores con mayor inversión económica para su desarrollo e investigación. En general, la Nanomedicina se define como la rama de la medicina que utiliza los conocimientos y avances de la Nanotecnología para mejorar la salud y la calidad de vida de los seres humanos. Lo anterior incluye el diseño y uso de nanomateriales, nanodispositivos, nanosistemas de liberación y nanorobots, entre otros, con el objetivo de prevenir, tratar y restablecer diversas afecciones médicas.

Uno de los avances tecnológicos más estudiados dentro de la Nanomedicina es el uso de sistemas para la liberación de fármacos y compuestos biológicamente activos (Figura 6). Con el objetivo de regular el desarrollo de las células madre con potencial aplicación en la medicina regenerativa, diversas nanoestructuras como, nanopartículas metálicas, *quantum dots* y nanotubos de carbono han sido empleadas con éxito en la diferenciación de dichas células pluripotenciales para desarrollar terapias que ayuden en la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades en humanos (Wang *et al.*, 2009). Además, nanosistemas acarreadores de biomoléculas se han probado para detectar las deficiencias nutricionales de las células madre y permitir la liberación controlada de las biomoléculas necesarias para el desarrollo de las mismas. Esta aplicación tecnológica presenta un avance importante en ingeniería de tejidos y tiene un gran potencial en aplicaciones biomédicas.

Otros ejemplos en los que la Nanomedicina ha encontrado aplicaciones interesantes es el uso de nanopartículas de oro para ayudar al diagnóstico de cáncer (Boisseau y Loubaton, 2011) y el uso de liposomas como adyuvantes en vacunas y para la liberación controlada de diversos fármacos (University of Waterloo, 2010).

Particularmente, diversas formulaciones basadas en nanopartículas han sido estudiadas para la liberación de fármacos. Debido a sus características fisicoquímicas, este tipo de nanosistemas permiten el transporte y liberación controlada del fármaco en el área afectada, disminuyen el número de dosis y los efectos secundarios. Actualmente, existe en el mercado *Abraxane*<sup>®</sup> (Celgene Corporation). Esta formulación contiene el paclitaxel en nanopartículas de albúmina, la cual es utilizada con éxito en la terapia del cáncer de pulmón, páncreas y de mama (Celgene Corporation, 2015) (Figura 7). Por otro lado, el fármaco doxorubicina ha sido formulado en liposomas unidos a nanoesferas de óxido de hierro. Esta formulación fue aplicada en ratones afectados por células cancerígenas de mama, posteriormente, por medio de radiofrecuencia la parte metálica de la nanoformulación se hizo vibrar para generar el rompimiento de los liposomas cargados. Esta terapia mostró detener el crecimiento tumoral en comparación con el tratamiento convencional que se sigue con la doxorubicina (Garde, 2012; Peiris *et*

al., 2012). Dicho estudio abre la pauta para la aplicación exitosa, no sólo de nanoformulaciones, sino también para innovar en la manera como se aplican las terapias en afecciones como el cáncer.

El uso de nanopartículas de polietilenglicol cargadas con fármacos antibióticos ha permitido lograr tratamientos más eficientes contra infecciones bacterianas, al focalizar la liberación del activo de manera precisa dentro del cuerpo (Trafton, 2012). Así, nanopartículas que contenían cadenas de histidina (moléculas marcadoras) ligadas a su cubierta probaron destruir a un conjunto de bacterias resistentes a antibióticos, al permitir una liberación sostenida del antibiótico utilizado (Radovic-Moreno et al., 2012).

Por otro lado, con el propósito de disolver coágulos sanguíneos, investigadores de la Universidad de Harvard, recientemente, utilizaron nanopartículas cargadas de anticoagulantes, las cuales fueron marcadas para unirse selectivamente a las plaquetas, permitiendo así la disolución del coágulo (Wyss Institute, 2012).

Recientemente, en un novedoso estudio, nanopartículas elaboradas a partir de membranas de bacterias mutantes fueron cargadas con paclitaxel, cetuximab y anticuerpos específicos. Posterior a la aplicación en cultivo celular, las células cancerígenas engulleron las nanopartículas, provocando mayor mortalidad con menos dosis de los fármacos anticancerígenos (ECCO, 2012; Elvidge, 2012).

Considerando el tamaño tan pequeño de las nanopartículas, éstas han sido utilizadas en el área de radioimagen y diagnóstico. Por ejemplo, los *quantum dots*, al presentar emisión de luz en función de su tamaño, pueden utilizarse en conjunto con imagen por resonancia magnética, lo cual produce excepcionales imágenes de tumores. Estas nanopartículas son más brillantes y sólo necesitan una fuente de luz para su excitación, lo que produce imágenes con mejor contraste en comparación con los medios de contraste orgánicos convencionales. Otra estrategia nanotecnológica diseñada recientemente son las nanoredes empleadas

para preparar dispositivos sensores, los cuales pueden detectar proteínas u otros biomarcadores tumorales, otorgando la oportunidad de localizar no sólo tumores, sino células cancerígenas mucho antes de que se desarrolle un acúmulo cancerígeno (Nie et al., 2007). A la par de un buen diagnóstico, es importante estudiar tecnologías que permitan radioterapias más eficientes. En este contexto, nanopartículas metálicas de oro o plata se han biodirigido a tumores al unir en su cubierta anticuerpos específicos. Una vez localizadas en el tumor, la radioterapia es aplicada, lo que aumenta la temperatura del nanomaterial, permitiendo la destrucción térmica localizada de las células cancerígenas (Zheng et al., 2005). Otro ejemplo destacable, es el uso de nanopartículas de cadmio (*quantum dots*), las cuales, al ser inyectadas quirúrgicamente en los tumores y posteriormente, aplicar luz UV, resplandecen, permitiendo localizar y extirpar el tumor con mayor facilidad (Loo et al., 2004).

Otras de las nanoestructuras más estudiadas en el sector de la salud son los nanomateriales. Particularmente, en Odontología diversos nanomateriales se han empleado con éxito. Por ejemplo, nanorellenos elaborados a partir de resinas adicionadas con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> ofrecen alta resistencia al desgaste, fuerza y mejor estética al permitir un mejor proceso de pulido y lustrado. Existen nanorellenos compuestos por polvos de



**Figura 7.** Abraxane®, nanomedicina utilizada para el tratamiento del cáncer (Celgene Corporation)



partículas de aluminio y silicatos. Estos nanorellenos tienen dureza superior, mayor flexibilidad, mayor elasticidad y menos contracción del material (Freitas, 2005; Sivaramakrishnan y Neelakantan, 2014).

Dentro de los avances quirúrgicos, una innovadora suspensión compuesta de nanopartículas recubiertas de oro, al ser aplicada en un corte de tejido o dos tejidos adyacentes, ha mostrado mantener unido el corte sin necesidad de sutura (Gobin *et al.*, 2005).

En cuanto al combate contra el desarrollo de farmacoresistencia por parte de agentes etiológicos (bacterias, hongos, virus), nanopartículas de ZnO han sido aplicadas en conjunto con los antibióticos normalmente utilizados (p.e. ciprofloxacino). La combinación de estas terapias demostró que las nanopartículas de ZnO interfieren con las proteínas encargadas del desarrollo de resistencia al antibiótico, lo que disminuye su farmacoresistencia y, por lo tanto, incrementa la eficiencia del fármaco utilizado (Banoee *et al.*, 2010).

Por su parte, nanopartículas biodegradables cargadas con diversos fármacos antituberculosos prometen ser una solución ante el desarrollo de resistencia por la bacteria que causa la tuberculosis. En diversos estudios, las nanoformulaciones mostraron altas tasas de mortalidad de la bacteria con menores dosis de los antibióticos, así como, menor toxicidad al ser aplicadas en modelos *in vivo* (p.e. ratones o cuyos) (Pandey y Ahmad, 2011). Nuevamente, los avances en los nanosistemas de liberación controlada de fármacos para la encapsulación de agentes antituberculosos pueden conducir a una terapia más efectiva y asequible de la tuberculosis.

El desarrollo de textiles que incorporen nanoestructuras que presenten actividad antibacteriana (p.e. nanotubos de carbono, nanopartículas cargadas de antibióticos, nanopartículas metálicas, entre otros) también han sido desarrollados para ser utilizados en la curación o protección de heridas, disminuyendo la posibilidad de contaminación e infección en el área afectada (Fouda *et al.*, 2013).

Actualmente, el diseño y desarrollo de nanorobots para funcionar como dispositivos que permitan la detección, monitoreo o reguladores de diversas terapias al ser

introducidos en el cuerpo humano ya es una realidad para los médicos gracias a los avances nanotecnológicos en la medicina. Sin embargo, para el empleo de estos nanodispositivos tan complejos, es necesario el desarrollo de investigaciones mucho más detalladas que permitan implementar su uso formal en humanos.

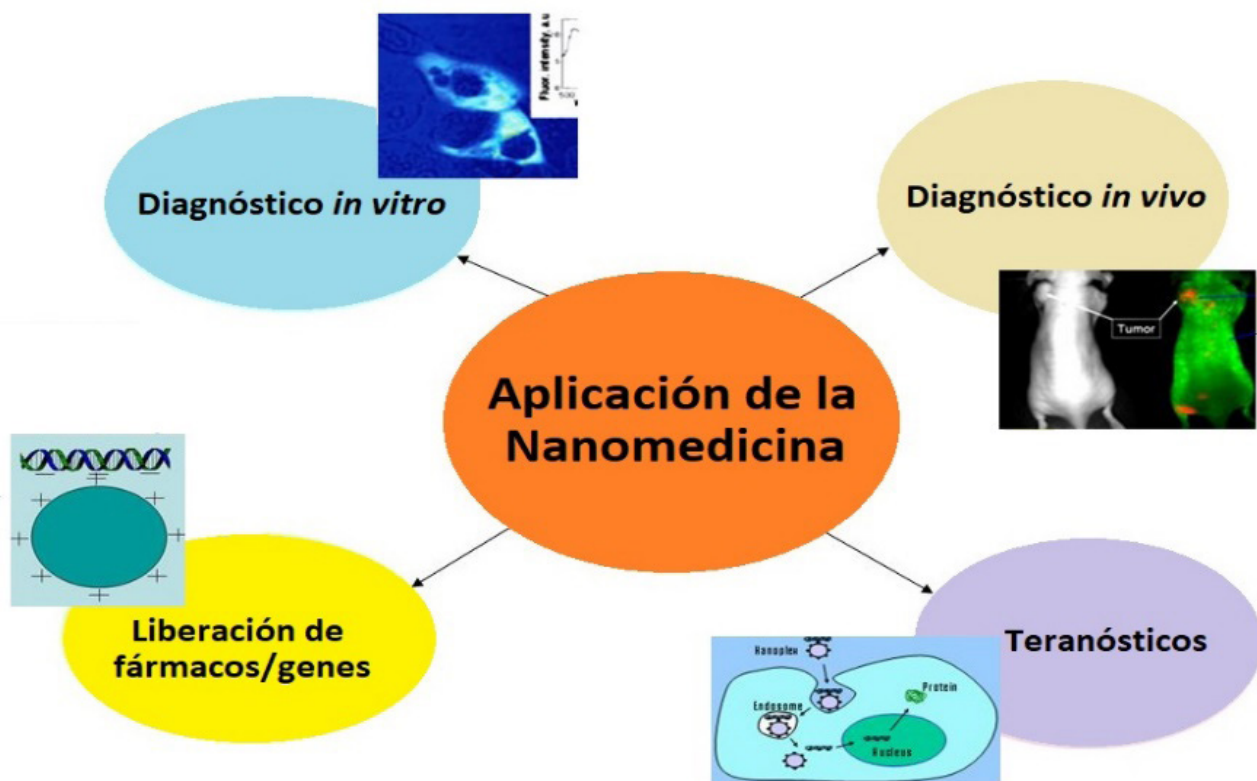
Con los ejemplos expuestos, es evidente que la Nanotecnología sin duda jugará un papel primordial dentro de la medicina durante los próximos años. Particularmente, las terapias basadas en el uso de nanosistemas de liberación de fármacos y el uso de nanomateriales son dos de las herramientas que prometen aumentar la eficiencia de los tratamientos aplicados en padecimientos importantes como cáncer, infecciones por agentes farmacoresistentes a antibióticos y enfermedades crónico-degenerativas, así como, en radioterapia y diagnóstico (Figura 8).

## LA NANOTECNOLOGÍA LA FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Actualmente, la Facultad de Ciencias Biológicas (UANL) cuenta con investigaciones importantes en el área de la Nanotecnología aplicada. Particularmente, el Laboratorio de Nanotecnología encabezado por el Dr. Sergio A. Galindo Rodríguez se especializa en el diseño y desarrollo de sistemas de liberación a escala nanométrica, particularmente nanopartículas poliméricas, para potencializar la actividad biológica de compuestos individuales (naturales y sintéticos), extractos vegetales y sus fracciones, así como de aceites esenciales, con el objetivo de tratar enfermedades como la tuberculosis (Armendáriz Barragán, 2012; Armendáriz *et al.*, 2016), las dermatomicosis (Velázquez Dávila, 2017) y la periodontitis (Díaz Zarazua, 2016; Hernández Vela, 2016); también se han desarrollado investigaciones para prevenir enfermedades en piel (Cavazos Rodríguez, 2011; Silva Flores, 2015-en proceso). En el área de los alimentos, se han desarrollado nanoformulaciones para aumentar la vida de anaquel de productos hortofrutícolas y favorecer la biodisponibilidad de antioxidantes (Guerrero Barbosa, 2017). Dentro del campo de la formulación de insecticidas, recientemente, una investigación mostró que la incorporación de aceite esencial de *Schinus molle* impide el desarrollo larvario de la plaga generada por *Musca domestica* (Villegas Ramírez, 2017). En cuanto al control de vectores transmisores de enfermedades infecciosas

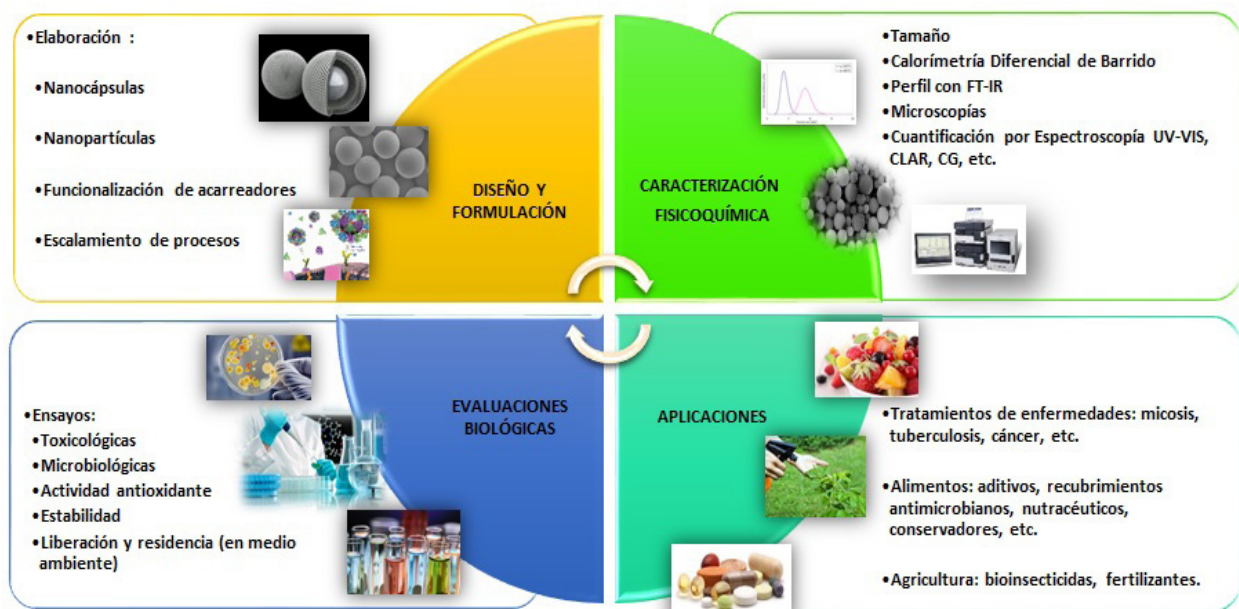


(p.e. *Aedes aegypti*) como dengue, chicungunya y zika, entre otras, diversas nanoformulaciones elaboradas con aceites esenciales o extractos han demostrado una eficiente actividad larvicida del vector (Figueroa Espinoza, 2014; Salas Cedillo, 2017; Lugo Estrada, 2013-en proceso). Las investigaciones desarrolladas dentro del Laboratorio de Nanotecnología de la FCB-UANL, evidencian el alto potencial que tienen los sistemas nanoparticulados para aumentar la actividad biológica de moléculas de origen natural o sintético.



**Figura 8.** La Nanomedicina y sus potenciales aplicaciones.

Cabe mencionar que dentro de las investigaciones, en colaboración con grupos de investigación institucionales, nacionales extranjeros, se realizan estudios de preformulación, caracterización físicoquímica de las nanoformulaciones, desarrollo y validación de métodos de cuantificación por cromatografía (CLAR y CG), caracterización por espectroscopía FT-IR, calorimetría por DSC, desarrollo y establecimiento de estudios de actividad biológica (p.e. actividad antimicrobiana), pruebas dermatocinéticas, ensayos de citotoxicidad y estudios de actividad bioinsecticida, entre otros (Figura 9).



**Figura 9.** Desarrollos nanotecnológicos aplicados en las Ciencias Biológicas y de la Salud llevados a cabo en el Laboratorio de Nanotecnología de la FCB-UANL.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a el AIRD-Francia (JEAI-2011, NANOBIOSA), CONACyT Ciencia Básica, PAICyT-UANL y a la Red PRODEP-SEP (DSA 103.5/14156). BAB agradece a CONACyT por la beca 486227.



## LITERATURA CITADA

Arfat, Y. A., Benjakul, S., Prodpran, T., Sumpavapol, P., Songtipya, P. 2016. Physico-mechanical characterization and antimicrobial properties of fish protein isolate/fish skin gelatin-zinc oxide (ZnO) nanocomposite films. *Food and Bioprocess Technology*, 9(1), 101-112. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1602-0>

Armendáriz Barragán, B. 2012. *Preparación y evaluación in vitro de la actividad antituberculosa de nanopartículas biodegradables cargadas con clofazimina*. Tesis Licenciatura, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León. 61pp.

Armendáriz-Barragán, B., Álvarez-Román, R., Galindo-Rodríguez, S. A. 2016. *Formulación de productos naturales en sistemas de liberación micro- y nanoparticulados*. 411-436pp. En: Rivas-Morales, C., Oranday-Cárdenas, M. A. & Verde-Star, M. J. (Eds.) *Investigación en platas de importancia médica*. Omnia Science. Barcelona, España. <http://omniascience.com/monographs/index.php/monograficos/article/view/338>

Banoee, M., Seif, S., Nazari, Z. E., Jafari-Fesharaki, P., Shahverdi, H. R., Moballegh, A., Shahverdi, A. R. 2010. ZnO nanoparticles enhanced antibacterial activity of ciprofloxacin against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials*, 93(2), 557-561. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31615>

Bhushani, J. A., Karthik, P., Anandharamakrishnan, C. 2016. Nanoemulsion based delivery system for improved bioaccessibility and Caco-2 cell monolayer permeability of green tea catechins. *Food Hydrocolloids*, 56, 372-382. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.12.035>

Boisseau, P., Loubaton, B. 2011. Nanomedicine, nanotechnology in medicine. *Comptes Rendus Physique*, 12(7), 620-636. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2011.06.001>

Cárdenas, G., Díaz, V. J., Meléndrez, M. F., Cruzat, C. C., García Cancino, A. 2009. Colloidal Cu nanoparticles/chitosan composite film obtained by microwave heating for food package applications. *Polymer Bulletin*, 62(4), 511-524. <https://doi.org/10.1007/s00289-008-0031-x>

Cavazos Rodríguez, M.R. 2011. *Encapsulación de aceites esenciales en nanopartículas poliméricas para su aplicación dermatológica*. Tesis Maestría, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León.

Celgene Corporation. 2015. ABRAXANE® Patient & Caregiver Website. from <http://www.abraxane.com/> (consultado el 05/09/2017).

Cui, Y., Wei, Q., Park, H., Lieber, C. M. 2001. Nanowire nanosensors for highly sensitive and selective detection of biological and chemical species. *Science*, 293(5533), 1289-1292. <https://doi.org/10.1126/science.1062711>

De Silva, R. T., Pasbakhsh, P., Lee, S. M., Kit, A. Y. 2015. ZnO deposited/encapsulated halloysite-poly (lactic acid) (PLA) nanocomposites for high performance packaging films with improved mechanical and antimicrobial properties. *Applied Clay Science*, 111, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.024>

Dhapte, V., Gaikwad, N., More, P. V., Banerjee, S., Dhapte, V. V., Kadam, S., Khanna, P. K. 2015. Transparent ZnO/polycarbonate nanocomposite for food packaging application. *Nanocomposites*, 1(2), 106-112. <https://doi.org/10.1179/2055033215Y.0000000004>

Diallo, M. S., Balogh, L., Shafagati, A., Johnson, Goddard, W. A., Tomalia, D. A. 1999. Poly(amidoamine) dendrimers: A new class of high capacity chelating agents for Cu(II) ions. *Environmental Science & Technology*, 33(5), 820-824. <https://doi.org/10.1021/es980521a>

Díaz Zarazua, L. J. 2016. *Formulación de nanopartículas con clorhexidina para su potencial uso odontológico*. Tesis Licenciatura, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León. 33pp.

- ECCO. 2012. First trial in humans of “minicells”: a completely new way of delivering anti-cancer drugs. [http://www.ecco-org.eu/Global/News/ENA/ENA-2012-PR/2012/11/9\\_11-First-trial-in-humans-of-minicells](http://www.ecco-org.eu/Global/News/ENA/ENA-2012-PR/2012/11/9_11-First-trial-in-humans-of-minicells) (consultado el 05/09/2017).
- Elvidge, S. 2012. Bacterial “minicells” deliver cancer drugs straight to the target. <http://www.fiercepharma.com/r-d/bacterial-minicells-deliver-cancer-drugs-straight-to-target> (consultado el 05/09/2017).
- Figuroa Espinoza, A. 2014. *Incorporación de extractos de semillas de Anona muricata L. en nanopartículas poliméricas para el uso en el control de Aedes aegypti L.* Tesis Licenciatura, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.
- Fouda, M. M. G., Abdel-Halim, E. S., Al-Deyab, S. S. 2013. Antibacterial modification of cotton using nanotechnology. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 943-954. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.09.074>
- Freitas, R. A. 2005. Nanotechnology, nanomedicine and nanosurgery. *International Journal of Surgery*, 3(4), 243-246. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2005.10.007>
- Garde, D. 2012. “Chemo bomb” nanotechnology effective in halting tumors. <http://www.fiercepharma.com/r-d/chemo-bomb-nanotechnology-effective-halting-tumors> (consultado 05/09/2019).
- Geohumus GmbH. 2017. <http://www.geohumus.com/en/> (consultado 05/09/2017).
- Gobin, A. M., O'Neal, D. P., Watkins, D. M., Halas, N. J., Drezek, R. A., West, J. L. 2005. Near infrared laser-tissue welding using nanoshells as an exogenous absorber. *Lasers in Surgery and Medicine*, 37(2), 123-129. <https://doi.org/10.1002/lsm.20206>
- Guerrero Barboza, A. 2017. *Encapsulación de coenzima Q10 en nanopartículas poliméricas no biodegradables.* Tesis Licenciatura, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.
- Hernández Vela, T. N. 2016. *Estudio clínico de la actividad antiplaca de la clorhexidina incorporada en nanopartículas poliméricas.* Tesis Maestría, Facultad de Odontología, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León.
- Jin, T., Sun, D., Su, J. Y., Zhang, H., Sue, H. J. 2009. Antimicrobial efficacy of zinc oxide quantum dots against *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enteritidis*, and *Escherichia coli* O157:H7. *Journal of Food Science*, 74(1), M46-52. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.01013.x>
- Kamat, P. V., Huehn, R., Nicolaescu, R. 2002. A “sense and shoot” approach for photocatalytic degradation of organic contaminants in water. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(4), 788-794. <https://doi.org/10.1021/jp013602t>
- Kong, J., Franklin, N. R., Zhou, C., Chapline, M. G., Peng, S., Cho, K., Dai, H. 2000. Nanotube molecular wires as chemical sensors. *Science*, 287(5453), 622-625. <https://doi.org/10.1126/science.287.5453.622>
- Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J.-M., Dubois, P. 2009. New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 63(3), 100-125. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.09.002>
- Li, X., Li, W., Jiang, Y., Ding, Y., Yun, J., Tang, Y., Zhang, P. 2011. Effect of nano-ZnO-coated active packaging on quality of fresh-cut “Fuji” apple. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(9), 1947-1955. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02706.x>
- Li, X., Xing, Y., Jiang, Y., Ding, Y., Li, W. 2009. Antimicrobial activities of ZnO powder-coated PVC film to inactivate food pathogens. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(11), 2161-2168. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02055.x>



- Lizundia, E., Ruiz-Rubio, L., Vilas, J. L., León, L. M. 2016. Poly(l-lactide)/ZnO nanocomposites as efficient UV-shielding coatings for packaging applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(2), 42426. <https://doi.org/10.1002/app.42426>
- Long, R. Q., Yang, R. T. 2001. Carbon nanotubes as superior sorbent for dioxin removal. *Journal of the American Chemical Society*, 123(9), 2058-2059. <https://doi.org/10.1021/ja003830l>
- Loo, C., Lin, A., Hirsch, L., Lee, M.-H., Barton, J., Halas, N., Drezek, R. 2004. Nanoshell-enabled photonics-based imaging and therapy of cancer. *Technology in Cancer Research & Treatment*, 3(1), 33-40. <https://doi.org/10.1177/153303460400300104>
- Lugo Estrada, L. 2013-En proceso. *Desarrollo de sistemas nanoparticulados con dos aceites esenciales para el control de Aedes aegypti L.* Tesis Doctorado, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.
- Marra, A., Silvestre, C., Duraccio, D., Cimmino, S. 2016. Polylactic acid/zinc oxide biocomposite films for food packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.03.039>
- McMurray, T. A., Dunlop, P. S. M., Byrne J. A. 2006. The photocatalytic degradation of atrazine on nanoparticulate TiO<sub>2</sub> films. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 182, 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2006.01.010>
- Milani, N., McLaughlin, M. J., Stacey, S. P., Kirby, J. K., Hettiarachchi, G. M., Beak, D. G., Cornelis, G. 2012. Dissolution kinetics of macronutrient fertilizers coated with manufactured zinc oxide nanoparticles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(16), 3991-3998. <https://doi.org/10.1021/jf205191y>
- Nie, S., Xing, Y., Kim, G. J., Simons, J. W. 2007. Nanotechnology applications in cancer. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 9, 257-288. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.9.060906.152025>
- Pandey, R., Ahmad, Z. 2011. Nanomedicine and experimental tuberculosis: facts, flaws, and future. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 7(3), 259-272. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2011.01.009>
- Parisi, C., Vigani, M., Rodríguez-Cerezo, E. 2015. Agricultural Nanotechnologies: What are the current possibilities? *Nano Today*, 10(2), 124-127. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2014.09.009>
- Peiris, P. M., Bauer, L., Toy, R., Tran, E., Pansky, J., Doolittle, E., Karathanasis, E. 2012. Enhanced delivery of chemotherapy to tumors using a multicomponent nanochain with radio-frequency-tunable drug release. *ACS Nano*, 6(5), 4157-4168. <https://doi.org/10.1021/nn300652p>
- Pereira, A. E. S., Grillo, R., Mello, N. F. S., Rosa, A. H., Fraceto, L. F. 2014. Application of poly(ε-caprolactone) nanoparticles containing atrazine herbicide as an alternative technique to control weeds and reduce damage to the environment. *J. Hazard. Mater*, 268, 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.025>
- Podsiadlo, P., Kaushik, A. K., Arruda, E. M., Waas, A. M., Shim, B. S., Xu, J., Kotov, N. A. 2007. Ultrastrong and stiff layered polymer nanocomposites. *Science*, 318(5847), 80-83. <https://doi.org/10.1126/science.1143176>
- Ponder, S. M., Darab, J. G., Mallouk, T. E. 2000. Remediation of Cr(VI) and Pb(II) aqueous solutions using supported, nanoscale zero-valent iron. *Environmental Science & Technology*, 34(12), 2564-2569. <https://doi.org/10.1021/es9911420>
- Radovic-Moreno, A. F., Lu, T. K., Puscasu, V. A., Yoon, C. J., Langer, R., Farokhzad, O. C. 2012. Surface Charge-Switching Polymeric Nanoparticles for Bacterial Cell Wall-Targeted Delivery of

Antibiotics. *ACS Nano*, 6(5), 4279–4287. <https://doi.org/10.1021/nn3008383>

Salas Cedillo, H. I. 2017. *Desarrollo de un potencial insecticida nanoparticulado de Schinus molle para el control de Aedes aegypti*. Tesis Maestría, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León.

Shankar, S., Teng, X., Li, G., Rhim, J.W. 2015. Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films. *Food Hydrocolloids*, 45, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.12.001>

Silva Flores, P. G. 2015-En proceso. *Desarrollo y evaluación dermatocinética de nanopartículas con aceites esenciales para su aplicación en piel*. Tesis Doctorado, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León.

Sivaramakrishnan, S. M., Neelakantan, P. 2014. Nanotechnology in dentistry - What does the future hold in store? *Dentistry*, 4(2), 198 <https://doi.org/10.4172/2161-1122.1000198>

Trafton, A. 2012. Target: Drug-resistant bacteria. <http://news.mit.edu/2012/antibiotic-nanoparticle-0504> (consultado el 05/09/2017).

Umamaheswaria, G., Sanujaa, S., Arul Johna, V., Kanthb, S. V., Umaphya, M. J. 2015. Preparation, characterization and anti-bacterial activity of zinc oxide-gelatin nanocomposite film for food packaging applications. *Polymers & Polymers Composites*, 23(3), 199–204.

University of Waterloo. 2010. Nanotechnology in targeted cancer therapy. <https://uwaterloo.ca/news/news/nanotechnology-in-targeted-cancer-therapy> (consultado el 05/09/2017)

US FDA. 2002. Listing of color additives exempt from certification, Tittle 21-Food and drugs code of federal regulations. Retrieved from [https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=6ad001edd5b0635d0ebb4bd96ebb7c7a&mc=true&node=se21.1.73\\_1575&rgn=div8](https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=6ad001edd5b0635d0ebb4bd96ebb7c7a&mc=true&node=se21.1.73_1575&rgn=div8)

US FDA. 2015a. Environmental decisions - Memo for food contact notification no. 1569 <https://www.fda.gov/Food/IngredientsPackagingLabeling/EnvironmentalDecisions/ucm488455.htm> (consultado el 04/09/2017)

US FDA. 2015b. Color additive status list. <https://www.fda.gov/forindustry/coloradditives/coloradditiveinventories/ucm106626.htm> (consultado el 05/09/2017)

Vamvakaki, V., Chaniotakis, N. A. 2007. Pesticide detection with a liposome-based nano-biosensor. *Biosensors & Bioelectronics*, 22(12), 2848–2853. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2006.11.024>

Velázquez Dávila, L. A. 2017. *Evaluaciones dermatocinéticas y antimicóticas de productos naturales incorporados en nanopartículas poliméricas biodegradables* Tesis Doctorado, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Villegas Ramírez, H. M. 2017. *Actividad larvicida de aceites esenciales para el control de Musca domestica L. (Diptera: Muscidae)*. Tesis Licenciatura, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Wang, Z., Ruan, J., Cui, D. 2009. Advances and prospect of nanotechnology in stem cells. *Nanoscale Research Letters*, 4(7), 593–605. <https://doi.org/10.1007/s11671-009-9292-z>

Wyss Institute. 2012. Harvard's Wyss Institute develops novel nanotherapeutic that delivers clot-busting drugs directly to obstructed blood vessels. <https://wyss.harvard.edu/harvards-wyss-institute-develops-novel-nanotherapeutic-that-delivers-clot-busting-drugs-directly-to-obstructed-blood-vessels/> (consultado 04/09/2017).

Zambrano-Zaragoza, M. L., Mercado-Silva, E., Del Real L., A., Gutiérrez-Cortez, E., Cornejo-Villegas, M. A., Quintanar-Guerrero, D. 2014. The effect of nano-coatings with  $\alpha$ -tocopherol and xanthan gum on shelf-life and browning index of fresh-cut

"Red Delicious" apples. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 22, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.09.008>

Zhang, W., Wang, C.-B., Lien, H.L. 1998. Treatment of chlorinated organic contaminants with nanoscale bimetallic particles. *Catalysis Today*, 40(4), 387-395. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(98\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(98)00067-4)

Zheng, G., Patolsky, F., Cui, Y., Wang, W. U., Lieber, C. M. 2005. Multiplexed electrical detection of cancer markers with nanowire sensor arrays. *Nature Biotechnology*, 23(10), 1294-1301. <https://doi.org/10.1038/nbt1138>

Zhou, H., Liu, G., Zhang, J., Sun, N., Duan, M., Yan, Z., Xia, Q. 2014. Novel lipid-free nanoformulation for improving oral bioavailability of Coenzyme Q10. *Biomed Research International*, 2014, ID 793879, 9pp. <https://doi.org/10.1155/2014/793879>



**#SOMOS UNI**

TRABAJAR · TRANSFORMAR · TRASCENDER



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN