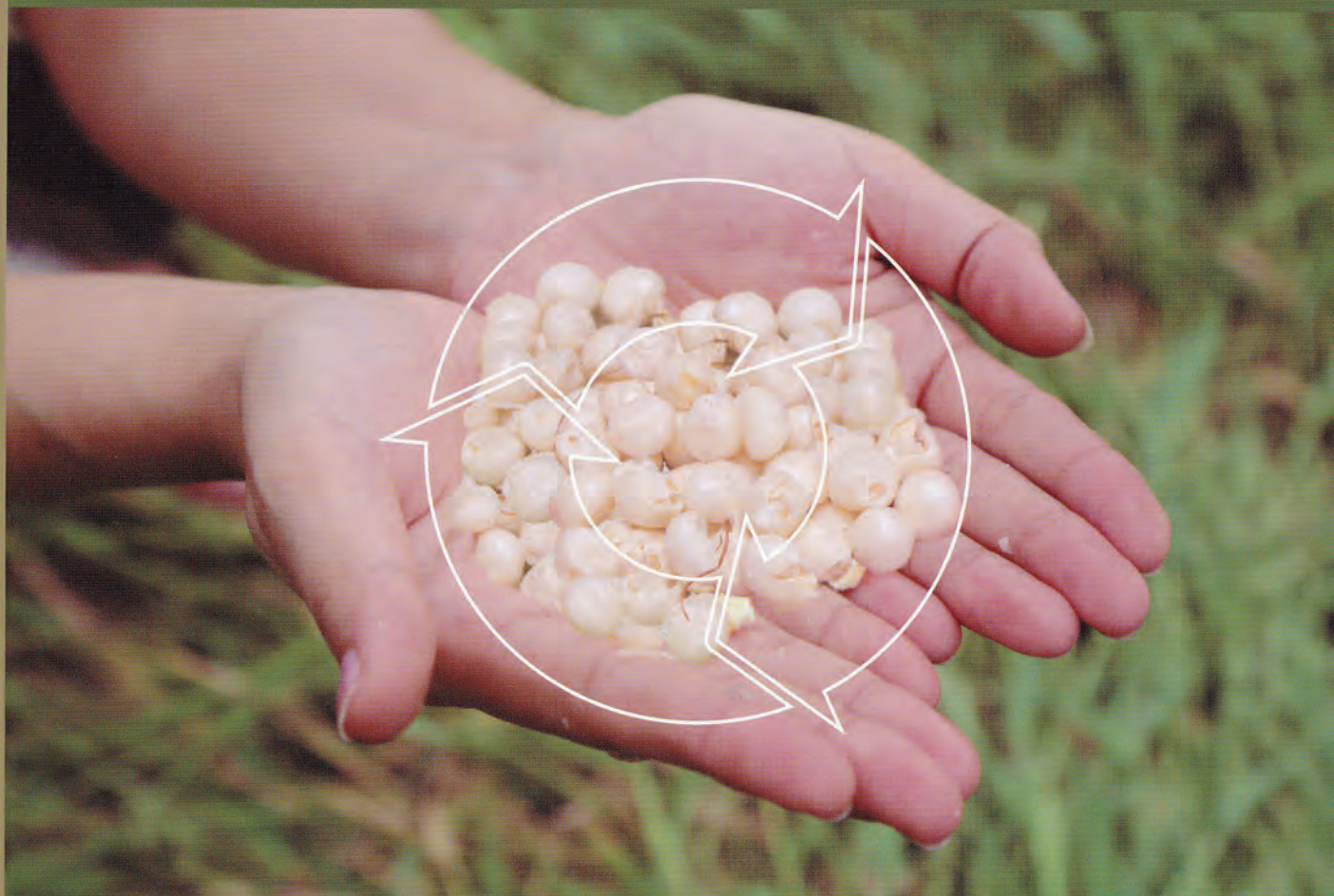


Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México

Hacia un enfoque integral de la producción, la dieta,
la salud y la cultura en beneficio de la sociedad



Daniel Martínez-Carrera
Javier Ramírez Juárez
Editores

Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México

*Hacia un enfoque integral de la producción, la dieta,
la salud y la cultura en beneficio de la sociedad*

Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México

*Hacia un enfoque integral de la producción, la dieta,
la salud y la cultura en beneficio de la sociedad*

Daniel **Martínez-Carrera**

Javier **Ramírez Juárez**

EDITORES



bba BIBLIOTECA BÁSICA
DE AGRICULTURA

Título de la obra:

Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México

Editores:

© Daniel Martínez-Carrera

Javier Ramírez Juárez

© 1^{ra} Edición, 2016

Coordinación editorial: Judith Sandoval

Maquetación: Alejandro Rojas Sánchez

Diseño de cubiertas: Rogelio Covarrubias Romo

Biblioteca Básica de Agricultura:

Editorial del Colegio de Postgraduados

Colegio de Postgraduados

Fundación Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, A. C.

ISBN: 978-607-715-314-6 Colegio de Postgraduados

© Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción, total o parcial de este libro ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, registro u otros medios sin el permiso previo y por escrito de los titulares del *copyright*.

Es responsabilidad del autor el uso de las ilustraciones, el material gráfico y el contenido creado para esta publicación.

Las opiniones expresadas en este documento son de exclusiva responsabilidad de los autores, y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Colegio de Postgraduados, de la Editorial del Colegio de Postgraduados, ni de la Fundación Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas.

Impreso en México - Printed in Mexico
PRINTING ARTS MEXICO, S. de R. L. de C. V.
Calle 14 no. 2430, Zona Industrial
Guadalajara, Jalisco, México. C.P. 44940
Fax: 3810 5567
www.tegrafik.com
RFC: PAM 991118 DGO

Tiraje: 1 000 ejemplares.

Cita bibliográfica:

Martínez-Carrera, D. y J. Ramírez Juárez (Eds.). 2016. *Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México*. Editorial del Colegio de Postgraduados-AMC-CONACYT-UPAEP-IMINAP, San Luis Huexotla, Texcoco, México. 856 pp.

Contiene 131 Figuras y 181 Tablas.

“Los Cinco Soles:

En la leyenda, propia del altiplano, hay un proceso evolutivo de hombres cada vez más perfectos, que van de la barbarie a la civilización; del alimento con bellotas y piñones al maíz. Los gigantes eran recolectores que comían bellotas. Los hombres del Segundo Sol se alimentaban con piñones y tampoco cultivaban la tierra. Quienes les siguieron comían maíz de agua y los del Cuarto Sol, teocentli, es decir, granos de teosinte. Los hombres del Quinto Sol domesticaron el teosinte y lo convirtieron en maíz...”

El Maíz, Fundamento de la Cultura Popular Mexicana (1982).

“Al cultivar el maíz, el hombre también se cultivó. Las grandes civilizaciones del pasado y la vida misma de millones de mexicanos de hoy, tienen como raíz y fundamento al generoso maíz. Ha sido un eje fundamental para la creatividad cultural de cientos de generaciones; exigió el desarrollo y el perfeccionamiento continuo de innumerables técnicas para cultivarlo, almacenarlo y transformarlo; condujo al surgimiento de una cosmogonía y de creencias y prácticas religiosas que hacen del maíz una planta sagrada; permitió la elaboración de un arte culinario de sorprendente riqueza; marcó el sentido del tiempo y ordenó el espacio en función de sus propios ritmos y requerimientos; dio motivo para las más variadas formas de expresión estética; y se convirtió en la referencia necesaria para entender formas de organización social, maneras de pensamiento y conocimiento y estilos de vida de las más amplias capas populares de México. Por eso, en verdad, el maíz es el fundamento de la cultura popular mexicana. Hay, pues, por todo lo anterior, lo que podría llamarse un proyecto popular en relación con el maíz. Esta planta, con toda la compleja red de relaciones económicas, sociales y simbólicas que la tienen por centro, adquiere un significado profundo para el pueblo mexicano; es un bien económico fundamental y un alimento insustituible, pero es mucho más que eso. Frente al proyecto popular, abiertamente opuesto a él, se yergue otra manera de concebir el maíz, otro proyecto. Éste pretende desligar al maíz de su contexto histórico y cultural para manejarlo exclusivamente en términos de mercancía y en función de intereses que no son los de los sectores populares. Hace del maíz un valor sustituable, intercambiable y aún prescindible. Porque excluye, precisamente, la opinión y el interés de los sectores populares, los que crearon al maíz y han sido creados por él...”

Presentación, Guillermo Bonfil Batalla (1935-1991).

“La grandeza de México es que el pasado siempre está vivo. No como una carga, no como una losa, salvo para el más crudo ánimo modernizador. La memoria salva, escoge, filtra, pero no mata. La memoria y el deseo saben que no hay presente vivo con pasado muerto, ni habrá futuro sin ambos. Recordamos hoy, aquí. Deseamos aquí, hoy. México existe en el presente, su aurora es ahora porque no olvida la riqueza de un pasado vivo, una memoria insepulta. Su horizonte también es hoy, porque no disminuye la fuerza de su vivo deseo”.

Nuevo tiempo mexicano, Carlos Fuentes (1928-2012).

“Vi pasar las carretas. Los bueyes moviéndose despacio. El crujir de las piedras bajo las ruedas. Los hombres como si vinieran dormidos.

—... Todas las madrugadas el pueblo tiembla con el paso de las carretas. Llegan de todas partes, copeteadas de salitre, de mazorca, de yerba de pará. Rechinan sus ruedas haciendo vibrar las ventanas, despertando a la gente. Es la misma hora en que se abren los hornos y huele a pan recién horneado. Y de pronto puede tronar el cielo. Caer la lluvia. Puede venir la primavera. Allá te acostumbrarás a los “derrepentes”, mi hijo.— Carretas vacías, remoliendo el silencio de las calles. Perdiéndose en el oscuro camino de la noche. Y las sombras. El eco de las sombras”.

Pedro Páramo, Juan Rulfo (1917-1986).

Prefacio

Este libro recoge las ponencias del Simposio General “Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México”, organizado por el *Campus* Puebla del Colegio de Postgraduados, la Academia Mexicana de Ciencias, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla y la Fundación Produce Puebla, los días 26, 27, y 28 del mes de noviembre de 2014. Quiero destacar, primero, que no es una memoria más de una reunión científica, memorias en las cuales, a menudo se publican indiscriminadamente todas las contribuciones recibidas, muchas veces sin ningún examen previo ni posterior. Un análisis somero del índice nos informa de la seriedad de esta experiencia. Los temas se agrupan en cuatro grandes apartados: I El Sistema Agroalimentario de México; II Sistemas Agroalimentarios Sustentables de Origen Vegetal; III Sistemas Agroalimentarios Sustentables de Origen Animal; y IV Sistemas Agroalimentarios Sustentables de Origen Microbiano. Primero una gran parábola, luego tres secciones que cubren exhaustivamente su trayectoria. Obviamente hubo un diseño inteligente para este simposio.

En 38 capítulos, cerca de 100 expertos en la producción de alimentos y en temas relativos a su relación con la sociedad exponen conocimientos, experiencias y estrategias para alcanzar nuestra suficiencia alimentaria. Otros, los menos, escriben sobre políticas públicas para el sector agroalimentario. Su lectura reafirma mi convicción sobre dos tesis que he expuesto por mucho tiempo en diversos foros: 1) Nuestra competencia tecnológica para la producción de alimentos es amplia, aunque nunca será suficiente; ni en México ni, por cierto, en ningún otro lugar; 2) Esa competencia tecnológica incide muy poco en la productividad del campo mexicano. Tenemos tecnología y técnicos competentes. Y entonces ¿qué?

Trataré de abreviar en unos pocos párrafos una historia de más de setenta años, (para una reseña más extensa consultar el vínculo <http://www.colpos.mx/agrocien/Extras/ens-inv-ext.pdf>). La investigación en ciencias agrícolas se inició en México en los años cuarenta del siglo XX. No creo cometer una injusticia histórica al situar a Edmundo Taboada como el primer investigador en ciencias agrícolas de nuestro país. La fundación de la Oficina de Estudios Especiales (OEE), del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), del Colegio de Postgraduados (CP) y del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) se ha documentado ampliamente en la serie Las Ciencias Agrícolas Mexicanas y sus Protagonistas, en seis volúmenes de la Biblioteca Básica de Agricultura (BBA), publicada por el CP. Una

asignatura pendiente es analizar cronológicamente la interacción (o ausencia de) entre estas instancias: de la OEE al INIA y al CIMMYT; del INIA al INIFAP; la conversión (infausta) de la Escuela Nacional de Agricultura en Universidad Autónoma Chapingo (UACH), y la previa fundación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN); la creación del CP y su separación de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Un análisis serio y documentado de este entramado histórico seguramente arrojaría luces sobre las causas de un fracaso monumental. Lo sugerí antes y lo repito: la escasa incidencia de nuestras instituciones de enseñanza e investigación en la productividad del campo mexicano. Trataré de sustanciar este aserto.

Los directivos de instituciones oficiales —del sector agropecuario y de todos— invariablemente culpan de sus deficiencias a presupuestos exiguos. Aunque sólo he examinado numéricamente datos del sector agropecuario, puedo asegurar que el argumento es falaz en general. Los recursos recibidos difícilmente se compadecen con los resultados. En el caso de nuestro sector es evidente la falta de coordinación: investigaciones que se repiten, exceso de planteles educativos, patrocinio de estudiantes que acuden a la UACH, a la UAAAN, y al CP por razones alimenticias (gastronómicas antes que agronómicas). Sé que estoy escribiendo algo herético, sobre todo para quienes manejan los recursos monetarios y a veces se benefician personalmente de ellos, pero, para el caso del sector agropecuario, ofrezco un análisis somero.

Sólo entre la UACH, el CP, el INIFAP, y la UAAAN, se ejerce un presupuesto anual de alrededor de cinco mil millones de pesos. No es aventurado suponer que esta cifra pueda duplicarse, y hasta triplicarse, si sumamos el gasto en educación e investigación agrícola de las universidades estatales, de otros organismos de SAGARPA y descentralizados, y aun de organismos privados.

¿Cuántos resultados productivos debería arrojar la inversión de 1,000 millones de dólares anuales? Sin duda muchos más que los actuales.

Ejercer con eficacia tal (o cualquier) cantidad de recursos en un sistema tan complejo y diverso como el que nos ocupa, requiere la coordinación de una instancia superior, la que sólo puede hacerlo bien si tiene facultades para asignar prioridades y distribuir el financiamiento de acuerdo con criterios tanto científicos como de utilidad social.

UNA PROPUESTA

El primer intento de regular la enseñanza y la investigación agrícola en México fue la Ley de Educación Agrícola (1946). Como consecuencia un tanto retrasada de esa ley se crea el Colegio de Postgraduados en 1959, con el cual se inicia la enseñanza de postgrado en ciencias agrícolas. No incurriré en la ingenuidad de creer que una ley puede, por sí sola, remediar los males anteriormente reseñados. Sí tengo el deber ético de insistir en que la carencia de un marco legal ha propiciado el desastre. A mi juicio, la forma privilegiada para inducir el orden en la enseñanza, investigación y extensión agrícolas, es la creación de un instrumento legal que norme estas

actividades. Una Ley de Enseñanza, Investigación y Extensión Agrícolas, que sustituya y actualice la de 1946, debería considerar los siguientes aspectos:

- 1) Regulación de la cantidad y calidad de los egresados del sistema de educación agrícola superior. En virtud de la proliferación de programas de postgrado, la ley debería considerar este aspecto con mayor especificidad que la de 1946, toda vez que también empieza a darse una duplicación, y quizá triplicación y n-plicación delirante de esfuerzos en este nivel, además de la creación de programas sin control, la mayoría de muy dudosa calidad.
- 2) Certificación de los egresados para el ejercicio de la profesión.
- 3) Mecanismos para asignación de recursos que se estimen pertinentes a los planteles.
- 4) Asignación racional de recursos para la investigación.
- 5) Definición de áreas de pertinencia en la investigación y mecanismos de vinculación.
- 6) Utilización integral de los recursos humanos y financieros del sistema.

Sobre todos los puntos anteriores pueden darse ejemplos significativos. Basten en esta ocasión los indicadores anteriormente expuestos.

El instrumento para operar los objetivos de la ley podría ser lo que aquí llamaré el “Consejo Nacional de Educación, Investigación y Extensión Agrícola”, integrado por el INIFAP, la Universidad Autónoma Chapingo, el Colegio de Postgraduados, y otras instituciones que se juzgue conveniente incluir. Un candidato obvio sería el Colegio de Ingenieros Agrónomos de México, y otro la Confederación Nacional Agronómica.

Pero he sido convocado a escribir un prólogo y no una proclama. Ofrezco una disculpa al Dr. Daniel Claudio Martínez Carrera, organizador del simposio, por cualquier exceso retórico. También espero haber aportado información útil sobre los temas que se abordan en esta obra.

Said Infante Gil
*Profesor Investigador Titular
del Colegio de Postgraduados*

Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México

Comité Científico Editorial

Simposio I: Sistemas agroalimentarios sustentables de origen vegetal.

Filemón Parra Inzunza (coordinador)

José Luis Jaramillo Villanueva

Ignacio Ocampo Fletes

Simposio II: Sistemas agroalimentarios sustentables de origen animal.

Samuel Vargas López (coordinador interno)

Alfredo Cesín Vargas (coordinador externo)

José Sergio Escobedo Garrido

Francisco Calderón Sánchez

J. Reyes Galaviz Rodríguez

Ignacio Vázquez Martínez

Simposio III: Sistemas agroalimentarios sustentables de origen microbiano.

Daniel Martínez-Carrera (coordinador interno)

Yésica Mayett Moreno (coordinadora externa)

Mercedes Sobal Cruz

Porfirio Morales Almora

General: Luis A. Villarreal Manzo, Benito Ramírez Valverde,

Antonio Macías López, Engelberto Sandoval Castro

Contenido

I. El sistema agroalimentario de México

A. Sociedad y alimentación

Capítulo 1

- 3 La agricultura mexicana y su potencial en la alimentación: el contexto actual
Leobardo Jiménez-Sánchez, Aurelio León-Merino y Martín Hernández-Juárez

Capítulo 2

- 27 Los desafíos del futuro: alimentos, crisis ecológica y pequeña producción campesina
Víctor M. Toledo

Capítulo 3

- 37 De la revolución verde a las revoluciones minúsculas
Jean Christian Tulet

B. Alimentos y recursos base

Capítulo 4

- 63 Manejo sustentable del suelo para la producción agrícola
Jorge D. Etchevers, Vinisa Saynes y Mariana Margarita Sánchez

Capítulo 5

- 81 El manejo sustentable del agua en el sistema agroalimentario de México
Enrique Palacios Vélez

Capítulo 6

- 101 La importancia de la pesca y la acuicultura en el sistema agroalimentario de México
Francisco Javier Martínez Cordero y Edgar Sánchez Zazueta

C. Alimentos y salud

Capítulo 7

- 123 Importancia de la sanidad vegetal en el sistema agroalimentario
Francisco Javier Trujillo Arriaga, Clemente de Jesús García Avila, Andrés Quezada Salinas y Hugo César Arredondo Bernal

Capítulo 8

- 147 Producción porcina: salud humana, ambiente, inocuidad y bienestar animal
Rosario H. Pérez Espejo

Capítulo 9

- 169 Biotecnología y bioseguridad: un conjunto de herramientas esenciales para el desarrollo de los sistemas agroalimentarios
Pedro Rocha Salavarieta y Víctor Villalobos Arámbula

D. Alimentos, sociedad y cultura

Capítulo 10

- 187 Respondiendo al debate: la polémica sobre el origen de la crisis alimentaria
Blanca Rubio

Capítulo 11

- 201 Cultura alimentaria mexicana como eje de las políticas públicas
Héctor Bourges Rodríguez

Capítulo 12

- 221 Situación de la agricultura en América Latina y el Caribe
Diana Ramírez

Capítulo 13

- 235 Los agroparques como modelo de innovación que potenciará la agricultura mexicana
Alfonso Larqué-Saavedra

Capítulo 14

- 249 La seguridad agroalimentaria en México
Manuel R. Villa-Issa y Carlos Aragón-Gutiérrez

Capítulo 15

- 281 México: expectativas de su seguridad alimentaria en la fase de economía abierta
Felipe Torres Torres

II. Sistemas agroalimentarios sustentables de origen vegetal

Capítulo 16

- 313 La agricultura familiar y su contribución a la seguridad alimentaria: límites y posibilidades
Javier Ramírez Juárez

Capítulo 17

- 333 Extensionismo para la innovación basado en evidencias
Inicio Horacio Santoyo-Cortés, Manrubio Muñoz-Rodríguez, Jorge Aguilar-Ávila y Enrique Genaro Martínez-González

Capítulo 18

- 361 Innovación tecnológica y posibilidades de aumentar la productividad y producción global de 16 cultivos básicos de México
Antonio Turrent Fernández, José Isabel Cortés Flores y Alejandro Espinosa Calderón

Capítulo 19

- 377 Agregación de valor a los productos alimenticios de la agricultura familiar
José Luis Jaramillo Villanueva

Capítulo 20

- 393 Agricultura familiar y patrones de consumo alimentario en las familias indígenas de Matatlán, Oaxaca, México
Juan Antonio-Bautista, Javier Ramírez Juárez y Antonio José-Juan

III. Sistemas agroalimentarios sustentables de origen animal

Capítulo 21

- 415 Aspectos de globalización y la relación inocuidad-ambiente en la cadena productiva de alimentos de origen animal

José Nahed Toral y Francisco Guevara Hernández

Capítulo 22

- 427 Inocuidad de los productos alimenticios de origen animal

Ricardo E. Caicedo Rivas, Mariana Paz-Calderón Nieto y Adriana Ramírez Vargas

Capítulo 23

- 449 El sistema de traspasamiento y la producción de alimentos de origen animal

Samuel Vargas López, Ángel Bustamante González, Miguel Ángel Casiano Ventura, Francisco Calderón Sánchez e Ignacio Vázquez Martínez

Capítulo 24

- 463 Bacterias patógenas que contaminan los alimentos agropecuarios y causan zoonosis

Jesús Vázquez Navarrete y Ricardo Flores Castro

Capítulo 25

- 477 Pobreza alimentaria y bienestar animal, los retos para la avicultura mexicana

María del Carmen Hernández Moreno, Antonio Alberto Ulloa Méndez y Araceli del Carmen Andablo Reyes

Capítulo 26

- 501 Cambio tecnológico y productividad en el sistema de lácteos en México: entre el consumo de masas y el consumo selectivo

Adolfo Gpe. Álvarez Macías y Adriana Yamile Moreno Blanco

Capítulo 27

- 519 Productos locales de origen animal

Alfredo Cesín y Adriana Bastidas

Capítulo 28

- 539 “Comer de mano propia”: cultura alimentaria de la sociedad ranchera serrana en el occidente de México

Esteban Barragán López y Rogelia Torres Villa

Capítulo 29

- 563 Aportes de los sistemas agroalimentarios sustentables de origen animal a la seguridad alimentaria

Beatriz Cavallotti Vázquez

IV. Sistemas agroalimentarios sustentables de origen microbiano

Capítulo 30

- 581 Contribución de los hongos comestibles, funcionales y medicinales a la construcción de un paradigma sobre la producción, la dieta, la salud y la cultura en el sistema agroalimentario de México

Daniel Martínez-Carrera, Alfonso Larqué-Saavedra, Armando Tovar Palacio, Nimbe Torres, María Eugenia Meneses, Mercedes Sobal Cruz, Porfirio Morales Almora, Myrna Bonilla Quintero, Helios Escudero Uribe, Isaac Tello-Salgado, Teodoro Bernabé-González, Wilfrido Martínez Sánchez y Yésica Mayett

Capítulo 31

- 641 El cuítlacoche, producto de la interacción *Ustilago maydis* - maíz, una aportación de México al mundo en el sistema agroalimentario microbiano

Vladimir Castañeda de León, Daniel Martínez-Carrera, Porfirio Morales Almora, Mercedes Sobal Cruz, Abel Gil Muñoz y Hermilo Leal Lara

Capítulo 32

- 695 La investigación en micología básica y aplicada: aportes para un desarrollo sustentable

Gerardo Mata, Rigoberto Gaitán Hernández y Dulce Salmones

Capítulo 33

- 721 Aportaciones de ECOSUR al conocimiento de macromicetos y al desarrollo de tecnología para su cultivo y aprovechamiento

José E. Sánchez, René Andrade Gallegos, Lilia Moreno Ruiz y Reyna Camacho Morales

Capítulo 34

- 737 Aportaciones de investigaciones básicas y aplicadas para impulsar la producción de hongos comestibles en México

Hermilo Leal Lara, José Adaya González, Lidia Curiel Pérez, Cecilia Marroquín Corona, Cristina Morales Olivares, Abraham Sánchez Hernández, Erika Sánchez Marín, Selene Segura Moctezuma, Vladimir Castañeda de León y Gustavo Valencia Del Toro

Capítulo 35

- 761 Biotecnología, innovación y desarrollo en la cadena de valor con base en los recursos genéticos de los hongos comestibles, funcionales y medicinales

Mercedes Sobal Cruz, Porfirio Morales Almora, Myrna Bonilla Quintero, Wilfrido Martínez Sánchez y Daniel Martínez-Carrera

Capítulo 36

- 781 Estrategias para promover el consumo de hongos comestibles en México, con base en sus propiedades funcionales y medicinales

Yésica Mayett y Daniel Martínez-Carrera

Capítulo 37

- 811 Propiedades funcionales novedosas de *Ganoderma lucidum*: actividad neuroprotectora y anticonvulsiva

Isaac Tello-Salgado, Elizur Montiel-Arcos, Ismael Leon-Rivera y Daniel Martínez-Carrera

Capítulo 38

- 827 Genómica de las propiedades anticancerígenas de los hongos comestibles, funcionales y medicinales: investigaciones INMEGEN-CP

Mónica Peña-Luna, Alfredo Hidalgo-Miranda, Sandra Romero-Córdoba, Mercedes Sobal Cruz, Porfirio Morales Almora, Gerardo Jiménez-Sánchez y Daniel Martínez-Carrera

- 853 **Índice temático**

- 855 *Subject index*

IV

Sistemas
agroalimentarios
sustentables de
origen microbiano

Contribución de los hongos comestibles, funcionales y medicinales a la construcción de un paradigma sobre la producción, la dieta, la salud y la cultura en el sistema agroalimentario de México*

Daniel Martínez-Carrera¹, Alfonso Larqué-Saavedra², Armando Tovar Palacio³, Nimbe Torres³, María Eugenia Meneses^{1**}, Mercedes Sobal Cruz¹, Porfirio Morales Almora¹, Myrna Bonilla Quintero¹, Helios Escudero Uribe^{1***}, Isaac Tello-Salgado⁴, Teodoro Bernabé-González^{1***}, Wilfrido Martínez Sánchez¹ y Yésica Mayett⁵

¹ Colegio de Postgraduados (CP), Campus Puebla, Biotecnología de Hongos Comestibles, Funcionales y Medicinales, Apartado Postal 129, Puebla 72001, Puebla, México.

Correo electrónico: dcarrera@colpos.mx.

² Academia Mexicana de Ciencias (AMC), Coordinador de Agrociencias, Banco de Germoplasma, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (CICY), Calle 43 no. 130, Colonia Chuburná de Hidalgo, Mérida 97200, Yucatán, México.

³ Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán (INCMNSZ), Departamento de Fisiología de la Nutrición, Vasco de Quiroga 15, Colonia Sección XVI, Tlalpan, D.F. 14000, México.

⁴ Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Centro de Investigaciones Biológicas (CIB), Laboratorio de Micología, Avenida Universidad 1001, Cuernavaca 62209, Morelos, México.

⁵ Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), Programa de Postgrado en Dirección de Organizaciones y Agronegocios, 21 Sur 1103, Colonia Santiago, Puebla 72130, Puebla, México.

Resumen

El entorno económico global y la operación del sistema agroalimentario mundial han generado cambios indeseables en los patrones de producción y consumo de los alimentos, así como en la salud de la población de muchos países. En México, las importaciones agroalimentarias durante el periodo 1994-2014 fueron superiores a los 250 mil millones de dólares. Asimismo, actualmente se tienen serios problemas de obesidad y enfermedades asociadas (diabetes, síndrome metabólico, hipertensión, enfermedades cardiovasculares, cáncer), cuyo costo para el sistema nacional de salud en 2017 se ha estimado en más de 12.9 mil millones de dólares. A pesar de su gran magnitud,

* Investigación financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a través del proyecto número 105 Genómica de las Propiedades Funcionales y Medicinales de los Hongos Comestibles de México, bajo la dirección de D. Martínez-Carrera.

** Estancia Postdoctoral financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a través del convenio 290754, bajo la dirección de D. Martínez Carrera.

*** Becarios del CONACYT, nivel doctorado, Programa Nacional de Posgrados de Calidad, bajo la dirección de D. Martínez-Carrera.

se carece de un enfoque transversal de política pública para atender estos problemas. En este trabajo, se propone el modelo de los recursos genéticos nativos de hongos comestibles, funcionales y medicinales para demostrar que es posible analizar el sistema agroalimentario nacional desde esta perspectiva, cuyos pilares fundamentales son la ciencia, la tecnología y la innovación.

Los hongos comestibles, funcionales y medicinales son un alimento tradicional de origen microbiano consumido en México desde épocas prehispánicas y constituyen una fuente inagotable de novedosos compuestos bioactivos con propiedades funcionales y medicinales, diferentes de aquellas encontradas en los alimentos de origen vegetal o animal. Se describen brevemente las evidencias generadas a partir de extractos estandarizados de *Ganoderma lucidum*, especie conocida por las comunidades indígenas y campesinas como “repisas”, las cuales incluyen su composición química, propiedades antioxidantes y antimicrobianas, así como las investigaciones sobre su efecto en modelo celular (*in vitro*), en modelo animal (*in vivo*), y las primeras pruebas clínicas exploratorias realizadas en el país. La combinación natural de compuestos bioactivos presentes en estos extractos, administrada en dosis notablemente bajas siguiendo un enfoque nutricional, tiene un efecto positivo en el organismo a nivel sistémico en los modelos estudiados, ya que interviene simultáneamente en el metabolismo de carbohidratos, lípidos y proteínas, así como en la microbiota intestinal, el sistema inmunitario, e incluso hormonal, sin efectos adversos registrados. Los mecanismos de acción incluyen inducción de la expresión, activación o modulación de genes y rutas metabólicas específicas. Además, el manejo apropiado de las condiciones de cultivo y producción de los hongos permite modificar o intensificar las propiedades funcionales y medicinales de los basidiocarpos y sus extractos utilizando el ácido acetilsalicílico, lo que ha establecido la posibilidad para desarrollar nuevos fármacos por biotransformación fúngica.

Los hongos comestibles, funcionales y medicinales conforman la cadena agroalimentaria microbiana emergente más importante de México, con impacto en la producción de alimentos para el consumo humano directo, así como en la obtención de nuevos productos de alto valor agregado con propiedades funcionales y medicinales a través de procesos biotecnológicos axénicos y controlados. Por ello se propone integrar a la norma oficial mexicana (NOM-043-SSA2-2005) un nuevo grupo de alimentos de origen microbiano, representado por los hongos comestibles, funcionales y medicinales, los cuales serían incluidos en “El Plato del Bien Comer” para ser consumidos periódicamente como parte de la orientación alimentaria y así lograr una dieta sana, completa, equilibrada, inocua, suficiente, variada y adecuada. Se demuestra la importante contribución de los hongos comestibles, funcionales y medicinales a la construcción de un paradigma capaz de posibilitar el establecimiento de políticas públicas transversales, complementarias al enfoque del mercado, que promuevan la producción y el consumo de alimentos con impacto no sólo en la dieta y la salud humana, sino que también formen parte de la cultura de la población. Esto dependerá de que otros alimentos del sistema agroalimentario mexicano también sean considerados pertinentes y analizados desde esta perspectiva. En el largo plazo, un

paradigma de esta naturaleza permitirá fortalecer los sistemas agroalimentarios relevantes para la seguridad alimentaria y la salud de la población mexicana.

Palabras clave: ácido acetilsalicílico, alimentos microbianos, biotecnología microbiana, cadena agroalimentaria microbiana, *Ganoderma*, hongos comestibles, metabolismo, microbiota intestinal, nuevos fármacos, política pública, propiedades funcionales y medicinales, recursos genéticos, sistema inmunitario.

Abstract

Contribution of medicinal, functional and edible mushrooms to the development of a paradigm about production, diet, health and culture in the Mexican agri-food system.

The global economic conditions and the world agri-food system operation have promoted undesirable changes in food production and consumption patterns, as well as in population health of many countries. In Mexico, agri-food imports during 1994-2014 exceeded USD \$250 000 millions. Likewise, at present, there are serious problems of obesity and associated diseases (diabetes, metabolic syndrome, hypertension, cardiovascular diseases, cancer), whose cost for the national health system in 2017 has been estimated to be around USD \$12 900 millions. Despite their great magnitude, there is not a transversal approach of public policy to strive against those problems. In this work, a model of native genetic resources from medicinal, functional and edible mushrooms is proposed for analyzing the national agri-food system to follow a transversal approach based on science, technology and innovation. Medicinal, functional and edible mushrooms are a traditional food of microbial origin widely consumed in Mexico since pre-Hispanic times. They can be an endless source of novel bioactive compounds showing functional and medicinal properties, which are different from those found in foods of plant or animal origin. Several evidences about standardized extracts from *Ganoderma lucidum*, known as “repisas” (corbels) by indigenous and peasant communities, are briefly described including chemical composition, antioxidant and antimicrobial properties, as well as their effect on cellular model (*in vitro*), animal model (*in vivo*), and the first exploratory clinical trials carried out in the country. The natural blend of bioactive compounds from mushroom extracts, administered at remarkably low doses following a nutritional approach, showed positive systemic effects in models studied as simultaneous responses were recorded in carbohydrate, lipid and protein metabolism, as well as in the gut microbiota, immune and even hormonal systems. No adverse effects were recorded. Mechanisms of action involved the induction of expression, activation or modulation of genes and specific metabolic pathways. Furthermore, the suitable management of mushroom production and cultivation conditions allows to modify or to enhance the functional and medicinal properties of basidiocarps and their extracts using the acetylsalicylic

acid, which has opened up possibilities for developing new drugs by fungal biotransformation. Medicinal, functional and edible mushrooms are now the emerging and most important microbial agri-food chain in Mexico, showing a good impact on food production for direct human consumption and for developing new high value added products with functional and medicinal properties through axenic and controlled biotechnological processes. For these reasons, we propose to add a new group of foods from microbial origin to the official Mexican norm (NOM-043-SSA2-2005), represented by medicinal, functional and edible mushrooms, which would be included in “El Plato del Bien Comer” (the eatwell plate) to be periodically consumed as part of the food orientation to achieve a healthy, complete, balanced, safe, sufficient, varied, and suitable diet. This work shows the important contribution of medicinal, functional and edible mushrooms for developing a paradigm able to get transversal public policies established (as a complement to the market approach) and to promote the production and consumption of foods directly focused not only on human diet and health, but also considered as part of the national culture. The proposal depends on other foods from the Mexican agri-food system considered to be pertinent, which can be analyzed under the same perspective. A paradigm so developed will allow to strengthen basic production and consumption systems for food security and health of the Mexican society.

Key words: acetylsalicylic acid, edible mushrooms, functional and medicinal properties, *Ganoderma*, genetic resources, gut microbiota, immune system, metabolism, microbial agri-food chain, microbial biotechnology, microbial food, new drugs, public policy.

I. Hacia la construcción de un paradigma para alinear la complejidad de la producción de alimentos, la dieta, la salud y la cultura en México

Durante el siglo XX y lo que va del XXI, se han alcanzado los mayores niveles de impacto de la humanidad sobre el planeta. Esta increíble capacidad, a la vez constructiva y destructiva, ha sido incubada de manera más acelerada a partir del siglo XIX a través del sistema social y económico conocido como capitalismo, el cual tiene su fundamento en la propiedad privada, el capital, y su intercambio dentro de la economía de mercado. En su esencia, este sistema concentra, excluye, y explota, promoviendo el individualismo, la competencia, el consumismo y el expansionismo en todas las sociedades. La evolución del sistema capitalista en sus distintas fases ha permitido el surgimiento y declive de diversas hegemonías, cuyas políticas y estrategias han sido devastadoras para los países periféricos. En los últimos años, con el impulso de grandes revoluciones científico-tecnológicas (biotecnología, telecomunicaciones), el proceso de globalización ha dado origen a una verdadera crisis civilizatoria de carácter multidimensional, porque no tan sólo es social y económica, sino también ecológica, energética y alimentaria. La magnitud de la crisis

afecta ya los pilares centrales que sustentan la supervivencia humana, sobre todo si se considera el fenómeno del inminente cambio climático.

En este contexto, los alimentos y las materias primas en general (energía, metales, productos vegetales diversos) jugaron un papel estratégico en la configuración del orden mundial de los últimos sesenta años. Durante este periodo, tanto los países desarrollados, principalmente E.U.A., como las instituciones internacionales (Banco Mundial, Fondo Monetario Internacional, Organización Mundial del Comercio), promovieron una serie de políticas y estrategias económicas que incluyeron: 1) La producción de excedentes alimentarios; 2) Desvalorización y revalorización de los alimentos; 3) Subsidios estratosféricos a la producción y exportación agrícola; 4) Sobreendeudamiento de las naciones; 5) Tratados de libre comercio; 6) La financiarización de las *commodities*; y 7) La compra de tierras en los países periféricos para la producción de alimentos. Esto les permitió concentrar la producción y distribución mundial de alimentos en unos cuantos países y grandes empresas agroalimentarias, garantizando pleno dominio alimentario y geopolítico del mercado global. Sin embargo, los resultados de estas políticas y estrategias para los países periféricos han sido devastadores.

Se estima que más del 70 % de los países periféricos del mundo sufren distintos grados de dependencia alimentaria. Algunos de los efectos más perniciosos de esta situación son la pérdida de soberanía y seguridad alimentaria, el retiro de los programas de apoyo a las comunidades rurales indígenas y campesinas, la desarticulación de las unidades de producción rurales, y la compra de alimentos subsidiados a las grandes empresas transnacionales. También ha generado pobreza y desnutrición en la población, explotación, despojo de territorios, migración, y deterioro de los recursos naturales. Por si fuera poco, a cambio de la inversión extranjera, los países periféricos ofrecen mano de obra, materias primas baratas y productos de exportación, lo que genera un círculo vicioso indefinido. La minimización de la agricultura familiar por competencia desleal y retiro del Estado de la gestión productiva tendrá efectos contraproducentes en los países periféricos, ya que el número de pequeños y medianos productores se redujo considerablemente a nivel mundial. Es lógico, por lo tanto, que hayan surgido grandes movimientos campesinos e indígenas de resistencia contra el gran poder del capital agroindustrial, energético, y financiero (Márquez Covarrubias, 2009; González de Molina y Toledo, 2014; Piketty, 2014; Rubio, 2014).

México, en su calidad de país periférico, enfrenta todas las consecuencias del entorno alimentario global descrito y, desafortunadamente, sus gobiernos se han caracterizado por la ortodoxia con los organismos internacionales. De hecho, el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) que entró en vigor en 1994 fue pionero en la liberalización arancelaria de los productos agropecuarios. Se estima que más de dos millones de campesinos han perdido su tierra y actividades de agricultura familiar por el TLCAN (Rubio, 2014). A pesar de ello, actualmente, se tienen firmados tratados y acuerdos comerciales con más de 44 países en todos los continentes, y se participa en el proceso de negociación del Acuerdo de Asociación Transpacífico

(TPP). La ortodoxia de esta estrategia conducirá, tarde o temprano, a un callejón sin salida, por lo que es importante reflexionar, analizar y explorar nuevos enfoques. Debe señalarse que esto es posible, ya que diversos países con capacidades similares a las de México, han desafiado el *statu quo* estableciendo mayor presupuesto público para la producción de alimentos, produciendo alimentos en países extranjeros, e imponiendo regulaciones a la financiarización de cultivos o barreras arancelarias a las importaciones de alimentos. Esto con el objetivo de estabilizar el mercado de los alimentos, evitando cambios desproporcionados del precio de los alimentos derivados de la especulación financiera o del control oligopólico del mercado agroalimentario global (Rubio, 2014).

Es fundamental reconocer las fortalezas de México en el contexto global y utilizarlas para reducir el impacto de las fuerzas del sistema y el entorno agroalimentario mundial. Nuestro país tiene una condición privilegiada en el mundo. Cuenta con un notable acervo histórico que concentra riqueza cultural, sustento alimentario por haber sido centro de origen de la agricultura, un patrón alimentario de los más diversos del mundo, diversidad biológica, y abundantes recursos naturales. Esta condición garantizó por siglos la dieta de la población mexicana, cumpliendo con los principios fundamentales de una alimentación sana y equilibrada. Sin embargo, el efecto más dramático de la política y estrategias económicas de los últimos veinte años han sido los cambios radicales en la producción de alimentos, así como en los principios que sustentaban la dieta de la población, a nivel nacional y regional.

En el ámbito de la producción de alimentos, se ha promovido la integración de cadenas agroalimentarias como un eje central de la política sectorial (Visser, 2004), estableciendo el sustento legal correspondiente a través de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (vigente desde el 2001; www.sagarpa.gob.mx). Aunque se trata de generar mayor concentración, rentabilidad, competitividad, innovación, y protección de la propiedad intelectual en las empresas asociadas a las cadenas agroalimentarias (Porter, 1998), existe un notorio sesgo para atender las necesidades del mercado global y posicionar al país en el contexto internacional del sector. Este enfoque favorece las importaciones alimentarias subsidiadas y la agricultura de altos insumos (generadora de emisiones excesivas de gases de efecto invernadero), las cuales promueven la masificación de alimentos procesados y la expansión de grandes intermediarios minoristas en las zonas urbanas, con efectos notables sobre los hábitos alimentarios, la dieta, la salud y la cultura de la población. En cambio, no se tiene una estrategia clara para incorporar en ese enfoque a los pequeños productores rurales de las comunidades indígenas y campesinas, que son los grandes perdedores de la imposición del modelo económico establecido, a pesar de su enorme aportación a la cultura alimentaria mexicana, adaptabilidad, y bajo impacto ecológico, así como su relevancia para salvaguardar la seguridad alimentaria local y regional, la biodiversidad, el conocimiento y la dieta tradicional. Esto ha provocado la constante migración de pequeños productores a las zonas urbanas del país, así como una situación de inequidad en el sector primario nacional. La

actual crisis mundial representa una coyuntura única que el país debe aprovechar para replantear el valor histórico, estratégico y futuro de la agricultura familiar (Martínez-Carrera *et al.*, 2012).

Las asimetrías ocasionadas por el contexto internacional y la complejidad de las políticas públicas establecidas han convertido a México en un importador agroalimentario neto. La proporción de alimentos básicos importados es de 45 % con respecto al consumo nacional, lo cual representó una erogación de alrededor de 250 mil millones de dólares durante el periodo 1994-2014 (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA, www.sagarpa.gob.mx; Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, www.inegi.org.mx). Esta situación ha traído como consecuencia cambios indeseables en los patrones alimentarios de la población. A tal grado que nuestro país tiene actualmente uno de los índices más altos de obesidad en el mundo; la prevalencia de sobrepeso y obesidad en hombres y mujeres de 20 años o más es de 71.2 %, mientras que en niños y niñas de 5 a 11 años es de 34.4 % (Gutiérrez *et al.*, 2012). Asimismo, se han incrementado los problemas de salud de la población relacionados con cáncer, así como aquellos asociados a la nutrición, tales como síndrome metabólico y diabetes que constituyen los principales factores de riesgo de las enfermedades cardiovasculares, principal causa de muerte en nuestro país (Rosas-Peralta y Attie, 2007; García-García *et al.*, 2008; Salud, 2011; Gutiérrez *et al.*, 2012; Hernández-Ávila *et al.*, 2013).

En este contexto, aunque se reconocen los recientes esfuerzos de incremento presupuestal a los programas sectoriales y medidas fiscales en favor de la alimentación y salud de la población, se carece de un enfoque transversal para fortalecer los sistemas agroalimentarios relevantes para el país, desde una perspectiva que considere integralmente la complejidad de la producción, la dieta, la salud y la cultura nacional. Se propone el modelo de los hongos comestibles, funcionales y medicinales para demostrar que es posible generar un análisis del sistema agroalimentario de México desde esta perspectiva; es decir, cómo desde la producción puede lograrse un impacto en la dieta y la salud de la población considerando el contexto cultural. La ciencia, la tecnología y la innovación constituyen los pilares fundamentales para desarrollar este enfoque a través de investigaciones básicas, aplicadas y socioeconómicas. La construcción de un paradigma de esta naturaleza es impostergradable, ya que los alimentos serán cada día más estratégicos en la economía mundial y el futuro de la humanidad.

II. Los hongos comestibles, funcionales y medicinales como modelo de estudio: fuente inagotable de alimentos y novedosos compuestos bioactivos

Los hongos comestibles han sido reconocidos y valorados por las sociedades humanas desde su origen, aunque su naturaleza microscópica impidió por siglos su análisis a mayor profundidad. Por ello, con el advenimiento del microscopio en el siglo XVII, se inició el estudio sistemático de los hongos hasta niveles nunca antes imaginados. La microscopía óptica aportó un principio

fundamental tan simple como hacer pasar luz visible (difractada, reflejada o refractada) sobre las estructuras microscópicas de los hongos. Otras técnicas posteriores, como la espectrofotometría ultravioleta-visible (UV-Vis), de infrarrojos (IR), y Raman permitieron caracterizar química y bioquímicamente estos interesantes organismos, obteniendo un avance espectacular en su conocimiento científico. Todos estos fundamentos básicos, junto con otras evidencias de distintos campos del conocimiento, dieron origen y enriquecen cada día a la Micología, ciencia que tiene como objetivo el estudio de los hongos. Asimismo, a finales del siglo XX, permitieron clasificar y definir a los hongos como un verdadero reino de la naturaleza (*Fungi*), independiente de las plantas (*Plantae*), los animales (*Animalia*), y de otros microorganismos.

Los hongos comestibles, funcionales y medicinales son organismos del reino *Fungi* que producen estructuras macroscópicas denominadas esporocarpos, comúnmente referidos como cuerpos fructíferos (*i.e.*, basidiocarpo, ascocarpo, basidioma, ascoma, esporóforo), a partir de una fase vegetativa llamada micelio, cuyo crecimiento es indefinido en condiciones apropiadas y que está conformado por estructuras cilíndricas microscópicas denominadas hifas. Se tienen registros de colonias fúngicas miceliales con cientos, quizá miles, de años de edad (Alexopoulos y Mims, 1979; Carlile y Watkinson, 1994). La mayoría de las especies son hongos saprófitos que pueden ser cultivados por su fácil manejo y conservación *in vitro*, manteniendo su integridad genética por clonación en cultivo axénico. Los esporocarpos son las estructuras de la fase reproductora de los hongos comestibles encargadas de la producción y diseminación de esporas, los cuales emergen del micelio a través de un complejo proceso de diferenciación en el que participan diversos factores ambientales, tales como la temperatura, la concentración de O₂ y CO₂, y la humedad relativa (Figura 1). La luz también se ha estudiado ampliamente como un factor detonador y regulador



Figura 1. Fases vegetativa (micelio) y reproductora (esporocarpo o cuerpo fructífero) del ciclo de vida de los hongos comestibles, funcionales y medicinales (reino *Fungi*).

de la fase reproductiva, demostrando que es requerida para el surgimiento y la diferenciación de los esporocarpos en prácticamente todas las especies, salvo algunas excepciones. Avances recientes en la fotobiología fúngica, empleando técnicas moleculares y análisis genómico, han demostrado que en el proceso de diferenciación intervienen genes específicos regulados por la luz, factores de transcripción, proteínas fotorreceptoras, y fitocromos. De manera general, puede decirse que los fotorreceptores identificados, que absorben luz azul principalmente, reciben fotones y envían la energía fotónica al interior de la célula por transducción para regular fotorrespuestas fúngicas por expresión génica diferencial. En la naturaleza, los hongos comestibles crecen a nivel del suelo o muy cercanos al suelo de los bosques, rodeados de árboles y el resto de los organismos. En este nivel, la luz azul está más disponible como fuente de energía fotónica, ya que su menor longitud de onda dentro del espectro visible permite mejor dispersión en el interior de los bosques. Por esta razón, los hongos comestibles han evolucionado para absorber principalmente este tipo de luz, con longitudes de onda de 460–480 nm, principalmente. Esto será suficiente para activar los fotorreceptores activos de luz azul que permitirán la adecuada diferenciación de los esporocarpos. Sin embargo, a pesar de estos avances, se desconoce si existen vías reguladoras que integren todos estos elementos con el desarrollo sexual o asexual de las especies, otros factores externos (estímulos microbianos, metabolitos volátiles, daño mecánico), su estado nutricional, tamaño de la colonia, o la edad del cultivo. También se requiere entender cómo ocurre la conversión y la transferencia de energía, tanto de las especies que requieren luz como de aquellas que no la necesitan, o cómo estas vías estarían asociadas a la translocación de nutrientes y al desarrollo de la nueva estructura de los esporocarpos, por ejemplo, el pie, el sombrero, o la producción de esporas (Martínez-Carrera, 1998; Kurtzman y Martínez-Carrera, 2013).

Se propone el concepto de hongos comestibles, funcionales y medicinales, el cual es importante definirlo para entender la magnitud de su contribución actual y futura a la seguridad alimentaria y la salud en México. Este concepto compuesto por tres unidades léxicas integra los grandes subgrupos de especies cultivadas o potencialmente cultivables que, aunque se traslapan, pueden diferenciarse claramente, con base en el estado de conocimiento de sus propiedades relevantes para la alimentación y la salud.

En el primer subgrupo se encuentran los hongos comestibles utilizados principalmente en la alimentación. Se han registrado alrededor de 14 000 especies a nivel mundial (Chang y Wasser, 2012). Para el caso de México, los datos varían entre 204–303, según la fuente, con identificaciones realizadas fundamentalmente con taxonomía clásica. Villarreal y Pérez-Moreno (1989) reportaron 204 especies de hongos comestibles; mientras que Boa (2004) registró 303 especies de hongos comestibles, medicinales y de otros usos; y Garibay-Orijel *et al.* (2010) citaron 275 especies utilizadas como alimento o de uso medicinal. En este caso, el uso medicinal o de otro tipo corresponde al registro, normalmente verbal y ocasionalmente empírico, indicado por el conocimiento tradicional en los estudios etnomicológicos.

El segundo subgrupo está integrado por los hongos funcionales, los cuales corresponden a aquellas especies de hongos comestibles que poseen propiedades funcionales demostradas con evidencia científica, ya sea antioxidantes, antimicrobianas, hipolipidémicas, antivirales, o anticancerígenas, entre otras. Se han registrado alrededor de 700 especies de hongos funcionales a nivel mundial (Chang y Wasser, 2012). En México, ya se han logrado determinar propiedades antioxidantes y antimicrobianas en algunas especies de recursos genéticos nativos (Martínez-Carrera *et al.*, 2010), en los próximos años se esperan avances en este campo.

El tercer subgrupo corresponde a los hongos medicinales, se trata de un reducido grupo de especies a partir de las cuales ya se han logrado purificar compuestos bioactivos específicos y generado diversos productos o medicamentos patentados y aprobados por instituciones oficiales de Japón, E.U.A., y la Unión Europea. Dentro de este grupo, se han identificado seis especies que cumplen este criterio con sus respectivos compuestos y nombres comerciales (Ooi y Liu, 2000; Mayell, 2001; Wasser, 2002; Lindequist *et al.*, 2005; Chen y Seviour, 2007; Zhang *et al.*, 2007; Firenzuoli *et al.*, 2008; Cheng y Leung, 2008; Sliva *et al.*, 2008; Wasser, 2011; Roupas *et al.*, 2012; Feeney *et al.*, 2014), a saber: *Lentinula edodes* [Lentinan, β -D-glucano, $(C_6H_{10}O_5)_n$]; *Coriolus versicolor* [Krestin, PSK/PSP, complejo β -glucano-proteína]; *Schizophyllum commune* [Schizophyllan, β -glucano]; *Clitopilus passeckerianus* [Pleuromutilin, diterpeno tricíclico]; *Ganoderma lucidum* [Ganoderan, glicoproteína]; y *Grifola frondosa* [Fracción-MD [(1-6)- β -D-glucano, cadenas laterales].

Con base en lo anterior, se considera que el concepto de hongos comestibles, funcionales y medicinales integra y define el gran potencial que tienen estos recursos genéticos nativos como fuente inagotable de alimentos y compuestos bioactivos para la seguridad alimentaria y la salud de la sociedad mexicana.

III. Vinculación intersectorial como base para el desarrollo de la cadena agroalimentaria

El cultivo de hongos comestibles en México es una actividad productiva relativamente reciente en la que participan los sectores público, social y privado (Martínez-Carrera *et al.*, 2007). Estos sectores han realizado aportaciones significativas al desarrollo de la cadena agroalimentaria microbiana emergente de los hongos comestibles, funcionales y medicinales. Las aportaciones han ocurrido de manera escalonada, dependiendo del momento en que cada sector se fue integrando a la cadena, tal y como puede apreciarse en la Tabla 1. La biotecnología aplicada tiene un mayor grado de desarrollo. El sector privado dio el primer paso iniciando con el cultivo de champiñones en 1933 y empleando “semilla” procedente de E.U.A., aunque posteriormente instaló el primer laboratorio de producción de “semilla” en 1954 y los centros de distribución transnacionales en 1994 para satisfacer la creciente demanda (Martínez-Carrera, 2000, 2002). También avanzó con la implementación de tecnologías de procesamiento, lo que permitió fortalecer la comercialización

Tabla 1. Etapas históricas fundamentales de la biotecnología aplicada y moderna de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en México.

Biotecnología	Etapas o Procesos	Año	Establecimiento o lugar	Sectores involucrados	R
Aplicada	Producción de inóculo o "semilla"	1954	Primer laboratorio, Cuajimalpa, D.F.	Privado: "Hongos de México, S.A."	1
		1974	Segundo laboratorio, Guadalupe Victoria, México	Privado: "Hongos Leben, S.A."	1
	Cultivo <i>in vitro</i> de recursos genéticos nativos	1984	INIREB, UV, Veracruz	Académico	2
		1991	Vinculación academia-industria.	Académico-Privado CP, <i>Campus</i> Puebla y "Hongos Leben, S.A."	1
	Colaboración entre sectores	1992	Primer laboratorio rural, Cuetzalan, Puebla	Académico-Social: CP-Cooperativa indígena ^a	3,4,5,6
		1994	Desarrollo de microempresas en la región central del país	Privado y Social	8
		1994	Establecimiento de la industria transnacional	Privado: Industria transnacional (<i>Amycel, Sylluan</i>)	7,8
	Producción de hongos	1933	Primeros ensayos, Texcoco, México	Privado	1
		1939	Primeras plantas productoras, D.F.	Privado	1
		1949	Establecimiento de la primera empresa nacional "Hongos de México, S.A.", Cuajimalpa, D.F.	Privado	1
		1975	Establecimiento de la segunda empresa nacional "Hongos Leben, S.A.", Guadalupe Victoria, México	Privado	1
		1989	Establecimiento de la producción rural de hongos comestibles, Cuetzalan, Puebla	Académico-Social: CP-Cooperativa indígena ^a	3,4,5,6
		1947	Salmuera doméstica de hongos, Azcapotzalco, D.F.	Privado	1
		1955	Primeros enlatados de hongos, Cuajimalpa, D.F.	Privado: "Monteblanco, S.A."	1
	Procesamiento de hongos	1972	Enlatado comercial de hongos a gran escala, Cuajimalpa, D.F.	Privado: "Monteblanco, S.A."	1

Tabla 1. Continuación.

Biotecnología	Etapas o Procesos	Año	Establecimiento o lugar	Sectores involucrados	R
Aplicada		1996	Envasado rural de hongos, Cuetzalan, Puebla	Académico-Social: CP-Cooperativa indígena ^a	9,10
	Productos de hongos	2005-2007	Elaboración de cápsulas, extractos, suplementos alimenticios, jarabes, licores, y cremas. Veracruz y Michoacán	Privado y Social: "Laboratorios Fungi Cap, S.A.", "Garcifer, S.A.", "Senguilhongo, S.P.R. de R.L."	11,12
	Patente de nuevo producto y su metodología	2014	Primera patente sobre la extracción de propiedades funcionales y medicinales a partir de recursos genéticos nativos	Académico: CP; <i>Campus</i> Puebla	13
	Pruebas clínicas exploratorias	2014	Primeros estudios clínicos de las propiedades funcionales y medicinales de los hongos comestibles, Puebla	Académico: CP; <i>Campus</i> Puebla	14
Moderna	Conservación y caracterización del germoplasma nativo y mejoramiento genético	2003	Unidad de Recursos Genéticos de Hongos Comestibles, Funcionales y Medicinales. Diversidad genética y mejoramiento genético mediante el uso de marcadores moleculares	Académico: CP; <i>Campus</i> Puebla ^b	15,16, 17
	Genómica de las propiedades funcionales y medicinales de los hongos comestibles, <i>in vitro</i> y modelo animal	2014	Investigaciones genómicas a partir de los recursos genéticos nativos de hongos comestibles en Puebla y México, D.F.	Académico: CP; <i>Campus</i> Puebla ^c , INMEGEN, INCMNSZ	18,19,20,21

CP= Colegio de Postgraduados. INIREB= Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. UV= Universidad Veracruzana. INMEGEN= Instituto Nacional de Medicina Genómica. INCMNSZ= Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán.

R= Referencias. 1: Martínez-Carrera *et al.*, 1991b. 2: Martínez-Carrera. 1984. 3: Martínez-Carrera y Larqué-Saavedra, 1990. 4: Martínez-Carrera *et al.*, 1991a. 5: Martínez-Carrera *et al.*, 1993. 6: Martínez-Carrera *et al.*, 1998a. 7: Martínez-Carrera, 2000. 8: Martínez-Carrera, 2002. 9: Martínez-Carrera *et al.*, 1996. 10: Martínez-Carrera *et al.*, 1998b. 11: Martínez-Carrera y López-Martínez de Alva, 2010. 12: Mayett *et al.*, 2012. 13: Martínez-Carrera *et al.*, 2009. 14: Martínez-Carrera, 2014 y presente capítulo. 15: Martínez-Carrera *et al.*, 1999. 16: Sobal *et al.*, 2007. 17: Morales *et al.*, 2010. 18: Meneses *et al.*, 2014. 19: Meneses *et al.*, 2015a-b. 20: Peña-Luna *et al.*, 2014. 21: Peña-Luna *et al.*, 2015a-b.

^a CP, *Campus* Puebla, en colaboración con la Sociedad Cooperativa Agropecuaria "Tosepan Tiraniske".

^b Financiamiento del CONACYT, a través de los proyectos: 1) 28985-B (1999-2000); 2) 0062 (1999); 3) 36085-B (2001-2004); 4) I 39163-B (2001-2003); y 5) Estancias posdoctorales y cátedra CONACYT. También los siguientes apoyos complementarios: 1) International Foundation for Science (IFS E/1743-1, 1989-1990); y 2) Ingresos propios del Área de Investigación sobre Biotecnología de Hongos Comestibles, CP, *Campus* Puebla (1996-2005).

^c Financiamiento del CONACYT, a través del proyecto número 105 Genómica de las Propiedades Funcionales y Medicinales de los Hongos Comestibles de México.

de los hongos comestibles (Martínez-Carrera *et al.*, 1991b; Martínez-Carrera, 2000). Por su parte, el sector académico en centros públicos de investigación realizó el primer cultivo *in vitro* de recursos genéticos nativos de hongos comestibles, demostrando el gran potencial de la diversidad fúngica nacional (Martínez-Carrera, 1984). En 1989, los sectores académico y social establecieron las bases para el notable desarrollo de la producción rural de “semilla” y hongos comestibles, incluyendo su procesamiento (Martínez-Carrera y Larqué-Saavedra, 1990; Martínez-Carrera *et al.*, 1991a; Martínez-Carrera *et al.*, 1993; Martínez-Carrera *et al.*, 1996; Martínez-Carrera *et al.*, 1998a-b). La vinculación academia-industria que involucra los sectores público y privado se logró hasta 1991 (Martínez-Carrera *et al.*, 1991b). Los productos de hongos surgieron a partir del 2005 como iniciativa de los sectores privado y social de Veracruz y Michoacán, con propósitos terapéuticos y de prevención de enfermedades (Martínez-Carrera *et al.*, 2007, 2012; Martínez-Carrera y López-Martínez de Alva, 2010). Los principales productos de hongos disponibles en el mercado, tanto de origen nacional como importados, incluyen bebidas (*i.e.*, extractos, jarabes, café, té, chocolate, vino), suplementos (polvo, cápsulas), y artículos para el cuidado personal (crema, jabón) [Mayett *et al.*, 2012]. La popularización en internet de las propiedades funcionales y medicinales de los hongos comestibles ha favorecido estas iniciativas que van acompañadas de la posibilidad de agregación de valor y desarrollo de mercado, la creciente demanda nacional equivalente a la observada en otras regiones del mundo, así como por el hecho de que un sector importante de la población mexicana percibe positivamente a la medicina tradicional (www.esalud.gob.mx). Sin embargo, estos productos han carecido del sustento científico en las propiedades reclamadas, lo cual tiene implicaciones éticas y de control de calidad, contenido e inocuidad que deben someterse a un control riguroso. Por ello, la primera patente en México sobre la extracción estandarizada de propiedades funcionales y medicinales a partir de los recursos genéticos nativos de hongos comestibles ha sido un paso importante, ya que estableció una vía para garantizar la trazabilidad de los productos de hongos y sus propiedades (Martínez-Carrera *et al.*, 2009). A partir de este producto estandarizado y caracterizado, se establecieron las bases para las primeras pruebas clínicas exploratorias que han generado evidencias científicas sobre sus propiedades reales con impacto en la salud (Martínez-Carrera, 2014). Hasta este nivel se ha desarrollado actualmente la biotecnología aplicada en el país.

El desarrollo de la biotecnología moderna ha sido lento, aunque ya ha revelado la importancia estratégica del sector académico para el futuro de la cadena agroalimentaria microbiana emergente de los hongos comestibles, funcionales y medicinales. Los avances en esta área han permitido establecer una muestra representativa *in vitro* de la diversidad de los recursos genéticos de estos hongos en el país, lo que ha permitido su identificación a nivel molecular como base para el mejoramiento genético de las especies (Martínez-Carrera *et al.*, 1999; Sobal *et al.*, 2007; Morales *et al.*, 2010). Con este fundamento, se logró realizar el primer estudio en nutrigenómica sobre el efecto de los extractos estandarizados de *Ganoderma lucidum* sobre el

metabolismo de lípidos en modelo animal (*in vivo*), determinando su impacto potencial en la obesidad, el síndrome metabólico y las enfermedades cardiovasculares (Meneses *et al.*, 2014, 2015a-b). Asimismo, se llevaron a cabo las primeras investigaciones genómicas sobre las propiedades anticancerígenas de los hongos comestibles, funcionales y medicinales (Peña-Luna *et al.*, 2014, 2015a-b). Estos estudios aportan evidencia científica de alta resolución sobre el efecto de los extractos estandarizados de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en la salud, partiendo del análisis integral del genoma y el transcriptoma en líneas celulares y modelos animales. También establecen las bases para las pruebas clínicas que garantizarán la inocuidad y uso de los productos de hongos comestibles, funcionales y medicinales con fines terapéuticos y de prevención de enfermedades. En este punto será fundamental la vinculación entre los centros públicos de investigación y los sectores privado y social con el objetivo de incorporar estas innovaciones al desarrollo de la cadena agroalimentaria microbiana emergente de los hongos comestibles, funcionales y medicinales.

IV. Los hongos comestibles, funcionales y medicinales: la cadena agroalimentaria microbiana emergente más importante de México

La producción actual de hongos comestibles, funcionales y medicinales representa un proceso biotecnológico microbiano, rentable, controlado, intensivo, eficiente en la utilización de agua, adaptable al cambio climático y desarrollado a pequeña (rústico) y gran escala (alta tecnología), con importantes repercusiones sociales, ecológicas y económicas en el país. Por décadas (1933-1990), el cultivo de hongos comestibles fue la actividad más hermética y poco conocida del sector primario nacional. Sin embargo, la vinculación academia-industria durante 1991-2012 permitió a los autores desarrollar investigaciones socioeconómicas para conocer su estructura, variables, sistema de mercado, relaciones con otros sectores, patrones de desarrollo, y su relevancia social, económica y ecológica (Martínez-Carrera *et al.*, 1991b, 2010, 2012). Se demostró que los hongos comestibles, funcionales y medicinales, en su calidad de sistemas microbianos, constituyen una alternativa de alimentación con gran potencial en México y que deben integrarse a la discusión agroalimentaria nacional. De hecho, representan la biotecnología microbiana productora de alimentos para el consumo humano directo más importante del país. La activa participación y vinculación de los sectores público, social y privado ha dado lugar a la conformación de una verdadera cadena agroalimentaria microbiana emergente de nivel intermedio, con dinámica nacional propia y pleno desarrollo a futuro en los mercados globales (Figura 2). Al mismo tiempo, los hongos comestibles ya constituyen una de las experiencias más avanzadas del país en la producción de alimentos bajo condiciones controladas en cortos periodos de tiempo, por lo que representan una verdadera alternativa para enfrentar los efectos adversos del cambio climático global (menor disponibilidad de agua, mayores temperaturas, fenómenos meteorológicos extremos) sobre el desarrollo del país (Martínez-Carrera *et al.*, 2010, 2012). Esta cadena conforma

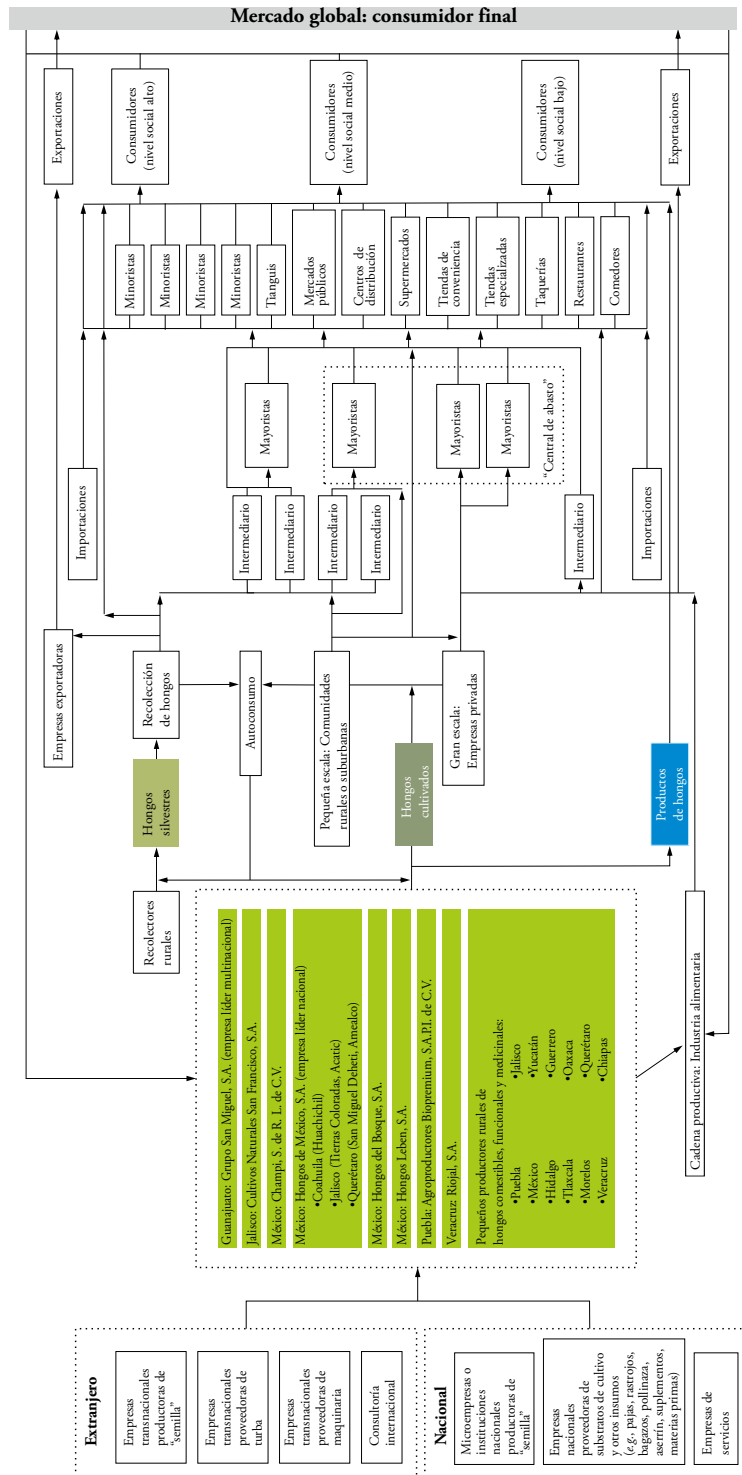


Figura 2. La cadena agroalimentaria microbiana emergente de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en México (Martínez-Carrera *et al.*, 2012). La biotecnología microbiana productora de alimentos para el consumo humano directo más importante del país y con gran potencial de desarrollo en los mercados globales.

un verdadero sistema de valor que permite la integración y conexión de los principales actores y factores concurrentes que hacen posible la producción, empaque, procesamiento, distribución, y venta del producto al consumidor final (nacional o extranjero). La cadena interacciona con otras cadenas productivas y el sistema de mercado cuenta con un subsector de servicios logísticos en pleno desarrollo (transporte, distribución, flujos, almacenaje, manejo, costos, transacciones, regulaciones). Asimismo, la cadena se cataloga como de importancia socioeconómica intermedia a nivel nacional, ya que sus niveles de producción son similares a otros productos convencionales (*e.g.*, soya, nuez, tomate cherry, chícharo, ajo, cacao, ajonjolí) y especializados, tales como aquellos denominados orgánicos (*e.g.*, café, tomate rojo, tomate cherry, chícharo, ajo, hortalizas) [Martínez-Carrera *et al.*, 2010, 2012].

V. Contribución a la producción: reconfiguración del sistema

Los esporocarpos o cuerpos fructíferos son las estructuras reproductoras de los hongos comestibles, funcionales y medicinales que se venden en los distintos puntos de venta (tianguis, mercados públicos, supermercados, tiendas de conveniencia, taquerías, restaurantes), a las cuales se asignan nombres comunes dependiendo de la especie, tales como “champiñones”, “setas”, “cuitlacoche”, “shiitake”, “reishi”, “maitake”, o “melena de león” (Figura 3). En la Tabla 2 se muestra que la producción de hongos comestibles, funcionales y medicinales se incrementó 600 % durante el periodo 1991-2014. Es decir, la cadena agroalimentaria microbiana emergente de los hongos comestibles, funcionales y medicinales, concentrada territorialmente en la región central de México, se expandió a una tasa del 26.1 % anual. Esta plataforma de producción está ubicada principalmente en 15 Estados de la república, a saber: Baja California, Coahuila, Chiapas, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, y Veracruz. A pesar de ello, sorprende que los hongos comestibles, funcionales y medicinales no sean considerados en las bases de datos oficiales del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, o en las estadísticas del Sistema de Información Agroalimentaria de consulta de la SAGARPA (www.siap.gob.mx, 2015). Sin embargo, los autores han logrado generar estadísticas confiables sobre esta cadena agroalimentaria microbiana emergente, con base en el análisis integral de entrevistas de productores, intermediarios y consumidores, la visita a plantas productoras in situ, la importación de “semilla”, la venta de “semilla”, el análisis del mercado (1982-2014), así como el estudio de diversas bases de datos (Martínez-Carrera *et al.*, 2010, 2012).

Se estima que la producción nacional fue de alrededor de 63 374 toneladas de hongos frescos en 2014, llevada a cabo por pequeños productores, emprendedores y empresas privadas. Su valor económico supera los 200 millones de dólares anuales, permitiendo la generación de más de 25 000 empleos directos e indirectos. Durante el proceso de producción, se emplean aproximadamente 500 000 toneladas de subproductos agrícolas, agroindustria-

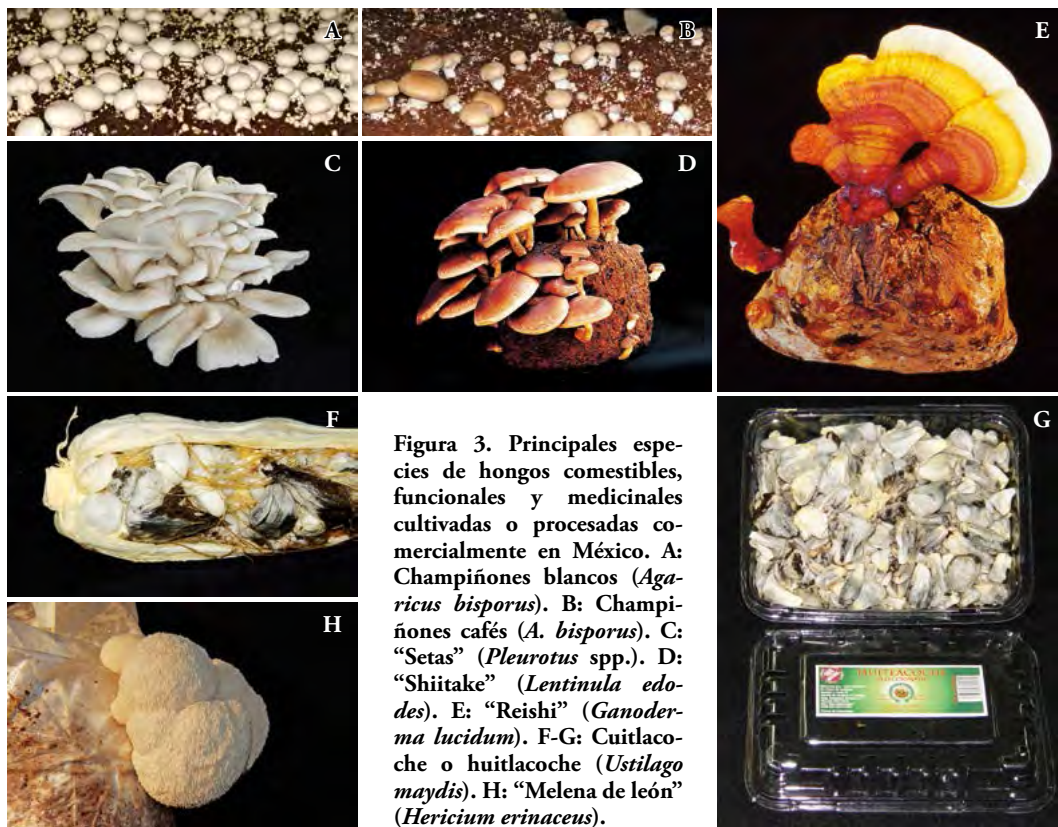


Figura 3. Principales especies de hongos comestibles, funcionales y medicinales cultivadas o procesadas comercialmente en México. A: Champiñones blancos (*Agaricus bisporus*). B: Champiñones cafés (*A. bisporus*). C: “Setas” (*Pleurotus* spp.). D: “Shiitake” (*Lentinula edodes*). E: “Reishi” (*Ganoderma lucidum*). F-G: Cuitlacoche o huitlacoche (*Ustilago maydis*). H: “Melena de león” (*Hericiun erinaceus*).

les y forestales como substrato de cultivo. Las especies que se producen a gran escala son los champiñones blancos, cafés (*i.e.*, “portobello”, “portobellini”, “cremini”, “portabela”), y orgánicos [*Agaricus bisporus* (J. E. Lange) Pilát], así como las “setas” (blanca, gris, café; *Pleurotus* spp.), las cuales también se cultivan a pequeña escala. El cuitlacoche o huitlacoche [*Ustilago maydis* (De Candolle) Corda], y el shiitake [*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler] también se producen a pequeña escala. Por su parte, el reishi [*Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst.], el maitake [*Grifola frondosa* (Dicks.) Gray] y la melena de león [*Hericiun erinaceus* (Bull.) Pers.], incluyendo sus productos funcionales, se manejan a nivel de pruebas a escala experimental o pre-comercial. La mayor proporción de la producción nacional de hongos comestibles, funcionales y medicinales corresponde a los champiñones (93.7 %), seguidos de las “setas” (4.76 %), el cuitlacoche (1.5 %), y el shiitake (0.04 %).

A pesar de la notable expansión y diversificación del sistema de producción y comercialización de los hongos comestibles, funcionales y medicinales durante el periodo 1991-2009, cuando llegó a estar conformado por un conglomerado de ocho grandes empresas y más de 600 pequeños productores (Martínez-Carrera *et al.*, 2010, 2012), se registró una reconfiguración del

Tabla 2. Producción anual estimada de hongos comestibles frescos cultivados comercialmente en México, incluyendo cantidad y proporciones de producción para el período 1991-2014.

Nombre comercial	Producción nacional de hongos frescos							
	1991 ^a		2005 ^b		2009 ^c		2011 ^d	
	Producción (Toneladas)	P (%)	Producción (Toneladas)	P (%)	Producción (Toneladas)	P (%)	Producción (Toneladas)	P (%)
"Champiñones"	8,680	96.0	45,260	95.35	43,595	93.69	59,349	95.1
Champiñón blanco	8,680	100.0	44,931.5	99.27	42,482	97.4	56,684.5	95.5
Champiñón café	-	-	328.5	0.73	1,113	2.6	2,664.5	4.5
"Setas" (blanca, gris, café)	356	4.0	2,190	4.62	2,920	6.28	3,000	4.76
"Cuitlacoche" ^{nc}	-	-	-	-	-	-	-	1.5
"Shiitake"	-	-	18.2	0.038	18.2	0.039	25	0.04
"Reishi"	-	-	PC	-	PC	-	-	-
"Maitake"	-	-	PC	-	PC	-	-	-
"Melena de león"	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	9,036	100	47,468.2	100	46,533.2	100	62,374	100

^a Martínez-Carrera *et al.* (1991b). ^b Martínez-Carrera *et al.* (2007). ^c Martínez-Carrera y López-Martínez de Alva (2010). ^d Martínez-Carrera *et al.* (2012).

^e Incluye cuitlacoche derivado tanto de la recolección del producto silvestre, como de la producción controlada (Castañeda de León *et al.*, 2015).

P= Proporción. PC= Nivel de pruebas a escala experimental o pre-comercial.

Nombres científicos: champiñones [*Agaricus bisporus* (J.E. Lange) Pilát]; "setas" (*Pleurotus* spp.); cuitlacoche o huitlacoche [*Ustilago maydis* (DC.) Corda]; "shiitake" [*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler]; "reishi" [*Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst.]; "maitake" [*Grifola frondosa* (Dicks.) Gray]; "melena de león" [*Hericium erinaceus* (Bull.) Pers.].

subsector entre 2010-2014. Una empresa (Hongos de México, S.A.) se fortaleció comprando a otra ya existente (Estado de México: Hongos del Bosque, S.A.). Otra en Guanajuato realizó fuertes inversiones en nueva infraestructura con tecnología de última generación (Grupo San Miguel, S.A.). Dos más en el Estado de México (Champi, S. de R. L. de C.V.; Hongos Leben, S.A.) permanecieron prácticamente sin cambios —no invirtieron, tecnificaron o crecieron—; mientras que una empresa en Veracruz (Riojal, S.A.) fue vendida a una externa al sector (Grupo Altex, S.A.). Dos empresas dejaron de producir (Jalisco: Cultivos Naturales San Francisco, S.A.; Puebla: Agroproductores Biopremium, S.A.P.I. de C.V.). Así, el sistema de producción empresarial se redujo 37.5 %, pasando de ocho a las siguientes cinco grandes empresas: Hongos de México, S.A.; Grupo San Miguel, S.A. (*Monterey Mushrooms*); Hongos Leben, S.A.; Champi, S. de R.L. de C.V.; y Grupo Altex, S.A. (subsidiaria de Grupo Bimbo, S.A.B.). Esto demuestra que la diversificación de empresas productoras durante el periodo 1991-2009 no logró consolidarse, a pesar de los altos niveles de inversión, aunque recientemente han surgido inversiones menores (Champiñones de Cuyoaco, S.A., en el Estado de Puebla). Se trata desafortunadamente de una regresión en el desarrollo de la cadena agroalimentaria microbiana emergente de los hongos comestibles, funcionales y medicinales, ya que un sistema de producción competitivo y diversificado es fundamental para generar productos a precios cada vez más accesibles a todos los niveles socioeconómicos de la población. Tomará mucho tiempo revertir esta situación. En la práctica, la actual reconfiguración del sistema de producción empresarial conducirá a la conformación de un duopolio, es decir, una situación donde la oferta de hongos comestibles, funcionales y medicinales está predominantemente controlada por dos empresas con fuerte poder de mercado. La estructura de este duopolio es *sui generis*, ya que lo conforman una empresa nacional (Hongos de México, S.A.) y otra extranjera (Grupo San Miguel, S.A.) que compiten entre ellas (Martínez-Carrera *et al.*, 2012), ambas líderes a nivel internacional. En la medida de que este duopolio se consolide, las empresas restantes de menor tamaño enfrentarán tarde o temprano problemas de altos costos de producción y baja competitividad, lo que podría conducir a su cierre de operaciones o venta. Está por confirmarse si Grupo Altex, S.A., podrá convertir a la empresa adquirida (Riojal, S.A.) en un negocio rentable, creciente y competitivo. El mercado desarrollado por estas empresas, como en los otros casos, beneficiará directamente al duopolio generando un círculo vicioso difícil de romper. Por su parte, los pequeños productores de hongos comestibles, funcionales y medicinales, tanto constantes como periódicos y ocasionales, han incrementado su número para satisfacer la creciente demanda de producto fresco, a nivel local y regional. Sin embargo, su evolución avanza lentamente.

VI. Contribución a la cultura alimentaria

La relación sociedad-alimentación ha determinado la trascendencia de las grandes culturas en la historia de la humanidad. En términos generales, los alimentos pueden ser de origen microbiano,

vegetal o animal. Los hongos comestibles son un alimento tradicional de origen microbiano consumido en México desde épocas prehispánicas, sobre todo en la región central del país donde se ha registrado el aprovechamiento de 303 especies diferentes. Esta cultura por consumirlos se ha mantenido y continúa enriqueciéndose hasta nuestros días, experimentando cambios relevantes sobre todo en el siglo XX, cuando ocurrió la gran transformación de la sociedad mexicana, de rural a básicamente urbana. Históricamente, esta cultura por el consumo de hongos comestibles ha venido evolucionando desde la simple recolección por conocimiento tradicional de especies silvestres, para autoconsumo o venta en los tianguis, hasta la comercialización a pequeña o gran escala de especies cultivadas con toda una gama de tecnologías de producción y procesamiento, lo que ha requerido de la organización de eventos o cadenas de distribución para promover y vender los productos a nivel nacional o internacional (Figura 4). Por ejemplo, las “Ferias de los Hongos” son cada vez más comunes y exitosas, tales como aquellas realizadas en los Estados de México (Cuajimalpa), Michoacán (Senguio), Oaxaca (Cuajimoloyas), y Chihuahua (San Juanito). Actualmente, los mercados y supermercados de México comercializan hasta ocho especies de hongos comestibles cultivados, utilizando 16 presentaciones al consumidor final y registrándose hasta 20 marcas comerciales diferentes. Las presentaciones incluyen hongos frescos (a granel, empacados) y procesados (secos, envasados, encurtidos, en salmuera o aceite), por especie o mezcla de varias especies, enteras o rebanadas. A partir del 2005, se ha registrado una creciente oferta y demanda de productos con las propiedades funcionales y medicinales de los hongos comestibles, tanto procesados (cápsulas, en polvo), como bebidas (extractos alcohólicos, jarabes, café, té, chocolate, vino) y artículos para el cuidado personal (jabones, cremas). Su comercialización se lleva a cabo por comercio electrónico, venta directa o tiendas especializadas (Mayett *et al.*, 2012). Lo anterior demuestra que la cultura por el consumo de hongos comestibles en México ha alcanzado una gran complejidad y diversificación que continuará enriqueciéndose en el futuro, en virtud de las constantes innovaciones que se integran al sector y que conducen a una extraordinaria agregación de valor.

Un factor importante que tendrá alto impacto sobre la diversificación de la cadena agroalimentaria microbiana emergente de los hongos comestibles, funcionales y medicinales será la innovación procedente de los recursos genéticos nativos, en virtud de la gran diversidad biológica y cultural de nuestro país. Un excelente ejemplo lo constituye el cuitlacoche (Figura 5), ya que México es el único lugar del mundo donde esta especie es producida de manera controlada como alimento para el consumo humano directo. De la misma manera, se han logrado identificar molecularmente diversos recursos genéticos nativos de hongos comestibles utilizados tradicionalmente en diversas regiones del país, los cuales constituyen una fuente potencial de novedosos compuestos bioactivos y tienen amplias posibilidades de producción comercial a pequeña y gran escala. Pueden mencionarse al “Hongo de Encino” [*Lentinula boryana* (Berk. & Mont.) Pegler]; los “Pollitos” [*Volvariella bombycina* (Schaeff.) Singer]; la “Lengua de toro” (*Fistulina*);



Figura 4. La cultura del consumo de hongos comestibles ha evolucionado junto con la sociedad mexicana, desde la simple recolección de hongos comestibles silvestres para autoconsumo o venta en los tianguis, hasta la producción y comercialización rural o a gran escala de hongos comestibles cultivados organizando eventos o cadenas de distribución para promover los productos. A: Venta de “duraznillos” (*Cantharellus*) en Xalapa, Veracruz. B: Recolección de “escobetas” (*Ramaria*) y otros hongos silvestres en Chalma, Atlixac, Guerrero (Foto: Ioana Torres García). C: Venta de “pollitos” (*Volvariella*) en Tepoztlán, Morelos. D: Venta de “morillas” (*Morchella*) en vehículo sobre carretera en Valle de Bravo, Estado de México. E: Venta de “setas” (*Pleurotus*), “repisas” (*Ganoderma*), *shiitake* (*Lentinula*), y productos de hongos en la Feria de los Hongos en Cuajimoloyas, Oaxaca. F: Venta de champiñones (*Agaricus*) al consumidor final en anaquel de supermercado.

los “Hongos del Maguey” (*Pleurotus* sp.; Huerta *et al.*, 2010), y las “Repisas” (*Ganoderma* spp.), los cuales pueden apreciarse en la Figura 6.

Con base en lo expuesto anteriormente, puede establecerse que México cuenta con un círculo virtuoso que favorece la cultura por el consumo de hongos comestibles y, a su vez, esta cultura retroalimenta y fortalece la cadena agroalimentaria microbiana emergente de los hongos comestibles, funcionales y medicinales. Esta cultura ha permitido la integración y aportación de los hongos comestibles a la dieta y la gastronomía mexicana, la cual fue reconocida en 2010 como patrimonio inmaterial de la humanidad por la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), en virtud de su diversidad, autenticidad y capacidad para evolucionar con base propia (Bourges, 2011). Los hongos comestibles forman parte de un gran número de recetas, platillos y tradiciones



Figura 5. La cosecha del huitlacoche o cuitlacoche (*Ustilago maydis*) en México, representa también el único país del mundo donde se lleva a cabo su producción controlada como alimento para el consumo humano directo, a pequeña y gran escala. Producción rural en Tetecala, Morelos. A: Preparación y empaqueo de cuitlacoche. B: Acopio. C: Separación de las agallas de cuitlacoche de la mazorca. D-E: Cuitlacoche empacado en campo, listo para su comercialización.

culinarias (mayor a 150) en diferentes regiones del país, cuyos elementos más comunes son maíz, frijol y chile. Los pilares que sustentan y fortalecen actualmente esta cultura son la diversidad biológica y cultural, el conocimiento tradicional, las tecnologías e innovaciones en los sistemas de producción y procesamiento, la constante agregación de valor, y las estrategias para promover el consumo creciente de los hongos comestibles, funcionales y medicinales, así como los productos de hongos.

VII. Contribución a una dieta completa y equilibrada

Es importante incluir a los hongos comestibles, funcionales y medicinales en nuestra dieta. La mayoría de nosotros consume hongos comestibles por su excelente sabor, aroma, y textura. Sin embargo, es poco conocido su gran potencial como alimento de excelente calidad con propiedades nutricionales específicas. Debe señalarse que, como cualquier otro alimento, sus propiedades podrían ser afectadas en cierto grado por la cantidad y calidad del producto, así como por la manera de preparación y consumo final de los hongos (Martínez-Carrera *et al.*, 2004).

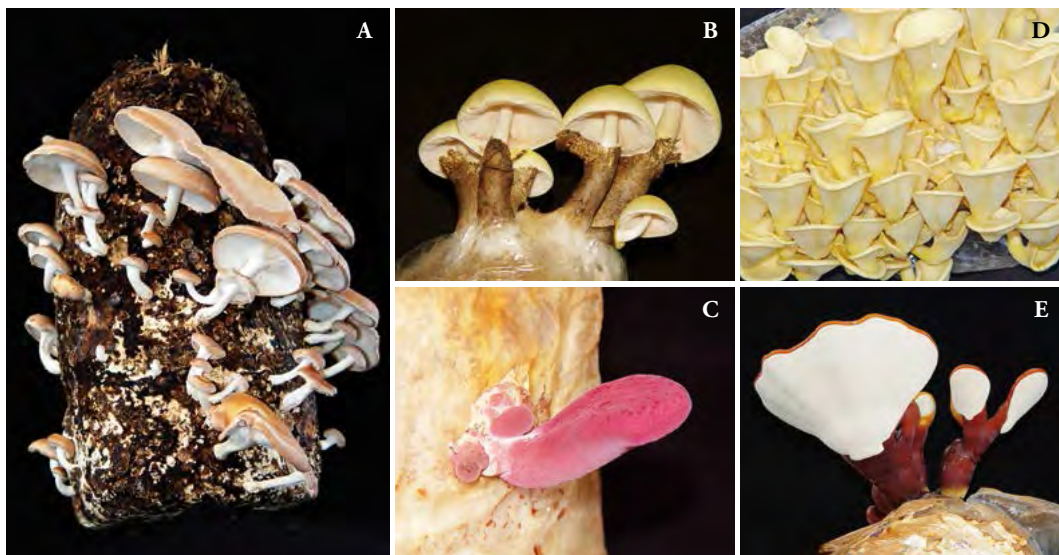


Figura 6. Recursos genéticos nativos de hongos comestibles utilizados tradicionalmente en diversas regiones del país, como fuente potencial de novedosos compuestos bioactivos y con amplias posibilidades de producción comercial a pequeña y gran escala en México. A: El “Hongo de Encino” (*Lentinula boryana*). B: Los “Pollitos” (*Volvariella bombycina*). C: La “Lengua de toro” (*Fistulina*). D: Los “Hongos del Maguey” (*Pleurotus* sp.). E: Las “Repisas” (*Ganoderma* spp.).

A. Contenido de agua

Comparativamente con otros alimentos, los hongos comestibles, funcionales y medicinales contienen entre 88.3 % y 92.5 % de agua. Como puede apreciarse en la Tabla 3, por su contenido de agua, los hongos comestibles se asemejan mucho a las verduras y las frutas, así como a otros alimentos de amplio consumo como la leche y el huevo. En cambio, las semillas contienen una menor cantidad de agua ya que se comercializan en seco; sin embargo, al cocinarse incrementan de manera significativa su contenido de agua. Por ejemplo, el arroz comercial pasa de 11.4 % a 68 % después de hervirse.

B. Valor nutricional

Los hongos comestibles, funcionales y medicinales tienen valor nutricional relevante (Tablas 4-8), ya que son buena fuente de proteínas (21.7-23.9 %, base seca; digestibilidad 80-87 %), con un balance adecuado de vitaminas (A, B₁, B₂, B₆, B₁₂, C, D₂, D₃, niacina, pro-vitamina D₂), minerales (hierro, potasio, fósforo, cobre, selenio, calcio, magnesio, manganeso, zinc) y fibra dietética (27.9-47.3 g/100 g base seca). Asimismo, tienen un buen contenido de carbohidratos (51.3-59.2 %), la mayor parte no digeribles, y un bajo contenido de grasas (1.56-3.2 %). No contienen colesterol. Comparativamente con otros alimentos (cereales: 1.1-4.0 g/100 g proteína; carne y pescado: 2.2-5.7 g/100 g proteína) y microorganismos

Tabla 3. Contenido de agua en los principales hongos comestibles cultivados comercialmente en México: a) *Shiitake* (*Lentinula edodes*); b) Champiñón blanco (*Agaricus bisporus*); c) Champiñón portobello (*A. bisporus*); y d) “Setas” (*Pleurotus ostreatus*). Los datos se presentan en forma comparativa con otros alimentos de amplio consumo popular.

Producto	Contenido de agua (%)	Materia seca (%)
Hongos comestibles		
<i>Shiitake</i>	88.3 ⁴	11.7
Champiñón blanco	92.3 ¹	7.7
Champiñón portobello	92.2 ¹	7.8
“Setas”	92.5 ⁴	7.5
Otros alimentos ^{2,3,5}		
Leche	87.8	12.2
Huevo	87.6	12.4
Carne de res (<i>sirloin</i>)	55.7	44.3
Carne de res asada (<i>sirloin</i>)	43.9	56.1
Pan dulce	37.3	62.7
Verduras		
Pepino	96.4	3.6
Lechuga	95.1	4.9
Tomate	93.5	6.5
Chile jalapeño	90.8	9.2
Zanahoria	89.8	10.2
Frutas		
Melón	92.1	7.9
Durazno	89.1	10.9
Naranja	86.1	13.9
Manzana	84.5	15.5
Aguacate	74.0	26.0
Semillas		
Trigo	13.0	87.0
Arroz	11.4	88.6
Arroz hervido	68.0	32.0
Maíz	14.0	86.0
Frijol negro	12.3	87.7

¹ Beelman *et al.*, 2004.

² Duke y Atchley, 1986.

³ Holland *et al.*, 1991.

⁴ Kurtzman, 1997.

⁵ Watt y Merrill, 1975.

Tabla 4. Contenido de proteína, así como el perfil de aminoácidos esenciales, de los principales hongos comestibles cultivados comercialmente en México: a) *Shiitake* (*Lentinula edodes*); b) Champiñón blanco (*Agaricus bisporus*); c) Champiñón portobello (*A. bisporus*); y d) “Setas” (*Pleurotus ostreatus*). Los datos se presentan en forma comparativa con otros alimentos de amplio consumo popular.

Contenido										
Producto	Base seca	Base húmeda								
		Aminoácidos esenciales (mg/100 g hongos frescos) ¹								
	Proteína	Cis	Fenilal	Isoleu	Leu	Lis	Met	Tiros	Treo	Val
Hongos comestibles										
<i>Shiitake</i>	22.7% ⁶	24	91	79	133	122	29	265	98	124
Champiñón blanco	23.9% ²	23	107	91	153	143	33	283	111	121
Champiñón portobello		23	97	85	142	127	30	292	102	120
“Setas”	21.7% ⁵	28	111	82	139	126	35	219	106	112
Otros alimentos										
Leche	25.2% ²									
Huevo	10.9 g ^{7, a}									
Carne de res	16.9 g ^{7, a}									
Tortilla	5.9 g ^{4, a}									
Pan dulce	9.1 g ^{4, a}									
Trigo	13.2% ²									
Arroz	7.3% ²									
Maíz	11.2% ³									
Frijol negro	24.2% ³									
Chile jalapeño	16.3% ³									
Aguacate	7.1% ³									
Naranja	5.0% ³									

Cis=Cisteína. Fenilal=Fenilalanina. Isoleu=Isoleucina. Leu=Leucina. Lis=Lisina. Met=Metionina. Tiros=Tirosina. Treo=Treonina. Val=Valina.

^a Valor nutritivo en 100 g de peso neto húmedo.

¹ Beelman *et al.*, 2004.

² Chang y Miles, 2004.

³ Duke y Atchley, 1986.

⁴ Hernández *et al.*, 1983.

⁵ Lelley y Vetter, 2004.

⁶ Mizuno, 1995.

⁷ Watt y Merrill, 1975.

Tabla 5. Contenido de carbohidratos, fibra cruda, fibra dietética total y quitina de los principales hongos comestibles cultivados comercialmente en México: a) *Shiitake* (*Lentinula edodes*); b) Champiñón blanco (*Agaricus bisporus*); c) Champiñón portobello (*A. bisporus*); y d) “Setas” (*Pleurotus*).

Componente	Contenido en base seca			
	<i>Shiitake</i>	Champiñón blanco	Champiñón portobello	“Setas”
Carbohidratos	59.2% ⁴	51.3% ²		57.6% ²
Polisacáridos hidrosolubles ^a	1-5% ⁴			
Glucosa (mg/g)	14.2 ⁵			10.6 ⁵
Manitol (mg/g)	134 ⁵			3.6 ⁵
Trehalosa (mg/g)	3.74 ⁵			2.73 ⁵
Fibra cruda	10.0% ⁴	8.0% ²		7.5% ²
Fibra dietética total ^b (g/100 g)	47.3 ¹	27.9 ¹	40.1 ¹	33.1 ¹
Quitina ^c	5.84% ³	8.68% ³		4.95% ³

^a Polisacáridos similares a glicógeno, α -D-glucanos, β -D-glucanos, pectina, heteroglucanos, heterogalactanos, heteromananas, xiloglucanos.

^b Componentes insolubles en agua: heteroglucanos, β -glucanos, polisacáridos ácidos, hemicelulosa, quitina, y otras sustancias de alto peso molecular, las cuales no son digeridas ni absorbidas, pero que se consideran benéficas para el funcionamiento del aparato digestivo humano.

^c La quitina (poli-N-acetil-D-glucosamina) es el principal componente de la pared celular de los hongos comestibles y es un polisacárido que forma parte de la fibra dietética.

¹ Beelman *et al.*, 2004.

² Chang y Miles, 2004.

³ Lelley y Vetter, 2004.

⁴ Mizuno, 1995.

⁵ Yang *et al.*, 2001.

Tabla 6. Contenido de lípidos y ácidos grasos en los principales hongos comestibles cultivados comercialmente en México: a) *Shiitake* (*Lentinula edodes*); b) Champiñón blanco (*Agaricus bisporus*); y c) “Setas” (*Pleurotus*).

Componente	Contenido en base seca		
	<i>Shiitake</i>	Champiñón blanco	“Setas”
Lípidos totales	3.2% ²	1.72 ¹	1.56 ¹
Proporción de ácidos grasos	3.38% ²		
Composición de los ácidos grasos:			
Acido linoléico (18:2)	72.8% ²	69.2% ³	62.9% ³
Acido palmítico (16:0)	14.7% ²	11.7% ³	16.4% ³
Acido oleico (18:1)	3.0% ²	3.5% ³	12.2% ³
Acido tetradecenoico (14:1)	1.6% ²		
Acido esteárico (18:0)	0.9% ²	5.3% ³	3.0% ³
Acido mirístico (14:0)	0.1% ²	0.8% ³	0.5% ³

¹ Lelley y Vetter, 2004.

² Mizuno, 1995.

³ Chang y Miles, 2004.

Tabla 7. Contenido vitamínico en los principales hongos comestibles cultivados comercialmente en México: a) *Shiitake* (*Lentinula edodes*); b) Champiñón blanco (*Agaricus bisporus*); y c) “Setas” (*Pleurotus*).

Componente	Contenido en base seca			
	<i>Shiitake</i>	Champiñón blanco	“Setas”	Levadura de cerveza ^{2, a}
Vitamina A (retinol) ³	31.0 µg/kg	22.1 µg/kg	35.2 µg/kg	
Vitamina B ₁ (tiamina) ³	5.9 mg/kg	7.1 mg/kg	5.7 mg/kg	15.6 mg/100 g
Vitamina B ₂ (riboflavina) ⁵	1.8 mg/100 g	5.1 mg/100 g	2.5 mg/100 g	4.2 mg/100 g
Vitamina B ₆ (piridoxina) ³	4.0 mg/kg	6.3 mg/kg	5.5 mg/kg	
Vitamina B ₁₂ (cobalamina) ⁵	0.8 µg/100 g	0.8 µg/100 g	0.6 µg/100 g	
Vitamina C (ácido ascórbico) ^{1, 5}	25 mg/100 g	17 mg/100 g	20 mg/100 g	
Pro-vitamina D ₂ (ergosterol) ⁴	325 mg/100 g			
Vitamina D ₂ (ergocalciferol) ³	90.5 µg/kg	81.5 µg/kg	91.7 µg/kg	
Vitamina D ₃ (colecalfiferol) ³	200.5 µg/kg	138.9 µg/kg	235.9 µg/kg	
Niacina ⁴	20.2 mg/100 g			

^a Levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) utilizada medicinalmente como suplemento o aditivo alimenticio.

¹ Chang y Miles, 2004.

² Kurtzman, 1997.

³ Lelley y Vetter, 2004.

⁴ Mizuno, 1995.

⁵ Mattila *et al.*, 2001.

(bacterias: 8-16 %, base seca; levaduras: 6-12 %), el contenido de ácidos nucleicos en los hongos comestibles es bajo (2.7-4.1 %, base seca) [Martínez-Carrera *et al.*, 2004].

Proteínas

El contenido de proteínas en los hongos comestibles, funcionales y medicinales es elevado, siendo del 21.7-23.9 % en base al peso seco (Tabla 4). Otros alimentos de amplio consumo popular en México tienen un contenido equivalente o más bajo, tales como la leche (25.2 %), el maíz (11.2 %), el frijol negro (24.2 %) y el aguacate (7.1 %). Entre los aminoácidos esenciales, destaca el contenido de leucina, lisina, metionina, y tirosina. Considerando este perfil, si los hongos comestibles (350-450 g frescos) se consumen como parte de la dieta tradicional mexicana basada en maíz, frijol y chile, se logra un importante efecto complementario a nivel de los aminoácidos esenciales triptófano, lisina, metionina y treonina (Martínez-Carrera y Larqué-Saavedra, 1990).

Carbohidratos y fibra dietética

La composición de los carbohidratos totales es un aspecto relevante de los hongos comestibles, funcionales y medicinales debido a su complejidad (Tabla 5). Su contenido equivale

Tabla 8. Contenido de minerales en los principales hongos comestibles cultivados comercialmente en México: a) *Shiitake* (*Lentinula edodes*); b) Champiñón blanco (*Agaricus bisporus*); y c) “Setas” (*Pleurotus*).

Componente	Contenido en base seca		
	<i>Shiitake</i>	Champiñón blanco	“Setas”
Cenizas ¹	4.7%	11.8%	9.4%
Minerales y elementos traza (mg/kg) ²			
Aluminio	11.20	20.6	16.3
Boro	20.14	17.2	4.97
Bario	1.50	1.51	1.42
Calcio	807	765	684
Cadmio	2.19	<0.002	0.59
Cobalto	<0.002	<0.002	<0.002
Cromo	1.29	1.58	1.17
Cobre	40.70	24.3	10.8
Hierro	40.60	47.2	77.5
Potasio	25,992	45,883	34,846
Magnesio	1,585	1,239	1,643
Manganeso	19.50	6.6	9.14
Molibdeno	1.44	0.60	<0.005
Sodio	195	677	189
Fósforo	6,040	9,896	7,461
Selenio	0.57	2.97	0.50
Estroncio	6.48	5.66	5.80
Titanio	0.25	0.23	0.43
Vanadio	<0.005	0.12	0.16
Zinc	80.2	60.0	80.2

¹ Mizuno, 1995.

² Lelley y Vetter, 2004.

a 51.3-59.2 % en base seca. Se incluyen aquí polisacáridos, disacáridos, monosacáridos, alcoholes azucarados, y azúcares libres. El nivel de fibra dietética varía entre 27.9-47.3 g/100 g en base seca.

Grasas

Aunque el contenido de lípidos totales en los hongos comestibles, funcionales y medicinales es bajo (1.56-3.2 %), debe resaltarse la presencia de diversos ácidos grasos (Tabla 6). Su balance también es adecuado, ya que la mayor parte (72 %) de los ácidos grasos son insaturados, los

cuales se consideran esenciales para la dieta humana. El ácido linoléico es el ácido graso insaturado que se presenta en mayor proporción (62.9-72.8 %).

Vitaminas

El contenido de vitaminas en los hongos comestibles, funcionales y medicinales se presenta en la Tabla 7, en forma comparativa con levaduras ampliamente utilizadas como suplemento alimenticio. Los hongos comestibles pueden considerarse una buena fuente de vitaminas: vitamina A: 22.1-35.2 $\mu\text{g/kg}$; Complejo B: B₁ (5.7-7.1 mg/kg), B₂ (1.8-5.1 mg/100 g), B₆ (4.0-6.3 mg/kg), B₁₂ (0.6-0.8 $\mu\text{g}/100\text{ g}$); vitamina C: 17-25 mg/100 g; vitamina D₂: 81.5-91.7 $\mu\text{g/kg}$; vitamina D₃: 138.9-235.9 $\mu\text{g/kg}$; niacina: 20.2 mg/100 g; y pro-vitamina D₂: 325 mg/100 g.

Minerales

En orden de importancia, los hongos comestibles, funcionales y medicinales contienen altas concentraciones en base seca de potasio (25 992-45 883 mg/kg), fósforo (6 040-9 896 mg/kg), magnesio (1 239-1 643 mg/kg), calcio (684-807 mg/kg), sodio (189-677 mg/kg), zinc (60.0-80.2 mg/kg), hierro (40.6-77.5 mg/kg), cobre (10.8-40.7 mg/kg), manganeso (6.6-19.5 mg/kg), y boro (4.97-20.14 mg/kg). Otros minerales se presentan en concentraciones menores, tales como el selenio (Tabla 8).

C. Integración a la dieta

Con base en sus propiedades nutricionales, los hongos comestibles son ampliamente recomendados como alimento excelente para diversos tipos de dieta (Lelley y Vetter, 2004; Martínez-Carrera *et al.*, 2004), a saber: 1) Dietas ovo-lacto-vegetarianas y vegetarianas, como fuente de proteínas, vitaminas (A, complejo B, D), minerales (potasio, fósforo, hierro), y antioxidantes (cobre, selenio, zinc); 2) Dietas bajas en calorías, para la prevención y el tratamiento de la obesidad; 3) Dietas ricas en fibra, para la prevención y el tratamiento de la colitis y el estreñimiento; 4) Dietas con carbohidratos modificados y de bajo índice glucémico, para la prevención y el tratamiento del síndrome metabólico y la diabetes; 5) Dietas bajas en sodio, para la prevención y el tratamiento de la presión arterial alta; 6) Dietas bajas en purinas, para la prevención y el tratamiento de la gota y el reumatismo; 7) Dietas bajas en colesterol y triglicéridos, para la prevención y el tratamiento de enfermedades cardiovasculares. El consumo de una porción de 350-450 g por día o tres veces por semana de hongos comestibles, funcionales y medicinales frescos representa una aportación importante a las cantidades recomendadas de consumo diario de nutrimentos para individuos normales en las condiciones de México (Martínez-Carrera *et al.*, 2004).

El consumo *per capita* anual es un indicador importante de integración a la dieta de la población, así como de los cambios en sus patrones alimentarios. Se ha reportado que este indicador, en el caso de hongos comestibles en México, corresponde a 0.620 kg (Martínez-

Carrera *et al.*, 2012). Es decir, la población mexicana consume más hongos comestibles que chile verde (0.450 kg), un alimento que distingue a la gastronomía mexicana (Tabla 9). Lo mismo sucede con la guayaba (0.3 kg), la miel (0.296 mL), o la nuez (0.014 kg). El consumo *per capita* anual de un buen número de alimentos es equivalente a aquél de los hongos comestibles, como son la uva (0.8 kg), la carne de ovino (0.8 kg), la ciruela (0.625 kg), el haba verde (0.514 kg), el chícharo (0.463 kg), el ajo (0.422 kg), o la carne de caprino (0.4 kg). Otros alimentos de amplio consumo popular se consumen en mayor medida, a saber: tortilla (105 kg), carne de res (20.4 kg), papa (16.5 kg), jitomate (13 kg), frijol (11.2 kg), aguacate (9 kg), nopal (7.5 kg), cacahuete (1.47 kg), y mojarra (1.01 kg) [datos extraídos de www.siap.sagarpa.gob.mx]. Considerando el desarrollo del país en la próxima década, así como de la cadena agroalimentaria microbiana, se espera que el consumo per capita anual de hongos comestibles, funcionales y medicinales en México se incremente a cuando menos 1-1.5 kg en el corto plazo. Como referencia, puede mencionarse que el consumo de hongos comestibles en Alemania es de 3.5 kg por persona/año.

VIII. Contribución a la salud: los hongos comestibles, funcionales y medicinales como alimentos de origen microbiano esenciales para una dieta sana

Antecedentes relevantes

La medicina tradicional de diversas culturas, sobre todo aquellas del sureste de Asia y Europa oriental, han atribuido propiedades medicinales a un buen número de especies de hongos comestibles por cientos de años, algunas de las cuales actualmente pueden cultivarse bajo condiciones controladas a pequeña y gran escala (Boa, 2004; Chang y Miles, 2004). Por su trascendencia, estos dos hechos establecieron las bases para desarrollar intensas investigaciones básicas y aplicadas durante las últimas seis décadas, las cuales han permitido acumular evidencias científicas concretas sobre los potenciales beneficios a la salud de los hongos comestibles, funcionales y medicinales.

En este contexto, puede establecerse ahora que una dieta sana, completa y equilibrada debe incluir no sólo alimentos de origen vegetal y animal, sino también de origen microbiano. Los hongos comestibles, funcionales y medicinales constituyen el alimento de origen microbiano más importante disponible para el consumo humano directo no tan sólo en México, sino también en el mundo. Sus aportaciones a la dieta son diversas. Por ejemplo, los hongos constituyen el único alimento natural de origen no animal que contiene vitamina D (efectiva para la prevención y el tratamiento del raquitismo, la osteomalacia, y la osteoporosis postmenopáusica), siendo la única fuente de esta importante vitamina para las personas con dietas vegetarianas. En este tipo de dietas, los hongos comestibles también proporcionan una fuente importante de vitaminas del complejo B (B₁, B₂, B₃, B₅, B₆, B₇, B₉, B₁₂). Asimismo, contienen potasio, importante para regular la presión arterial y la condición muscular; y fósforo, que es fundamental para la

Tabla 9. Comparación del consumo *per capita* de diversos alimentos de origen vegetal, animal y microbiano en México (www.siap.sagarpa.gob.mx; Martínez-Carrera *et al.*, 2012).

Alimento	Consumo <i>per capita</i> (kg)
Tortilla	105
Carne de res	20.4
Papa	16.5
Jitomate	13
Frijol	11.2
Aguacate	9
Nopal	7.5
Cacahuete	1.47
Mojarra	1.01
Carne de ovino	0.8
Uva	0.8
Ciruela	0.625
Hongos comestibles	0.620
Haba verde	0.514
Chícharo	0.463
Chile verde	0.450
Ajo	0.422
Carne de caprino	0.4
Guayaba	0.3
Miel (mL)	0.296
Nuez	0.014

transferencia de energía y la información genética dentro del cuerpo. Los hongos comestibles son una buena fuente de selenio, un micronutriente esencial para la dieta humana, ya que funciona como cofactor del sistema enzimático glutatión peroxidasa, cuya función principal es proteger los lípidos de la membrana celular contra los daños ocasionados por radicales libres. Diversos estudios han indicado que el consumo de altos niveles de selenio en la dieta reduce la incidencia de ciertos tipos de cáncer (Chang y Miles, 2004).

Los hongos comestibles, funcionales y medicinales reducen el riesgo de enfermedades cardiovasculares por su alto contenido de fibra dietética, ácidos grasos poliinsaturados y la ausencia de grasas trans (Guillamón *et al.*, 2010). Este efecto hipocolesterolémico se logra por diversos mecanismos, tales como la reducción de lipoproteínas de muy baja densidad, la mejora

en el metabolismo de lípidos, y la inhibición de la 3-hidroxi-3-metil-glutaril-CoA reductasa involucrada en la síntesis de colesterol endógeno (HMG-CoA, la enzima que controla la vía del mevalonato que conduce a la formación de colesterol y otros isoprenoides). La fibra dietética es un buen medio para el desarrollo de la microbiota intestinal, cuya combinación puede ayudar a prevenir la arterioesclerosis, la trombosis, la hipertensión, y la diabetes mediante la disminución de la absorción intestinal de colesterol y otras sustancias potencialmente dañinas para la salud. En los hongos comestibles, una proporción importante de la fibra dietética está compuesta por quitina (4.95-8.68 % en base seca) y β -glucanos, los cuales tienen propiedades antitumorales. También contienen azúcares libres como la trehalosa y el manitol, los cuales no son comunes en la dieta humana y han sido asociados a un efecto prebiótico, promoviendo el crecimiento y la redistribución de bacterias en el intestino humano (Chang y Miles, 2004).

Una buena parte de los lípidos de los hongos comestibles también está formada por ergosterol (602-679 mg/100 g peso seco; Mattila *et al.*, 2001), que tiene un notable efecto positivo en la salud. Los hongos comestibles irradiados con luz ultravioleta (UV) entre 275-300 nm, convierten su contenido de ergosterol en vitamina D₂. De esta manera puede lograrse un contenido de hasta 400 UI de vitamina D₂ por gramo. El consumo de hongos comestibles así irradiados con luz UV constituye una fuente natural importante para grupos sociales con altos requerimientos de vitamina D₂, tales como las mujeres postmenopáusicas (Kurtzman y Martínez-Carrera, 2013). Además, recientemente se ha demostrado que el ergosterol tiene propiedades antitumorales, probablemente mediante la inhibición de la angiogénesis inducida por tumores cancerosos sólidos (Chang y Miles, 2004).

Compuestos bioactivos y sus mecanismos de acción en el organismo

Las propiedades funcionales y medicinales de los hongos comestibles cultivados se han confirmado no sólo en los esporocarpos y sus estructuras reproductoras, sino también en el micelio, su estructura vegetativa, e incluso en el medio de cultivo derivado del crecimiento micelial. Estas propiedades, las cuales pueden concentrarse en una variedad de extractos fúngicos o compuestos bioactivos con diferentes niveles de purificación, están bien documentadas y pueden ser anticancerígenas, inmunomoduladoras, antibióticas (antimicrobianas: antivirales, antibacterianas, antifúngicas), antiparasitarias, antioxidantes, antihipercolesterolémicas, antihipertensivas, antiinflamatorias, antitrombóticas, antidiabéticas, y hepatoprotectoras (Chang y Miles, 2004; Lindequist *et al.*, 2005; Wasser, 2011). También se han reportado evidencias científicas sobre muchas otras propiedades, aunque requieren mayor nivel de soporte, tales como efectos positivos sobre diversos tipos de cáncer (vejiga, hígado, pulmón, piel, leucemia), artritis reumatoide, osteoporosis, protección del ADN contra el daño oxidativo, e incluso cicatrización de heridas, cataratas de los ojos, y salud oral (Roupas *et al.*, 2010; Lingström *et al.*, 2012).

Este amplio rango de propiedades de los hongos comestibles cultivados es tan diverso que deben estar involucrados un gran número de compuestos bioactivos. En este sentido, todavía persiste una pregunta abierta de investigación científica en este campo: ¿son compuestos bioactivos específicos actuando de manera aislada? o ¿son las combinaciones y proporciones naturales de compuestos bioactivos presentes en los esporocarpos, el micelio o los extractos? los responsables directos de las propiedades funcionales y medicinales de los hongos comestibles cultivados. Actualmente, se dispone de una amplia gama de productos de hongos en el mercado con propósitos terapéuticos y de prevención de enfermedades cuya demanda crece rápidamente, incluyendo suplementos dietéticos, extractos acuosos y alcohólicos, extractos purificados, cápsulas, tabletas, y bebidas. La popularización de las propiedades de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en internet ha dado lugar a una industria multimillonaria que comercializa una gran variedad de productos de hongos para la industria alimentaria y farmacéutica a nivel mundial. Sin embargo, se requiere una vigilancia estricta de los estándares de calidad y las regulaciones de inocuidad en estos productos por parte de las autoridades gubernamentales para proteger la salud de la población, ya que carecen del sustento de evidencias científicas pertinentes (Smith *et al.*, 2002; Chang y Miles, 2004; Martínez-Carrera *et al.*, 2012).

Los compuestos bioactivos asociados directamente a las propiedades funcionales y medicinales de los hongos comestibles cultivados son únicos y bastante complejos, por lo que sólo ha sido posible extraerlos, purificarlos y caracterizarlos básicamente durante las últimas dos décadas empleando diversos protocolos y técnicas de última generación (Zhang *et al.*, 2007). De hecho, se requieren cantidades suficientes de muestra para poder estudiarlos, considerando su alto peso molecular. Técnicas como la cromatografía de intercambio iónico, por afinidad, y preparativa por filtración en gel pueden utilizarse para la purificación de los compuestos bioactivos. Sus propiedades físicas y estructurales se analizan por cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC), HPLC de fase reversa, cromatografía de intercambio aniónico de alta eficacia con detección amperométrica pulsada, espectroscopía de resonancia magnética nuclear (NMR), y espectrometría de masas con fuente de ionización por impacto de electrones. El análisis conformacional de los compuestos bioactivos puede ser dilucidado por técnicas de dispersión de la luz, análisis por difracción de rayos X, técnicas de dispersión de neutrones en ángulo pequeño, microscopía de fuerza atómica, NMR de alta resolución, y programas de simulación o modelado computacional (Zhang *et al.*, 2007).

Con la ayuda de estas técnicas ha sido posible describir una gran variedad de compuestos bioactivos de los hongos comestibles, funcionales y medicinales, con diferentes propiedades físicas y químicas, estructura, longitud, peso molecular, frecuencia de ramificación, conformación y complejidad. Se ha reportado que estas características determinan su actividad biológica y que es posible modificarlas químicamente para mejorarlas. Los compuestos bioactivos de los hongos comestibles incluyen lectinas, proteínas específicas, polisacáridos con diferente composición

de azúcares, y compuestos de alto peso molecular, a saber: complejos polisacárido-péptido; complejos polisacárido-proteína; (1→3) o (1→6)- α -glucanos; (1→3) o (1→6)- β -D-glucanos; heteroglicanos; glicopéptidos; polisacaropéptidos; heteroglicanopéptidos; proteoglicanos; glicoproteínas; terpenoides; diterpenos tricíclicos; triterpenos; ergosterol; proteínas antihipertensivas e inmunomoduladoras (Lindequist *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2007; Kilaru *et al.*, 2009; Rop *et al.*, 2009; Refaie *et al.*, 2010). La obtención estandarizada de estos compuestos bioactivos en grandes cantidades y con alta calidad a partir de una especie en particular ha sido difícil de lograr hasta ahora, lo cual representa una desventaja para realizar estudios científicos comparativos *in vitro* e *in vivo*, así como sus aplicaciones potenciales.

Los compuestos bioactivos de los hongos comestibles, funcionales y medicinales no son sintetizados por el cuerpo humano. La biodisponibilidad de los β -glucanos, los compuestos fúngicos más estudiados, en la circulación sistémica después de su administración se ha reportado en aproximadamente 4.9 % después de 15 min (Borchers *et al.*, 2008). Una vez absorbidos, el sistema inmunitario los reconoce como moléculas extrañas a través de receptores celulares que activan vías de señalización, tales como los receptores CR3 (*complement receptor type 3*), Dectin-1 (receptor de membrana), TLRs (*toll-like receptors*), LacCer (*lactosylceramide*), y carroñeros (Borchers *et al.*, 2004; Chen y Seviour, 2007). Aunque los seres humanos carecen de las enzimas (1,3- β -glucanasa) para degradar los β -glucanos, todavía se desconoce si éstos entran al torrente sanguíneo en su forma natural o parcialmente degradados por los procesos de ingestión y absorción en el intestino. Hasta la fecha, se han reportado diversos patrones de respuesta inmune innata y adaptativa a partir de los compuestos bioactivos de muchas especies de hongos comestibles empleando modelos celulares (*in vitro*), animales (*in vivo*), y pruebas clínicas en humanos (Chang y Miles, 2004; Roupas *et al.*, 2010); prácticamente ningún efecto negativo adverso se ha registrado si se consumen o administran en cantidades supervisadas médicamente (Cheng y Leung, 2008; Sumiya *et al.*, 2008; Nieminen *et al.*, 2009; Roupas *et al.*, 2010). Un buen número de componentes del sistema inmunitario pueden ser específicamente activados, estimulados o madurados, por ejemplo: los macrófagos, las células NK (*natural killer cells*), las células T, las células B, las células dendríticas, y la producción de citosinas (γ -interferón, IFN- γ ; factor- α de necrosis tumoral, TNF- α). La promoción de expresión génica en la vía NF- κ B (*nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells*) también se ha registrado en células monocíticas humanas THP-1 por la acción de extractos etanólicos del hongo medicinal *Ganoderma*. Se trata de un factor de transcripción muy importante que regula los genes responsables de las respuestas inmunitarias innata y adaptativa (Cheng *et al.*, 2010). Todas estas vías están asociadas a efectos anticancerígenos, así como a propiedades antiproliferativas, inhibición de la angiogénesis y la inducción de apoptosis en células cancerosas, aunque los mecanismos de acción completos todavía no han sido dilucidados (Borchers *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2012). En otros casos, se ha reportado que los compuestos bioactivos de los hongos comestibles suprimen la activación de

células B *in vivo*, lo cual ha promovido investigaciones más amplias sobre su efecto en alergias y enfermedades autoinmunes (Borchers *et al.*, 2008). En todos los estudios realizados hasta ahora no se registraron efectos citotóxicos sobre células cancerosas de los compuestos bioactivos de los hongos comestibles, funcionales y medicinales.

En el caso de las propiedades antivirales de los compuestos bioactivos de los hongos comestibles, se han propuesto mecanismos de acción adicionales. Por ejemplo, se sugirió que la interacción entre un proteoglicano extraído de *Ganoderma lucidum* y la membrana celular bloquea la adsorción del virus *herpes simplex* (Liu *et al.*, 2004). Por su parte, la lentina, la velutina y la marmorina, proteínas fúngicas extraídas de *Lentinula edodes*, *Flammulina velutipes* e *Hypsizygus marmoreus*, respectivamente, así como una lectina de *Pleurotus citrinopileatus*, inhibieron la transcriptasa reversa HIV-1 del virus de inmunodeficiencia humana (HIV) [Wang y Ng, 2001; Ngai y Ng, 2003; Li *et al.*, 2008; Wong *et al.*, 2008]. Esta enzima es fundamental para los procesos de infección y replicación de este tipo de virus. Un ácido ganodérico de *Ganoderma lucidum* inhibió la proteasa HIV-1, enzima esencial en el ciclo de vida del virus HIV (El-Mekkawy *et al.*, 1998). Estos hallazgos permitirán desarrollar nuevas terapias contra los retrovirus (familia: *Retroviridae*).

La creciente evidencia científica acumulada en las últimas décadas sobre los beneficios potenciales en salud de los hongos comestibles, funcionales y medicinales ha justificado la realización de pruebas clínicas directamente en seres humanos. Interesante es el caso de estudios epidemiológicos en Japón, los cuales indicaron que el consumo de hongos comestibles está asociado a menores tasas de muerte por cáncer, comparado con el promedio nacional de ese país (Mizuno, 1995, 1999). En Corea, otro análisis epidemiológico demostró una asociación entre un mayor consumo de hongos comestibles y un correspondiente menor riesgo de cáncer de seno en mujeres (Shin *et al.*, 2010). Pruebas clínicas empleando diferentes rutas de administración (oral, intraperitoneal, intravenosa) han confirmado ampliamente efectos diferenciales de los β -glucanos y los complejos polisacárido-proteína de los hongos comestibles sobre el sistema inmunitario humano [linfocitos T colaboradores, células NK, inmunoglobulinas (IgG, IgM), leucocitos, neutrófilos, citocinas, IFN- γ , TNF- α , óxido nítrico inducible (NO)], y células cancerosas (Lindequist *et al.*, 2005; Ramberg *et al.*, 2010; Roupas *et al.*, 2012; Aleem, 2013). Las pruebas clínicas se han llevado a cabo para evaluar efectos anticancerígenos (*e.g.*, cáncer de seno, colorrectal, colon, cervical, ovario, endometrio, gástrico, próstata, y páncreas), y sobre la inmunomodulación en diversos estados de enfermedad como la diabetes (tipo II), las enfermedades cardiovasculares, la cognición y salud del cerebro, la hepatitis B, la inmunodeficiencia humana (HIV), el asma, e incluso el estreñimiento (Nanba *et al.*, 2000; Roupas *et al.*, 2012). Los resultados más consistentes y prometedores se han registrado en cáncer de seno, colorrectal, colon, y gástrico, así como en diabetes y enfermedades virales. Los efectos comunes en todos estos casos observados en las pruebas clínicas, derivados de los hongos comestibles y sus productos, son la

modulación del sistema inmunitario humano, mayor sobrevivencia de pacientes cancerosos, y menores daños producidos por radioterapia y quimioterapia. Actualmente, los hongos comestibles cultivados, sus extractos y compuestos bioactivos se consideran una excelente alternativa para complementar eficazmente las estrategias de prevención y las terapias convencionales contra el cáncer (Cheng y Leung, 2008; Roupas *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2012). En Japón, se ha demostrado que el *lentinan* prolonga la supervivencia de pacientes con cáncer gástrico avanzado, cuando se utiliza como parte de una estrategia quimio-inmunoterapéutica (Ina *et al.*, 2013).

Es evidente el futuro prometedor de los hongos comestibles cultivados, sus extractos y compuestos bioactivos para promover la salud humana, a través de la prevención y el tratamiento de enfermedades. Sin embargo, se requiere de una adecuada integración de todos los procesos involucrados en su aprovechamiento, desde la producción, el procesamiento, la estandarización, así como la aplicación de los productos fúngicos y compuestos bioactivos desarrollados. Se trata de procesos biotecnológicos microbianos con impresionante agregación de valor, los cuales incluyen una gran diversidad de recursos genéticos, especies, sustratos, métodos de cultivo, estructuras biológicas, manejo postcosecha, tecnologías de conservación, protocolos de extracción y purificación, condiciones de elaboración y almacenamiento (hongos, extractos, compuestos, fracciones), composiciones químicas, dosis, rutas y formas de administración (oral, parenteral), periodos y mecanismos de absorción, biodisponibilidad, mecanismos de acción, y las interacciones entre los productos fúngicos y el genoma. En la medida que las investigaciones básicas, aplicadas y socioeconómicas contribuyan al conocimiento de estos procesos será posible lograr un mayor impacto de los beneficios funcionales y medicinales emergentes de los hongos comestibles cultivados en la sociedad.

La era genómica y su impacto en el estudio de las propiedades funcionales y medicinales de los hongos comestibles

El advenimiento de la genómica ha generado avances científicos e innovaciones sin precedente en prácticamente todos los campos de la investigación científica, se espera que su impacto social y en la economía global sea cada vez mayor en un tiempo sorprendentemente corto (Jiménez-Sánchez *et al.*, 2012). Las plataformas tecnológicas y bioinformáticas actuales permiten la secuenciación y el análisis de genomas completos a costos relativamente accesibles. Para los hongos comestibles, funcionales y medicinales la genómica representa no tan sólo una poderosa herramienta de análisis, sino también una oportunidad extraordinaria para entender directamente el efecto de sus compuestos bioactivos en la expresión génica y el metabolismo celular en su conjunto. Esto también representa, inclusive, la posibilidad de entender la respuesta biológica de una persona al tratamiento con estos compuestos bioactivos, a partir de su individualidad genómica.

Los primeros estudios realizados en México han sido desarrollados por un excelente trabajo interinstitucional entre el Colegio de Postgraduados (CP, *Campus* Puebla), el Instituto Nacional

de Medicina Genómica (INMEGEN) y el Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán (INCMNSZ), con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Estos estudios han permitido analizar las propiedades anticancerígenas de extractos estandarizados de los recursos genéticos mexicanos de *Ganoderma lucidum* (CP-145) en modelo celular (*in vitro*) utilizando células triple negativas de cáncer de seno (MDA-MB-468), las cuales representan uno de los cánceres más agresivos que se conocen (Peña-Luna *et al.*, 2014, 2015a-b). También se han realizado investigaciones en nutrigenómica sobre la interacción entre los hongos comestibles y el metabolismo de lípidos, con el propósito de entender su impacto potencial en la prevención de las enfermedades cardiovasculares (Meneses *et al.*, 2014, 2015a-b). En este caso, se estudió el efecto de extractos estandarizados de los recursos genéticos mexicanos de *G. lucidum* (CP-145) sobre la expresión diferencial de genes relacionados con el metabolismo de colesterol y de síntesis de ácidos grasos en animales de experimentación (ratones cepa C57BL/6), tales como: HMG-CoA (*3-Hydroxy-3-Methyl-Glutaryl-CoA reductase*); SREBP-1 (*Sterol Regulatory Element-Binding Protein 1*); SREBP-2 (*Sterol Regulatory Element-Binding Protein 2*); LDL-r (*Low Density Lipoprotein Receptor*); ABCA1 (*ATP-Binding Cassette, Sub-family A, member 1*); ABCG5 (*ATP-Binding Cassette, Sub-family G, member 5*); ABCG8 (*ATP-Binding Cassette, Sub-family G, member 8*); CYP 7 (*Cytochrome P450, family 7*); FAS (*Fatty Acid Synthase*); ACC (*Acetyl-CoA Carboxylase*); y PGC1 β (*Peroxisome Proliferator-activated Receptor Gamma, Coactivator 1 beta*).

Estrategia para la obtención de productos naturales y nuevos fármacos por biotransformación fúngica

Los hongos comestibles, funcionales y medicinales son organismos heterótrofos y osmótrofos, dado que su nutrición se lleva a cabo por absorción (osmótica, difusión, sistemas de transporte especializados) de agua y sustancias disueltas a través de la membrana plasmática de las hifas (Alexopoulos y Mims, 1979; Carlile y Watkinson, 1994). En este tipo de alimentación, característico del reino *Fungi*, las hifas liberan enzimas extracelulares en el sustrato donde crecen para degradar sustancias complejas y convertirlas en componentes más simples, los cuales son absorbidos y utilizados para su desarrollo. Los autores han aprovechado esta extraordinaria capacidad de los hongos comestibles para desarrollar una estrategia biotecnológica que permite: 1) La producción a gran escala de micelio y basidiocarpos, bajo condiciones axénicas y controladas; 2) La extracción de sus compuestos bioactivos; y 3) La obtención de productos naturales (extractos naturales) y nuevos fármacos por biotransformación fúngica (extractos modificados) con propiedades funcionales y medicinales (Figura 7). Se presenta el ejemplo de la bioprospección de los recursos genéticos nativos del género *Ganoderma* en la región central de México, el cual ha demostrado una amplia diversidad genética a nivel molecular. Se seleccionó la especie *G. lucidum* (cepa CP-145) como modelo de estudio para sustentar la estrategia biotecnológica desarrollada (Figura 8). Esta interesante especie, conocida por las comunidades indígenas y campesinas como

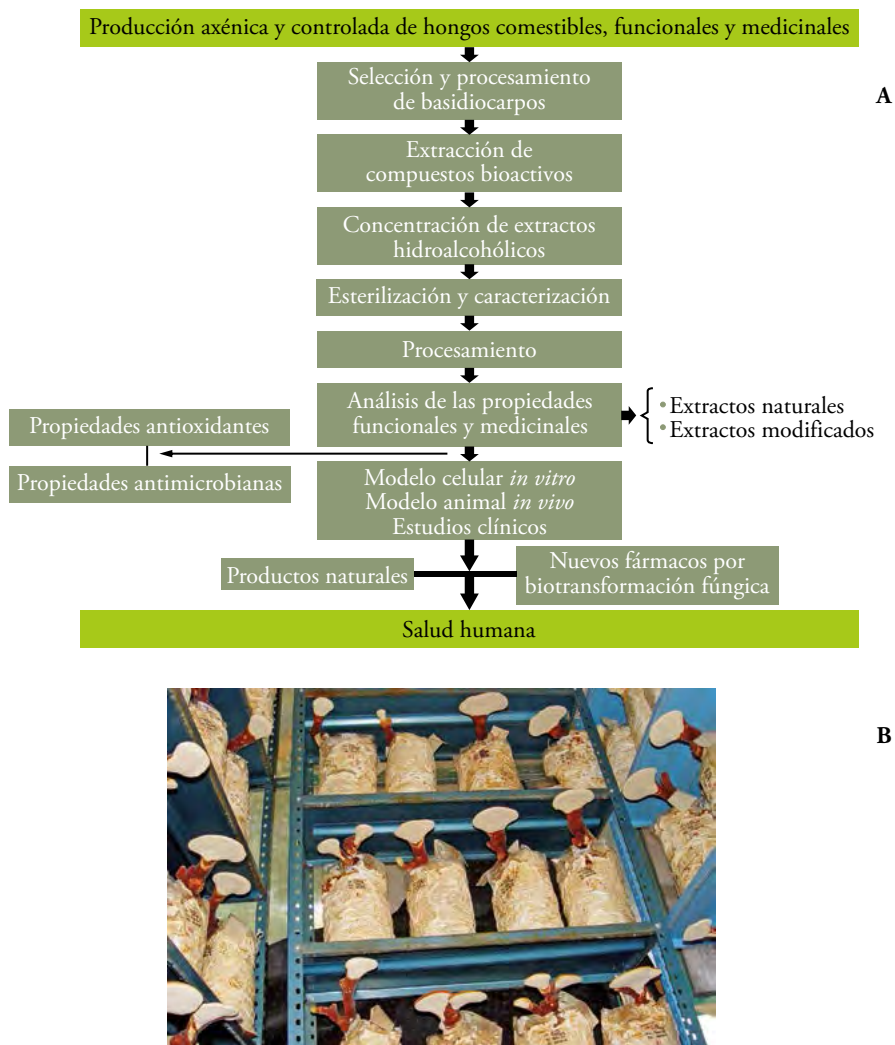


Figura 7. Estrategia general para la obtención de productos naturales y nuevos fármacos por biotransformación fúngica a partir de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en México. A: Las etapas fundamentales incluyen procesos de producción, procesamiento, extracción, esterilización, análisis, estudio en modelos *in vitro* e *in vivo*, y estudios clínicos. B: El modelo de estudio presentado en este trabajo: los recursos genéticos mexicanos de *Ganoderma lucidum*.

“repisas”, se ha cultivado axénicamente en medios y sustratos convencionales, así como modificados a través de la adición de ácido acetilsalicílico (AAS). El AAS, conocido como aspirina en su presentación como medicamento, está considerado como el fármaco más exitoso de la historia de la medicina por sus demostradas propiedades antiinflamatorias, analgésicas, antipiréticas, y como antiagregante plaquetario (www.bayer.com). En condiciones de laboratorio *in vitro*, el

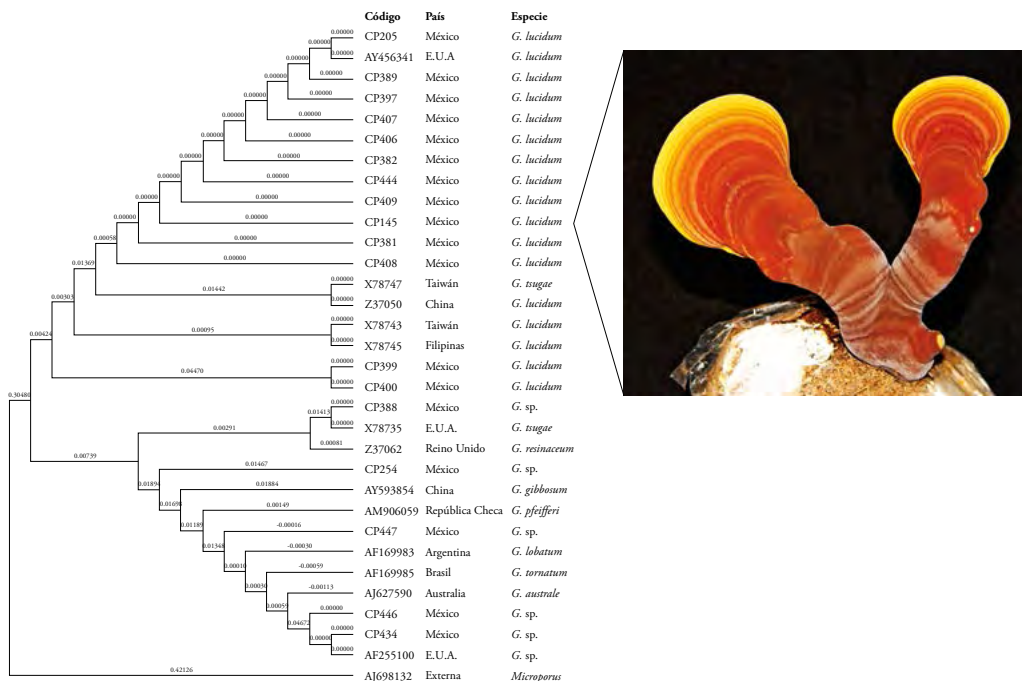


Figura 8. Dendrograma representativo de los recursos genéticos nativos del género *Ganoderma* que se desarrollan en diferentes regiones geográficas de México, a partir de los cuales se seleccionó la cepa CP-145 de *G. lucidum* como modelo de estudio. Se deriva de una matriz generada en el programa MEGA4, por el método *Neighbor-Joining* (Tamura *et al.*, 2007), empleando secuencias de la región ITS del ADNr y de *Microporus* como grupo externo. Las especies de *Ganoderma* corresponden principalmente a aquellas reconocidas por Moncalvo *et al.* (1995), Gottlieb *et al.* (2000), y Wang y Yao (2005). El código de las cepas equivale a la clave del CREGEN-HCFM, CP, Campus Puebla, o al número de acceso en el *European Bioinformatic Institute*, Inglaterra (EBI: www.ebi.ac.uk). Todas las secuencias del ADN están registradas en la base de datos del CP, Campus Puebla (Morales *et al.*, 2010).

AAS (100 μ M) tiene un efecto directo sobre el metabolismo fúngico, incrementando significativamente la producción de biomasa micelial e induciendo la expresión de enzimas lacasas en *G. lucidum* (Figura 9). Esto puede conducir a un periodo de cosecha más corto (precocidad) de los basidiocarpos, aunque no se afecta su producción, ni su morfología, al cultivar *G. lucidum* sobre sustrato convencional de aserrín de encino, así como sobre sustrato modificado de aserrín de encino con ácido acetilsalicílico (AAS, 10 mM) [Tabla 10]. Sin embargo, el AAS sí tiene un efecto importante sobre el rendimiento, la composición, así como las propiedades funcionales y medicinales de los extractos hidroalcohólicos estandarizados obtenidos a partir de los basidiocarpos cosechados en ambas condiciones de estudio (control *versus* tratamiento con AAS). En comparación con los extractos naturales obtenidos a partir de basidiocarpos de *G. lucidum* cultivados sobre aserrín de encino, se obtiene un mayor rendimiento (8.7 %) en los

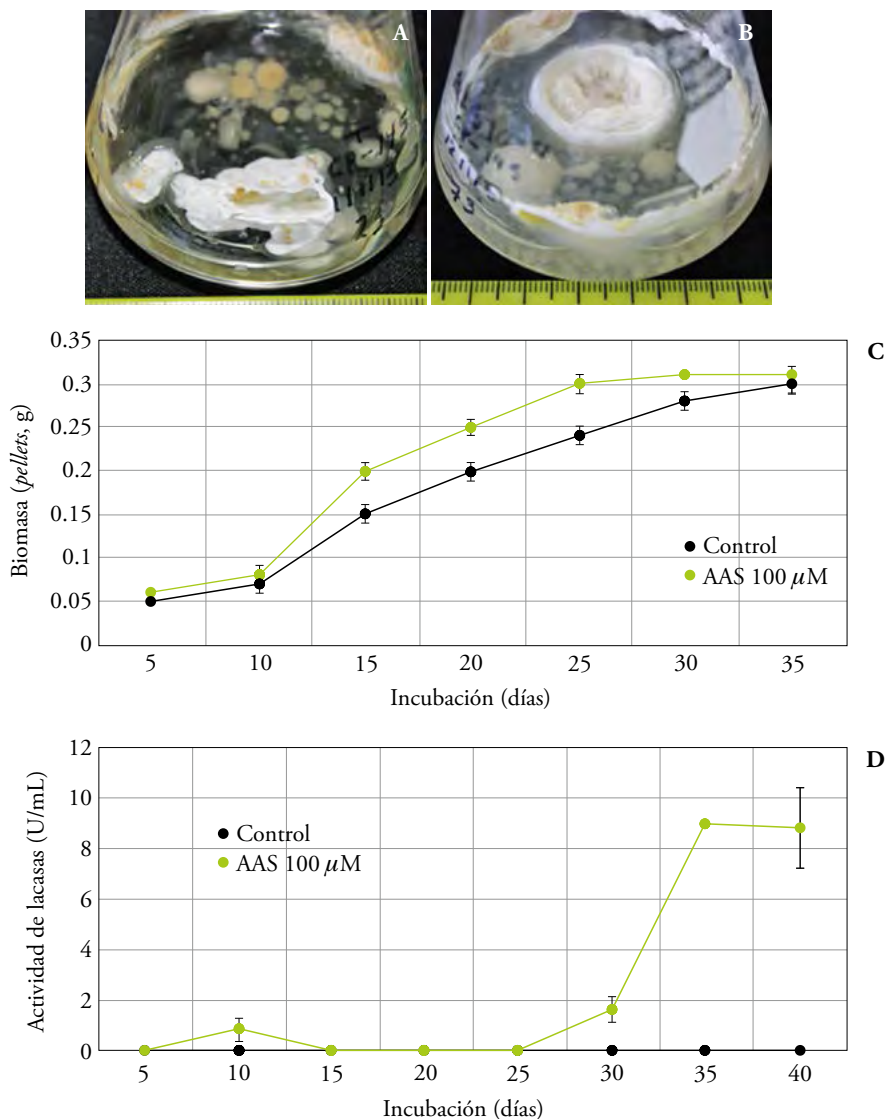


Figura 9. Efecto del ácido acetilsalicílico (AAS) sobre el desarrollo micelial de una cepa nativa de *Ganoderma lucidum* (CP-145) cultivada en medio líquido de papa-dextrosa (PDL), en condiciones de agitación a 120 rpm e incubación a $28 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 35 días. A: Crecimiento micelial en la condición control (sin AAS). B: Crecimiento micelial en el tratamiento, PDL con AAS (100 µM). C: Cinética de la producción de biomasa seca en control y tratamiento. D: Cinética de la actividad enzimática de lacasas en control y tratamiento, utilizando el método de oxidación del ABTS (Bourbonnais y Paice, 1990.). Los datos ($n=4$) se procesaron utilizando análisis de varianza en una dirección, seguido por la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha=0.05$; *Statistical Analysis System*, SAS, 9.0).

Tabla 10. Producción de basidiocarpos y eficiencia biológica del recurso genético nativo CP-145 de *Ganoderma lucidum*, cultivado sobre sustrato convencional (aserrín de encino) y sustrato (aserrín de encino) con ácido acetilsalicílico (tratamiento: AAS 10 mM).

Condición	Peso fresco promedio de la UP* (g)	Peso seco promedio de la UP* (g)	P (días)	Peso fresco promedio de basidiocarpos* (g)	Peso seco promedio de basidiocarpos* (g)	EB* (%)
Aserrín de encino (control)	2,237.9±64.5 ^a	985.7±34.1 ^a	83.8±9.8	72.1±8.3 ^a	28.8±6.5 ^a	7.3±0.8 ^a
Aserrín de encino +AAS	2,255.5±47.2 ^a	994.2±20.8 ^a	81.3±6.7	69.2±6.8 ^a	26.1±3.4 ^a	6.9±0.6 ^a

UP=Unidad de producción.

P=Período de tiempo promedio desde la inoculación a la primera cosecha de basidiocarpos.

EB=Eficiencia biológica (peso fresco de los basidiocarpos/peso seco del sustrato×100).

* Los datos (n=40) se procesaron utilizando análisis de varianza en una dirección, seguido por la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha=0.05$; *Statistical Analysis System*, SAS, 9.0). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas.

extractos modificados obtenidos a partir de basidiocarpos cultivados sobre aserrín de encino con AAS (Figura 10A). El barrido espectrofotométrico (200-1000 nm) demostró que la composición química de los extractos naturales y los extractos modificados es diferente (Figura 10B). Esto se confirmó al demostrar que los extractos modificados, derivados de basidiocarpos cultivados sobre aserrín de encino con AAS, contienen 6.5% más glucanos totales (α -glucanos, β -glucanos), 67.5 % más hierro, 12.5 % más manganeso, 19 % más fósforo, y 97.4 % más proteína que los extractos naturales del control de *G. lucidum* (Figura 10C), aunque la capacidad antioxidante por fluorescencia de especies reactivas no mostró diferencias significativas (Figura 10D). Análisis más amplios de la composición química de los extractos naturales y los extractos modificados demostraron que son equivalentes en el contenido de carbohidratos (0.58 %; glucosa: 0.1 %), fibra dietética total (0.1-0.15 %; *i.e.* polisacáridos, oligosacáridos, quitina), grasas (0.01 %; sin grasas saturadas, ni grasas trans), calorías (4/100 g), vitaminas (B₁, B₂, B₃, B₆, B₁₂, D), minerales (calcio, cobre, hierro, magnesio, manganeso, potasio, selenio, sodio, zinc, fósforo), y un buen perfil de ácidos orgánicos. Este cambio en la composición química incrementó la actividad antimicrobiana en los extractos modificados obtenidos a partir de basidiocarpos de *G. lucidum* cultivados sobre aserrín de encino con AAS, ya que se requirió 50 % menos extracto estandarizado (12.49 mg/mL) para lograr el efecto inhibitorio y bactericida sobre *Stenotrophomonas* spp., en comparación con el extracto natural (25.90 mg/mL) [Figura 11].

Las evidencias presentadas en el párrafo anterior, aparte de describir la obtención de productos naturales (extractos naturales), demostraron que es posible modificar, por bio-transformación fúngica del AAS, la composición química y las propiedades funcionales y

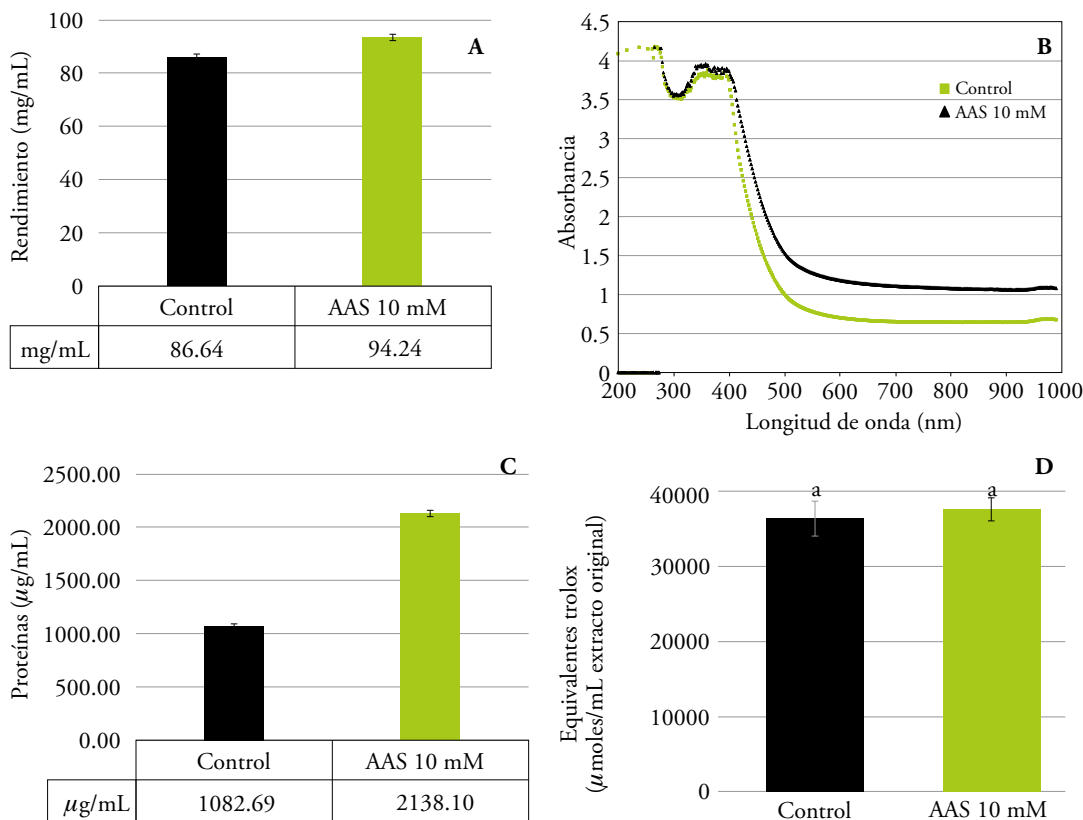


Figura 10. Efecto del ácido acetilsalicílico (AAS) sobre los extractos hidroalcohólicos estandarizados obtenidos a partir de una cepa mexicana de *Ganoderma lucidum* (CP-145). Análisis comparativo entre extractos naturales (control) obtenidos a partir de basidiocarpos cultivados en sustrato convencional (aserrín de encino) y extractos modificados obtenidos a partir de basidiocarpos cultivados en sustrato (aserrín de encino) con ácido acetilsalicílico (tratamiento: AAS 10 mM). A: Rendimiento obtenido de los extractos ($n=4$, peso seco) procedentes de la condición control y el tratamiento. B: Barrido espectrofotométrico en microplaca (200-1000 nm) de los extractos ($n=3$) procedentes de la condición control y el tratamiento. C: Concentración de proteínas por espectrofotometría en microplaca ($n=3$; Bradford, 1976) en los extractos procedentes de la condición control y el tratamiento. D: Capacidad antioxidante por fluorescencia de especies reactivas ($n=8$; Huang *et al.*, 2002) de los extractos procedentes de la condición control y el tratamiento.

medicinales de los extractos hidroalcohólicos obtenidos a partir de basidiocarpos de *G. lucidum* cultivados sobre aserrín de encino. La evidencia disponible sugiere que el AAS presente en el sustrato de cultivo entra a las hifas (diámetro: 5-20 μm) por transporte pasivo como soluto (Carlile y Watkinson, 1994; Esser y Lemke, 1994). Esto puede ocurrir durante la absorción osmótica de agua a través de la membrana plasmática hacia el citoplasma, cuyo movimiento generado por el gradiente de la presión hidrostática interna distribuye al AAS en solución a toda la colonia por la corriente protoplasmática del sistema hifal, así como por translocación

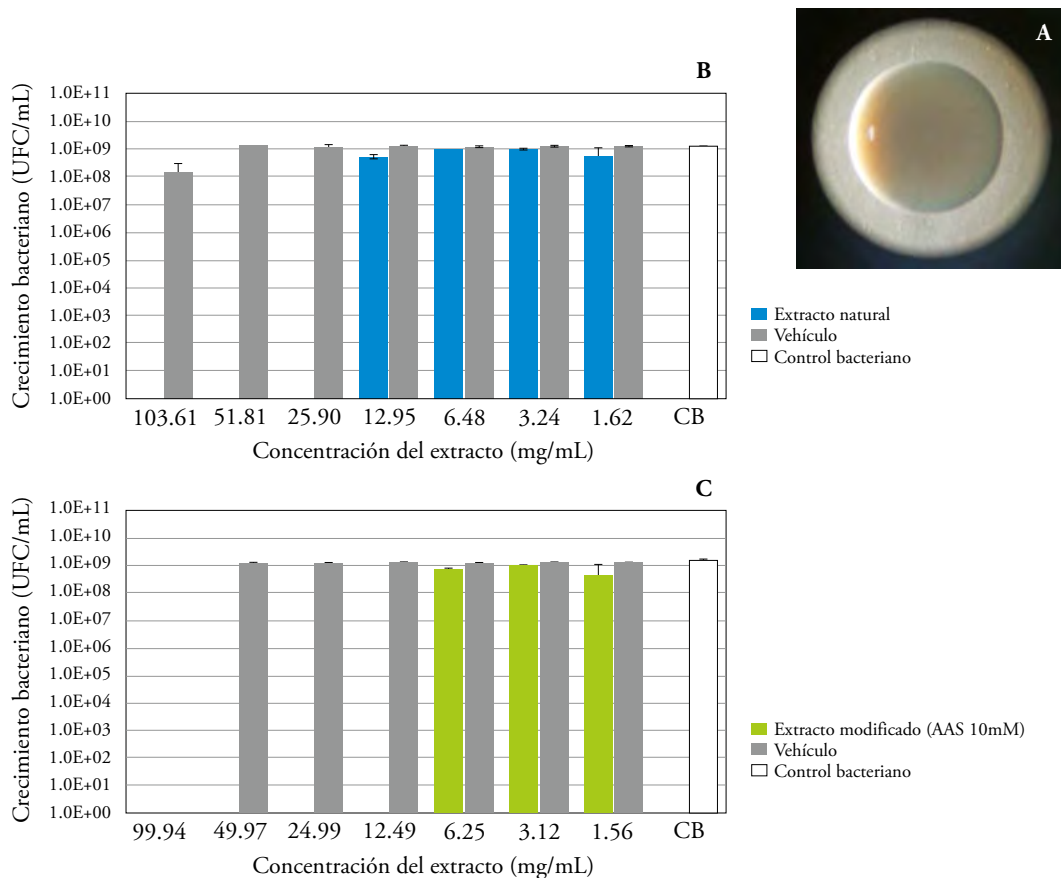


Figura 11. Efecto del ácido acetilsalicílico (AAS) sobre las propiedades antimicrobianas de los extractos hidroalcohólicos estandarizados obtenidos a partir de una cepa mexicana de *Ganoderma lucidum* (CP-145), utilizando el método estándar de susceptibilidad por microdilución descrito por el *Clinical and Laboratory Standards Institute*, E.U.A. (CLSI, 2006). La absorbancia se determinó en espectrofotómetro a 690 nm. Análisis comparativo entre extractos naturales (control) obtenidos a partir de basidiocarpos cultivados en sustrato convencional (aserrín de encino) y extractos modificados obtenidos a partir de basidiocarpos cultivados en sustrato (aserrín de encino) con ácido acetilsalicílico (tratamiento: AAS 10 mM). A: Bacteria Gram-negativa estudiada de *Stenotrophomonas* spp. (CPB-7), patógena oportunista en seres humanos. B: Efecto del extracto natural sobre el crecimiento de la cepa bacteriana (CPB-7), mostrando un valor de 25.90 mg/mL para la concentración mínima inhibitoria (CMI) y la concentración mínima bactericida (CMB). C: Efecto del extracto modificado sobre el crecimiento de la cepa bacteriana (CPB-7), mostrando un valor de 12.49 mg/mL para la concentración mínima inhibitoria (CMI) y la concentración mínima bactericida (CMB).

a los basidiocarpos durante el proceso de diferenciación (flujo bidireccional). Una vez dentro de las hifas, el movimiento circulatorio de solutos permite un efecto directo del AAS sobre el metabolismo fúngico, una parte o la mayor parte del cual puede ser biotransformado para

dar lugar a nuevos fármacos derivados de la misma molécula que pueden recuperarse posteriormente a través de los extractos modificados.

El estudio de los extractos naturales y los extractos modificados descritos en modelo animal (*in vivo*; ratones, cepa C57BL/6; n=8), con una dieta alta en colesterol (0.5 %) durante 43 días, indicó que los ratones que tuvieron el menor incremento de peso correspondieron al grupo alimentado con dosis alta del extracto modificado estandarizado obtenido a partir de basidiocarpos de *G. lucidum* cultivados sobre aserrín de encino con AAS. Esto en comparación con el grupo de ratones control, el grupo con dieta alta en colesterol (0.5 %), el grupo con dieta alta en colesterol + medicamento sinvastatina (0.03 g/100 g), y el grupo con dieta alta en colesterol + el extracto natural de *G. lucidum*. Asimismo, al estudiar la expresión diferencial de diversos genes por rtPCR (*reverse transcription polymerase chain reaction*) en hígado, se registró que los ratones que tuvieron una mayor expresión relativa de los genes correspondieron a los grupos alimentados con dosis baja y alta del extracto modificado estandarizado obtenido a partir de basidiocarpos de *G. lucidum* cultivados sobre aserrín de encino con AAS. Esto de manera comparativa con los grupos de ratones alimentados con dosis baja y alta del extracto natural estandarizado de *G. lucidum* (Meneses *et al.*, 2014, 2015a-b).

Estudios pioneros relacionados con el metabolismo del colesterol establecieron que compuestos presentes en algunos hongos tienen la posibilidad de regular el metabolismo de la biosíntesis de colesterol a través de la represión en la expresión de la HMGCoA reductasa, enzima paso limitante en la formación de esta molécula en el organismo. Como se ha establecido en las recientes encuestas de salud de la población mexicana, la prevalencia de enfermedades crónico-degenerativas, particularmente diabetes tipo 2 y enfermedades cardiovasculares, han incrementado de manera muy significativa. En estas encuestas se ha demostrado que la hipercolesterolemia es un factor muy prevalente en la población mexicana y se ha establecido una prevalencia aproximadamente del 16 %. Con este propósito, se han llevado a cabo estudios experimentales para evaluar la posibilidad de que los extractos de *G. lucidum* tuvieran propiedades hipocolesterolemiantes, lo cual le podría dar un valor agregado a este hongo medicinal. Estudios en animales de experimentación mostraron que a través del consumo de extractos de *G. lucidum* se disminuyó significativamente el colesterol total sérico en animales que consumían dietas con un exceso de colesterol en comparación con aquellos que no incluían en su dieta al extracto, se observó además una tendencia a disminuir el colesterol LDL. Para entender mecanísticamente como este extracto pudiera disminuir las concentraciones de colesterol, se evaluó la expresión de genes asociados con la captura del colesterol, en particular el receptor de las LDL, así como también de los genes involucrados en el transporte reverso del colesterol, como son la de los transportadores ABCG5 y ABCG8. Interesantemente los hallazgos del estudio mostraron que el extracto de *G. lucidum* fue capaz de incrementar la expresión del receptor LDL en el hígado de estos animales, sugiriendo que hay un aumento en la capacidad de depuración de partículas LDL

lo que contribuye a una disminución en la concentración total de colesterol. Por otro lado, se observó que el extracto disminuyó la expresión de los transportadores ABCG5 y ABCG8 en una magnitud semejante. Esto concuerda con el hecho de que la región regulatoria de ambos genes es común, lo que contribuye posiblemente a que las células no muestren tendencia a incrementar los niveles de colesterol sérico por medio del transporte reverso del colesterol, previniendo a la recirculación del colesterol. De manera que este proceso estimule a que el exceso de colesterol sea eliminado a través de la bilis como colesterol o como ácidos biliares. De hecho, los estudios indicaron que existe una mayor excreción fecal tanto de colesterol como de ácidos biliares en los grupos que fueron suplementados con los extractos de *G. lucidum*.

Por otro lado, los efectos de los extractos de *G. lucidum* sobre el metabolismo de colesterol pudieran estar mediados por las hidrolasas de sales biliares de origen microbiano, lo que posiblemente tiene un efecto en la desconjugación de los ácidos biliares, lo que los hace menos solubles disminuyendo su capacidad micelar y de esta manera evitando la reabsorción de las sales biliares, lo que aumenta su excreción fecal y como consecuencia disminuye la concentración de colesterol circulante. Aún no se han llevado a cabo estudios con el extracto de *G. lucidum* para evaluar esta posibilidad, sin embargo, se ha demostrado que los beta glucanos presentes en este hongo tienen una actividad prebiótica significativa. De hecho, se ha demostrado en estudios iniciales que el extracto de *G. lucidum* es capaz de modificar la disbiosis presente en la microbiota de los animales alimentados con una dieta alta en colesterol, incrementando de manera benéfica a la fila de *Bacteroidetes* y disminuyendo la fila de los *Firmicutes*. Independientemente del efecto hipocolesterolémico observado con el extracto de *G. lucidum*, la propiedad de incrementar a los *Bacteroidetes* y disminuir a los *Firmicutes* puede resultar benéfica para atenuar anormalidades presentes durante la obesidad, particularmente la resistencia a la insulina y la inflamación, que se han asociado a un incremento de los *Firmicutes* y a una disminución de los *Bacteroidetes* (Tilg y Kaser, 2011). Futuros estudios experimentales y clínicos podrán demostrar el beneficio del consumo de *G. lucidum* en estas patologías.

Ha sido interesante el observar que los efectos benéficos del extracto de *G. lucidum* sobre el metabolismo del colesterol y la microbiota presentan una mayor respuesta cuando los extractos de *G. lucidum* son obtenidos de basidiocarpos cultivados sobre aserrín de encino con AAS, comparado con el extracto natural sin modificar. Esto sugiere que bajo las primeras condiciones la biosíntesis endógena de algunos compuestos bioactivos presentes en el hongo de *G. lucidum* se incrementan, lo que le provee mayores propiedades benéficas para la salud.

El análisis de esta evidencia molecular ha demostrado que los extractos modificados estandarizados de *G. lucidum* inducen la expresión diferencial significativamente mayor de genes específicos, así como el crecimiento selectivo de poblaciones bacterianas benéficas, en comparación con los extractos naturales de la misma especie, lo cual es debido al efecto del AAS sobre el metabolismo fúngico. ¿A qué nivel(es) metabólico ocurre este efecto?, ¿qué redes génicas están

asociadas? y ¿cuál vía(s) de biotransformación fúngica se presenta en la molécula de AAS? son algunas de las preguntas pendientes.

Las primeras pruebas clínicas en México

A partir de la evidencia científica generada sobre la composición química, las propiedades antioxidantes y antimicrobianas, así como las investigaciones en modelo celular (*in vitro*) y modelo animal (*in vivo*), fue posible establecer un estudio clínico exploratorio de 40 días utilizando un extracto natural estandarizado de *Ganoderma lucidum*. Se trata de la primera prueba clínica realizada en México con hongos comestibles, funcionales y medicinales, la cual se llevó a cabo bajo un enfoque nutricional y sin intervención dietética. A continuación se presenta sólo el caso de una voluntaria que participó por consentimiento informado, mujer de 63 años diagnosticada con diabetes mellitus tipo 2. Esta participante tuvo una ingesta diaria promedio de 1 350 kcal y sus medidas antropométricas no tuvieron variación significativa durante el periodo de estudio (peso, índice de masa corporal, cintura, cadera).

El análisis de parámetros en sangre indicó que la voluntaria tuvo una concentración inicial, previa al tratamiento, de 236 mg/dL de glucosa en sangre (136 % arriba del valor máximo de referencia considerado normal). Una vez administrado el extracto natural estandarizado de *G. lucidum* a una dosis diaria específica, el contenido de glucosa en sangre descendió de manera significativa, manteniéndose en un rango de 68-123.3 mg/dL en los días 8, 19, 24, 53 y 73, con excepción de un solo pico de 213 mg/dL en el día 40 del estudio. Esto estuvo correlacionado con dos parámetros importantes en sangre, la disminución de hemoglobina glucosilada de 11.2 % a 8.6 % y el decremento de insulina de 34.3 μ U/mL a 25.5 μ U/mL (Figura 12).

El análisis de lípidos en sangre registró un decremento importante en el contenido de triglicéridos, colesterol total, lipoproteína de baja densidad (LDL), y lipoproteína de muy baja densidad (VLDL), comparativamente con la concentración inicial correspondiente, previa al tratamiento. Al día 40 de administrado el extracto natural estandarizado de *G. lucidum* a una dosis diaria específica, el contenido de triglicéridos decreció de 370 mg/dL a 278 mg/dL (decremento: 24.8 %); el colesterol total de 242.2 mg/dL a 207.7 mg/dL (decremento: 14.2 %); la LDL de 168 mg/dL a 106.3 mg/dL (decremento: 36.7 %); y la VLDL de 74 mg/dL a 55.6 mg/dL (decremento: 24.8 %). Un resultado importante fue el hecho de que la lipoproteína de alta densidad (HDL) en sangre, considerada como el colesterol “bueno”, aumentó de 44.2 mg/dL a 45.8 mg/dL (incremento: 3.6 %). La tendencia positiva en el contenido de lípidos en sangre estuvo correlacionada con un decremento de 8.6 % en apolipoproteína A1 [162 mg/dL a 148 mg/dL] y de 8.4 % en apolipoproteína B [118 mg/dL a 108 mg/dL]. Los índices LDL/HDL (6.61 a 5.2) y aterogénico (cociente de la relación colesterol total/colesterol unido a lipoproteínas de alta densidad: 5.48 % a 4.53 %) también disminuyeron (Figura 13).

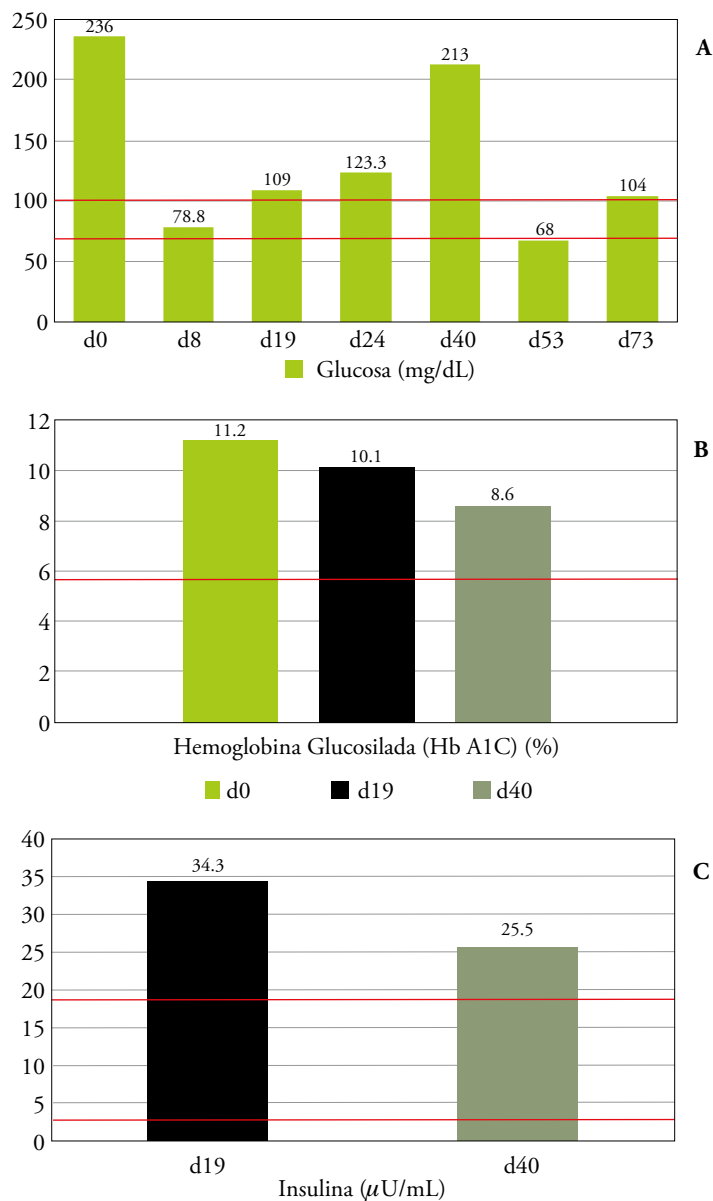


Figura 12. Estudio clínico exploratorio, con enfoque nutricional y sin intervención dietética, sobre el efecto de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en la salud de la población mexicana. Efecto del extracto hidroalcohólico estandarizado de recursos genéticos nativos de *Ganoderma lucidum* sobre el metabolismo de carbohidratos, realizando el análisis de parámetros en sangre el día 0 (d0: antes de la administración del extracto), así como a los días 19 (d19) y 40 (d40) de administración de la dosis específica, con excepción de cuatro exámenes adicionales de glucosa en sangre (d8, d24, d53, d73). Se presenta el caso de voluntaria informada de 63 años, con diabetes diagnosticada e ingesta de 1,350 kcal durante 40 días. A: Examen de glucosa por el método de glucosa oxidasa. B: Examen de hemoglobina glucosilada (Hb A1C) por el método de cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC). C: Examen de insulina por el método de quimioluminiscencia. La línea(s) horizontal roja indica el valor o rango de referencia normal de cada parámetro.

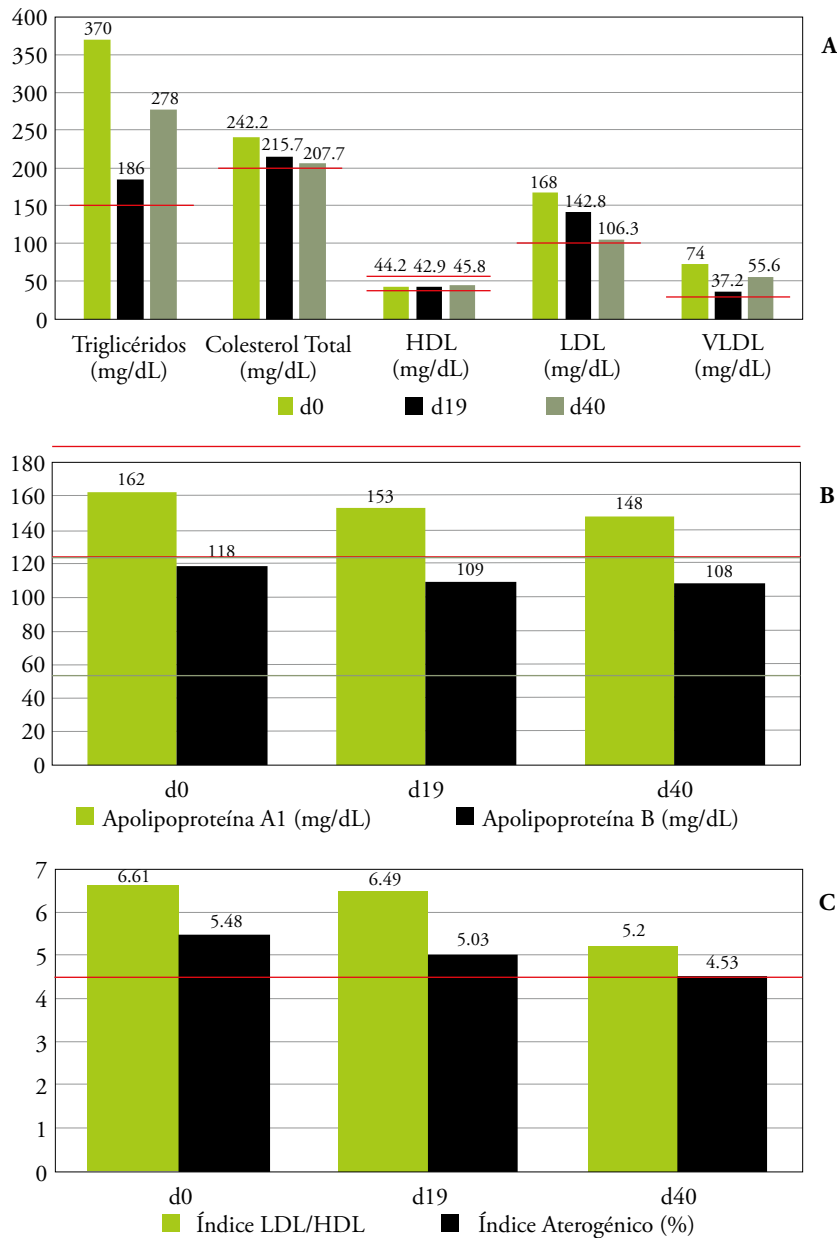


Figura 13. Estudio clínico exploratorio, con enfoque nutricional y sin intervención dietética, sobre el efecto de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en la salud de la población mexicana. Efecto del extracto hidroalcohólico estandarizado de recursos genéticos nativos de *Ganoderma lucidum* sobre el metabolismo de lípidos, realizando el análisis de parámetros en sangre el día 0 (d0: antes de la administración del extracto), así como a los días 19 (d19) y 40 (d40) de administración de la dosis específica. Se presenta el caso de voluntaria informada de 63 años, con diabetes diagnosticada e ingesta de 1,350 kcal durante 40 días. A: Exámenes de triglicéridos, colesterol total, lipoproteína de alta densidad (HDL), lipoproteína de baja densidad (LDL), y lipoproteína de muy baja densidad (VLDL) por el método enzimático-colorimétrico. B: Exámenes de apolipoproteína A1 y B por el método de nefelometría. C: Índice LDL/HDL e índice aterogénico [cociente de la relación colesterol total (CT)/colesterol unido a lipoproteínas de alta densidad (cHDL)]. La línea(s) horizontal roja indica el valor o rango de referencia normal de cada parámetro, también aquella verde para el caso de la apolipoproteína B.

El análisis de los parámetros en sangre asociados al funcionamiento del hígado mostró que las enzimas aspartato amino transferasa, alanino amino transferasa, y fosfatasa alcalina se mantuvieron en niveles completamente normales y sin variaciones significativas. Incluso, el caso de la enzima glutamil transpeptidasa gama, cuya concentración inicial previa al tratamiento fue de 94 U/L (46.8 % arriba del valor máximo de referencia considerado normal), terminó dentro del rango normal con 32 U/L al día 40 de administración del extracto natural estandarizado de *G. lucidum* a una dosis diaria específica. Esto estuvo correlacionado con otros dos parámetros importantes que se mantuvieron dentro de los rangos de referencia considerados normales, a saber: 1) La proteína C reactiva que está asociada a los niveles de inflamación en todo el cuerpo disminuyó 27.5 % de 2.4 mg/L a 1.74 mg/L; y 2) La urea, que es un producto de desecho del metabolismo del amoníaco en hígado, decreció 40.4 % de 43 mg/dL a 25.6 mg/dL, ambos en el mismo periodo (Figura 14).

El análisis de los parámetros en sangre asociados al funcionamiento del riñón indicó que el contenido de nitrógeno ureico, creatinina y ácido úrico se mantuvieron en niveles completamente normales, aunque con clara tendencia a la baja (Figura 15). Al día 40 de administrado el extracto natural estandarizado de *G. lucidum* a una dosis diaria específica, el contenido de nitrógeno ureico decreció de 20.1 mg/dL a 12.0 mg/dL (decremento: 40.2 %); la creatinina de 1.0 mg/dL a 0.82 mg/dL (decremento: 18 %); y el ácido úrico de 6.1 mg/dL a 4.9 mg/dL (decremento: 19.6 %).

Las inmunoglobulinas (Ig) son importantes anticuerpos del sistema inmunitario. Las concentraciones de IgG e IgM en sangre fueron completamente normales durante todo el estudio. Sin embargo, el caso de la IgA e IgE, aunque sus concentraciones iniciales previas al tratamiento estuvieron fuera de los límites considerados normales, se observó una clara tendencia a la baja en el día 40 de administración del extracto natural estandarizado de *G. lucidum* a una dosis diaria específica (Figura 16). La inmunoglobulina IgA varió de 694 mg/dL a 547 mg/dL (decremento: 21.1 %), mientras que la inmunoglobulina IgE disminuyó de 999 UI/mL a 579 UI/mL (decremento: 42 %) al final del estudio. El parámetro de leptina en sangre, hormona secretada por los adipocitos y asociada a la regulación del apetito, tuvo una tendencia equivalente, pasando de 19.4 ng/mL a 12 ng/mL (decremento: 38.1 %).

Estos novedosos resultados sobre el efecto de un extracto hidroalcohólico obtenido a partir de los recursos genéticos nativos de *Ganoderma lucidum* demuestran el impacto potencial de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en la salud humana. En virtud de que estos extractos contienen una combinación natural de compuestos bioactivos, su efecto múltiple en el organismo es a nivel sistémico cuando se administran bajo un enfoque nutricional, ya que intervienen simultáneamente en el metabolismo de carbohidratos, lípidos y proteínas, así como en la microbiota intestinal, el sistema inmunitario, e incluso hormonal. Es importante resaltar que estos efectos se logran a dosis notablemente bajas, por lo que no se han registrado efectos

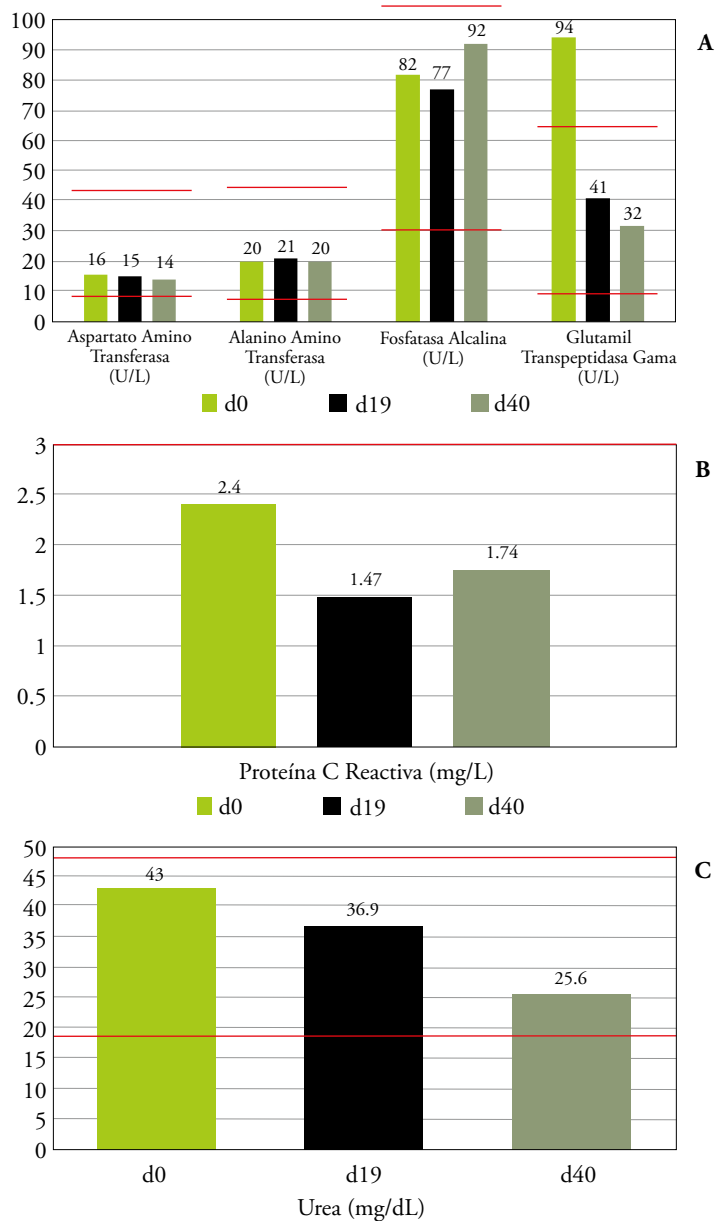


Figura 14. Estudio clínico exploratorio, con enfoque nutricional y sin intervención dietética, sobre el efecto de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en la salud de la población mexicana. Efecto del extracto hidroalcohólico estandarizado de recursos genéticos nativos de *Ganoderma lucidum* sobre el funcionamiento del hígado, realizando el análisis de parámetros en sangre el día 0 (d0: antes de la administración del extracto), así como a los días 19 (d19) y 40 (d40) de administración de la dosis específica. Se presenta el caso de voluntaria informada de 63 años, con diabetes diagnosticada e ingesta de 1,350 kcal durante 40 días. A: Examen de aspartato amino transferasa, alanino amino transferasa, fosfatasa alcalina, y glutamil transpeptidasa gama por el método cinético-colorimétrico. B: Examen de proteína C reactiva de alta sensibilidad por el método de turbidimetría. C: Examen de urea por el método cinético. La línea(s) horizontal roja indica el valor o rango de referencia normal de cada parámetro.

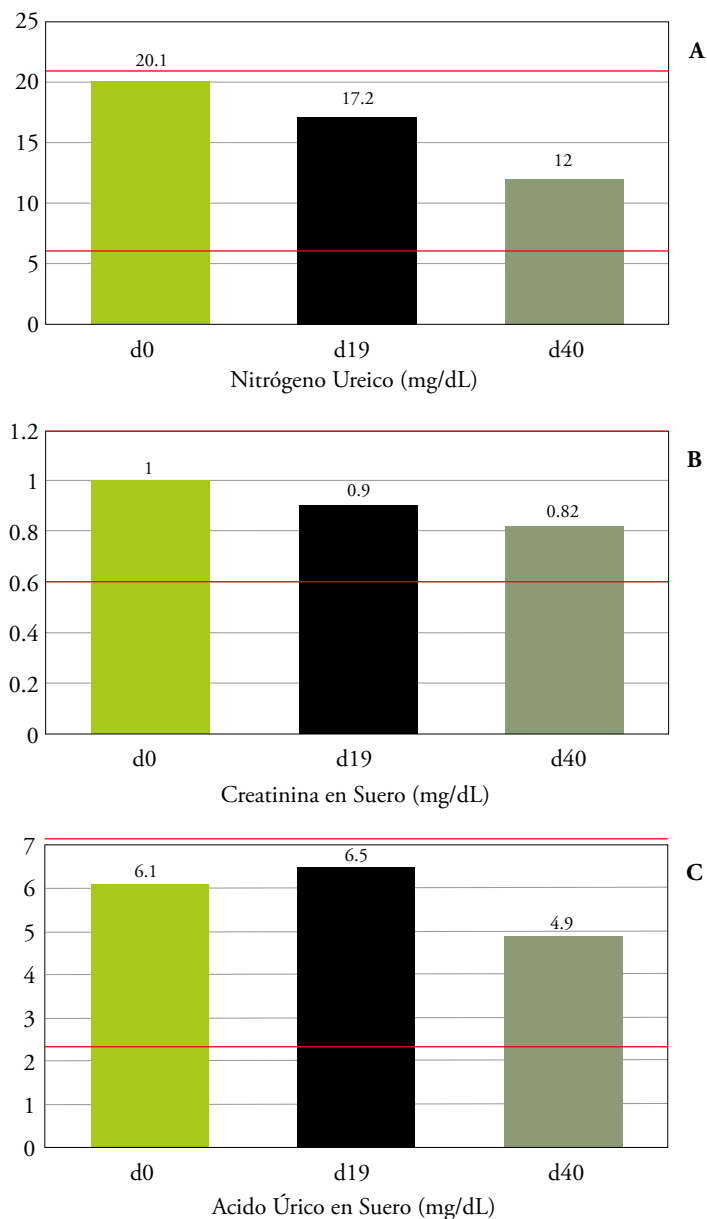


Figura 15. Estudio clínico exploratorio, con enfoque nutricional y sin intervención dietética, sobre el efecto de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en la salud de la población mexicana. Efecto del extracto hidroalcohólico estandarizado de recursos genéticos nativos de *Ganoderma lucidum* sobre el funcionamiento del riñón, realizando el análisis de parámetros en sangre el día 0 (d0: antes de la administración del extracto), así como a los días 19 (d19) y 40 (d40) de administración de la dosis específica. Se presenta el caso de voluntaria informada de 63 años, con diabetes diagnosticada e ingesta de 1,350 kcal durante 40 días. A: Examen de nitrógeno ureico por el método cinético. B: Examen de creatinina en suero por el método cinético-colorimétrico. C: Examen de ácido úrico en suero por el método enzimático-colorimétrico. La línea(s) horizontal roja indica el valor o rango de referencia normal de cada parámetro.

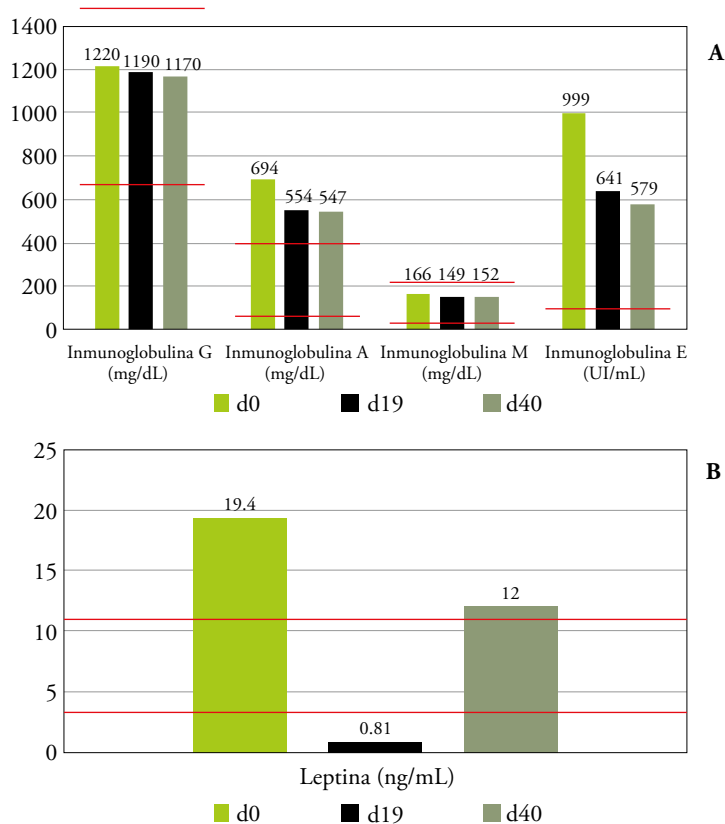


Figura 16. Estudio clínico exploratorio, con enfoque nutricional y sin intervención dietética, sobre el efecto de los hongos comestibles, funcionales y medicinales en la salud de la población mexicana. Efecto del extracto hidroalcohólico estandarizado de recursos genéticos nativos de *Ganoderma lucidum* sobre el funcionamiento del sistema inmunitario y hormonal, realizando el análisis de parámetros en sangre el día 0 (d0: antes de la administración del extracto), así como a los días 19 (d19) y 40 (d40) de administración de la dosis específica. Se presenta el caso de voluntaria informada de 63 años, con diabetes diagnosticada e ingesta de 1,350 kcal durante 40 días. A: Examen de inmunoglobulinas G (IgG), A (IgA) y M (IgM) por el método de nefelometría, así como aquel de inmunoglobulina E (IgE) por el método de quimioluminiscencia. B: Examen de leptina por el método de inmunoanálisis enzimático. El resultado correspondiente a d19 fue atípico. La línea(s) horizontal roja indica el valor o rango de referencia normal de cada parámetro.

adversos en las pruebas clínicas exploratorias o en la bibliografía. Por ello se considera importante profundizar la investigación científica en este campo emergente.

IX. Perspectivas

El entorno económico global y la operación del sistema agroalimentario mundial han generado cambios indeseables en los patrones alimentarios y la salud de la población de muchos países.

En México, país que ha sido cómplice y víctima en este contexto por las políticas públicas centradas en el mercado que estableció a partir de los 1980's, se estima que la obesidad y enfermedades asociadas (diabetes, síndrome metabólico, hipertensión, derrames cerebrales, enfermedades cardiovasculares, cáncer) tendrán un costo superior a los 202 mil millones de pesos en 2017 para el sistema nacional de salud (www.salud.gob.mx). El presente trabajo demuestra la importante aportación de los hongos comestibles, funcionales y medicinales a la construcción de un paradigma en el cual países como México establezcan políticas públicas transversales que, complementariamente al enfoque del mercado, promuevan la producción y el consumo de alimentos que tengan no sólo un impacto en la dieta y la salud humana, sino que también formen parte de la cultura de la población. Su contribución a la producción radica en el hecho de que constituye una cadena agroalimentaria microbiana emergente de nivel intermedio que aporta alimentos de origen microbiano relevantes para la seguridad alimentaria, aunque prácticamente no existen el seguimiento, ni los apoyos, para esta actividad productiva en la política nacional del sector primario. También aportan a la dieta porque los hongos comestibles son un excelente alimento que brinda componentes nutricionales, funcionales y organolépticos para una dieta completa, suficiente, y equilibrada que garantiza la satisfacción integral (biológica, psicológica, social) de los mexicanos. Su mayor contribución es a la salud, ya que los hongos comestibles constituyen una fuente importante de compuestos bioactivos, micronutrientes, polisacáridos de alto peso molecular (*i.e.*, gliconutrientes), vitaminas y minerales. Finalmente, contribuyen a la cultura nacional dada la enorme tradición que existe por el consumo de hongos comestibles, principalmente en la región central del país, la cual permite su utilización como un alimento integral de la dieta y gastronomía mexicanas.

La cadena agroalimentaria microbiana emergente de los hongos comestibles permite la producción de alimentos para el consumo humano directo, así como la obtención de nuevos productos de alto valor agregado con propiedades funcionales y medicinales a partir de extractos estandarizados de los basidiocarpos, utilizando procesos biotecnológicos axénicos y controlados. Estas propiedades constituyen una de las áreas más dinámicas de innovación, así como de investigación científica y tecnológica en este campo de conocimiento, lo cual tendrá repercusiones en la seguridad alimentaria global durante el presente siglo. Las evidencias químicas, bioquímicas, biológicas, en modelo celular (*in vitro*), en modelo animal (*in vivo*), y en pruebas clínicas exploratorias presentadas demuestran que los hongos comestibles, funcionales y medicinales, incluyendo sus extractos, inducen la expresión, activación o modulación de genes y rutas metabólicas específicas como mecanismos de acción para sus efectos en la salud. Asimismo, el manejo apropiado de las condiciones de cultivo y producción de los hongos comestibles permite modificar e intensificar las propiedades funcionales y medicinales de los basidiocarpos y sus extractos utilizando el ácido acetilsalicílico, lo que ha establecido la posibilidad para desarrollar nuevos

fármacos por biotransformación fúngica, aprovechando las capacidades biológicas naturales de los hongos comestibles.

Otros alimentos de la dieta y gastronomía mexicanas también pueden aportar propiedades superiores, equivalentes, o complementarias a las aquí descritas para los hongos comestibles, funcionales y medicinales. La construcción del paradigma propuesto dependerá de que los alimentos considerados pertinentes del sistema agroalimentario mexicano sean analizados desde esta perspectiva. Este enfoque transversal permitirá diseñar políticas públicas para fortalecer los sistemas agroalimentarios relevantes para la seguridad alimentaria y la salud de la población.

La información científica generada y la disponibilidad, la estabilidad y el acceso de los alimentos analizados permitirán fortalecer la norma oficial mexicana sobre la promoción y educación para la salud en materia alimentaria (Salud, 2005; NOM-043-SSA2-2005). Esta norma brinda orientación alimentaria con sustento científico sobre la integración de una alimentación correcta que pueda adecuarse a las necesidades y posibilidades de la población. Es fundamental que esta norma integre el concepto de los alimentos de origen microbiano como nuevo grupo esencial para ser consumido periódicamente como parte de una dieta sana, completa, equilibrada, inocua, suficiente, variada y adecuada. Esto de manera adicional a los grupos ya establecidos de verduras y frutas (grupo 1), cereales y tubérculos (grupo 2), y leguminosas y alimentos de origen animal (grupo 3). La incorporación de este nuevo grupo de alimentos, dentro del cual los hongos comestibles, funcionales y medicinales cultivados son los productos más importantes disponibles para el consumo humano directo, permitirá reubicar y redefinir el concepto genérico de “hongos”, el cual aparece en el Grupo 1 (Verduras y Frutas) como “ejemplo de verduras” en “El Plato del Bien Comer”. Estrictamente, los hongos no son verduras ni deben ubicarse en este grupo, sino más bien dentro del nuevo grupo propuesto de alimentos de origen microbiano, ya que aportan una combinación natural de micronutrientes y compuestos bioactivos que no están presentes en los productos vegetales o animales y que se requieren en pequeñas cantidades para contribuir al funcionamiento celular y promover la salud. Desde esta perspectiva, los hongos comestibles, funcionales y medicinales no requieren consumirse en grandes cantidades, una porción de 350-450 g frescos, por día, tres veces por semana o de manera periódica, es suficiente para lograr efectos benéficos. Todos los grupos de alimentos en su conjunto conformarían la nueva versión de “El Plato del Bien Comer”, incluyendo alimentos de origen vegetal, microbiano y animal, sobre la orientación alimentaria para la población mexicana.

El desarrollo del paradigma propuesto sobre la producción, la dieta, la salud y la cultura para los alimentos mexicanos representa una oportunidad para plantear y establecer políticas públicas con estricto sustento de la ciencia y la tecnología, las cuales tengan un impacto potencial en la prevención de enfermedades, particularmente en aquellos problemas relacionados con obesidad, síndrome metabólico, enfermedades cardiovasculares, y el cáncer; enfermedades originadas por las políticas disfuncionales que tres décadas después de su implementación configuraron

los principales problemas de salud pública en el país. Estas nuevas políticas son insoslayables e indispensables para la seguridad alimentaria y el futuro de la sociedad mexicana.

Literatura citada

- Aleem, E. 2013. β -glucans and their applications in cancer therapy: focus on human studies. *Anti-cancer Agents in Medicinal Chemistry* 13:709-719.
- Alexopoulos, C. J. & C. W. Mims. 1979. *Introductory Mycology*. John Wiley & Sons, Nueva York. 632 pp.
- Beelman, R. B., D. J. Royse & N. Chikthimmah. 2004. Bioactive components in *Agaricus bisporus* of nutritional, medicinal and biological importance. Pp. 1-16. *En: Science and Cultivation of Edible and Medicinal Fungi*. Eds. C. P. Romaine, C. B. Keil, D. L. Rinker & D. J. Royse. Pennsylvania State University Press, University Park.
- Boa, E. 2004. *Wild Edible Fungi, A Global Overview of Their Use and Importance to People*. Non-wood Forest Products Series no. 17. FAO, Roma.
- Borchers, A. T., A. Krishnamurthy, C. L. Keen, F. J. Meyers & M. E. Gershwin. 2008. The immunobiology of mushrooms. *Experimental Biology and Medicine* 233:259-276.
- Borchers, A. T., C. L. Keen & M. E. Gershwin. 2004. Mushrooms, tumors, and immunity: an update. *Experimental Biology and Medicine* 229:393-406.
- Bourbonnais, R. & M. G. Paice. 1990. Oxidation of non-phenolic substrates, an expanded role for laccase in lignin biodegradation. *FEBS Letters* 267:99-102.
- Bourges, R. H. 2011. Un año memorable para la nutriología mexicana. *Cuadernos de Nutrición* 34(1):2-3.
- Bradford, M. M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72:248-254.
- Carlile, M. J. & S. C. Watkinson. 1994. *The Fungi*. Academic Press, Londres. 482 pp.
- Castañeda de León, V., D. Martínez-Carrera, P. Morales Almora, M. Sobal Cruz, A. Gil Muñoz & H. Leal Lara. 2015. El cuiltacoche, producto de la interacción *Ustilago maydis* - maíz, una aportación de México al mundo en el sistema agroalimentario microbiano. *En: Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México*. Eds. D. Martínez-Carrera & J. Ramírez Juárez. Biblioteca Básica de Agricultura, IICA, Academia Mexicana de Ciencias, México, D.F.
- Chang, S. T. & P. G. Miles. 2004. *Mushrooms: Cultivation, Nutritional Value, Medicinal Effect, Environmental Impact*. CRC Press, Boca Raton. 451 pp.
- Chang, S. T. & S. P. Wasser. 2012. The role of culinary-medicinal mushrooms on human welfare with a pyramid model for human health. *International Journal of Medicinal Mushrooms* 14:95-134.
- Chen, J. & R. Seviour. 2007. Medicinal importance of fungal β -(1 $\rightarrow$ 3), (1 $\rightarrow$ 6)-glucans. *Mycological Research* 111:635-652.
- Cheng, C.-H., A. Y. Leung & C.-F. Chen. 2010. The effects of two different *Ganoderma* species (*Lingzhi*) on gene expression in human monocytic THP-1 cells. *Nutrition and Cancer* 62:648-658.
- Cheng, K.-F. & P.-C. Leung. 2008. General review of polysaccharopeptides (PSP) from *C. versicolor*: pharmacological and clinical studies. *Cancer Therapy* 6:117-130.
- CLSI. 2006. *Methods for Dilution Antimicrobial Susceptibility Tests for Bacteria That Grow Aerobically; Approved Standard—Seventh Edition*. Clinical and Laboratory Standards Institute document M7-A7, volume 26, no. 2. Clinical and Laboratory Standards Institute, Wayne, PA, E.U.A. 49 pp.
- Duke, J. A. & A. A. Arthley. 1986. *CRC Handbook of Proximate Analysis Tables of Higher Plants*. CRC Press, Boca Raton. 389 pp.
- El-Mekawy, S., M. R. Meselhy, N. Nakamura, Y. Tezuka, M. Hattori, N. Kakiuchi, K. Shimotohno, T. Kawahata & T. Otake. 1998. Anti-HIV-1 and anti-HIV-1-protease substances from *Ganoderma lucidum*. *Phytochemistry* 49:1651-1657.

- Esser, K. & P. A. Lemke. 1994. The Mycota. Springer-Verlag, Berlin. 433 pp.
- Feeney, M. J., J. Dwyer, C. M. Hasler-Lewis, J. A. Milner, M. Noakes, S. Rowe, M. Wach, R. B. Beelman, J. Caldwell, M. T. Cantorna, L. A. Castlebury, S.-T. Chang, L. J. Cheskin, R. Clemens, G. Drescher, V. L. Fulgoni III, D. B. Haytowitz, V. S. Hubbard, D. Law, A. Myrdal Miller, B. Minor, S. S. Percival, G. Riscuta, B. Schneeman, S. Thornsby, C. D. Toner, C. E. Woteki & D. Wu. 2014. Mushrooms and health summit proceedings. The Journal of Nutrition 144: 1128S-1136S.
- Firenzuoli, F., L. Gori & G. Lombardo. 2008. The medicinal mushroom *Agaricus blazei* Murrill: review of literature and pharmaco-toxicological problems. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine 5:3-15.
- García-García, E., M. De la Llata-Romero, M. Kaufer-Horwitz, M. T. Tusié-Luna, R. Calzada-León, V. Vázquez Velázquez, S. Barquera-Cervera, A. de Jesús Caballero-Romo, L. Orozco, D. Velásquez-Fernández, M. Rosas-Peralta, A. Barriguete-Meléndez, R. Zacarías-Castillo & J. Sotelo-Morales. 2008. La obesidad y el síndrome metabólico como problema de salud pública, una reflexión. Salud Pública de México 50(6):530-547.
- Garibay-Orijel, R., F. Ruan-Soto & E. Estrada-Martínez. 2010. El conocimiento micológico tradicional, motor para el desarrollo del aprovechamiento de los hongos comestibles y medicinales. En: *Hacia un Desarrollo Sostenible del Sistema de Producción-Consumo de los Hongos Comestibles y Medicinales en Latinoamérica: Avances y Perspectivas en el Siglo XXI*. Eds. D. Martínez-Carrera, N. Curvetto, M. Sobal, P. Morales & V. M. Mora. Red Latinoamericana de Hongos Comestibles y Medicinales-COLPOS-UNS-CONACYT-AMC-UAEM-UPAEP-IMINAP, Puebla.
- González de Molina, M. & V. M. Toledo. 2014. The Social Metabolism: A Socio-Ecological Theory of Historical Change. Springer International Publishing Switzerland. 355 pp.
- Gottlieb, A. M., E. Ferrer & J. E. Wright. 2000. rDNA analyses as an aid to the taxonomy of species of *Ganoderma*. Mycological Research 104:1033-1045.
- Guillamón, E., A. García-Lafuente, M. Lozano, M. D'Arrigo, M. A. Rostagno, A. Villares & J. A. Martínez. 2010. Edible mushrooms: role in the prevention of cardiovascular diseases. Fitoterapia 81:715-723.
- Gutiérrez, J. P., J. Rivera-Dommarco, T. Shamah-Levy, S. Villalpando-Hernández, A. Franco, L. Cuevas-Nasu, M. Romero-Martínez & M. Hernández-Ávila. 2012. Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2012. Resultados Nacionales. Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca, México. 196 pp.
- Hernández, M., A. Chávez & H. Bourges. 1983. Valor Nutritivo de los Alimentos Mexicanos. Instituto Nacional de la Nutrición, México, D. F. 34 pp.
- Hernández-Ávila, M., J. P. Gutiérrez & N. Reynoso-Noverón. 2013. Diabetes mellitus en México, el estado de la epidemia. Salud Pública en México 55(S2):S129-S136.
- Holland, B., A. A. Welch, I. D. Unwin, D. H. Buss, A. A. Paul & D. A. T. Southgate. 1991. *McCance and Widdowson's The Composition of Foods*. The Royal Society of Chemistry and MAFI, Cambridge. 462 pp.
- Huang, D., B. Ou, M. Hampsch-Woodill, J. A. Flanagan & R. L. Prior. 2002. High-throughput assay of oxygen radical absorbance capacity (ORAC) using a multichannel liquid handling system coupled with a microplate fluorescence reader in 96-well format. Journal of Agricultural and Food Chemistry 50:4437-4444.
- Huerta, G., D. Martínez-Carrera, J. E. Sánchez, H. Leal-Lara & R. Vilgalys. 2010. Genetic relationships between Mexican species of *Pleurotus* analyzing the ITS-region from rDNA. Micología Aplicada Internacional 22:15-25.
- Ina, K., T. Kataoka & T. Ando. 2013. The use of lentinan for treating gastric cancer. Anti-cancer Agents in Medicinal Chemistry 13:681-688.
- Jiménez-Sánchez, G., M. A. Pozas, E. L. González, S. March, J. M. Zamalvide, J. Frenk & G. Soberón. 2012. Genómica y Bioeconomía: Ventana de Oportunidad para el Crecimiento Económico de México. El Colegio de México-El Colegio Nacional, México, D.F. 112 pp.
- Kilaru, S., C. M. Collins, A. J. Hartley, A. M. Bailey & G. D. Foster. 2009. Establishing molecular tools for genetic manipulation of the pleuromutilin-producing fungus *Clitopilus passeckerianus*. Applied and Environmental Microbiology 75:7196-7204.

- Kurtzman, R. H., Jr. 1997. Nutrition from mushrooms, understanding and reconciling available data. *Mycoscience* 38:247-253.
- Kurtzman, R. H. & D. Martínez-Carrera. 2013. Light, what it is and what it does for Mycology. *Micologia Aplicada International* 25(2):23-33.
- Lelley, J. I. & J. Vetter. 2004. Orthomolecular medicine and mushroom consumption, an attractive aspect for promoting production. Pp. 637-643. *En: Science and Cultivation of Edible and Medicinal Fungi*. Eds. C. P. Romaine, C. B. Keil, D. L. Rinker & D. J. Royse. Pennsylvania State University Press, University Park.
- Li, Y. R., Q. H. Liu, H. X. Wang & T. B. Ng. 2008. A novel lectin with potent antitumor, mitogenic and HIV-1 reverse transcriptase inhibitory activities from the edible mushroom *Pleurotus citrinopileatus*. *Biochimica et Biophysica Acta* 1780:51-57.
- Lindequist, U., T. H. J. Niedermeyer & W.-D. Jülich. 2005. The pharmacological potential of mushrooms. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine (Oxford)* 2:285-299.
- Lingström, P., E. Zaura, H. Hassan, M. J. Buijs, P. Hedelin, J. Pratten, D. Spratt, M. Daglia, A. Karbowiak, C. Signoretto, M. Rosema, F. van der Weijden & M. Wilson. 2012. The anticaries effect of a food extract (shiitake) in a short-term clinical study. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, doi: 10.1155/2012/217164.
- Liu, J., F. Yang, L. B. Ye, X. J. Yang, K. A. Timani, Y. Zheng & Y. H. Wang. 2004. Possible mode of action of antiherpetic activities of a proteoglycan isolated from the mycelia of *Ganoderma lucidum* in vitro. *Journal of Ethnopharmacology* 95:265-272.
- Márquez Covarrubias, H. 2009. Diez rostros de la crisis civilizatoria del sistema capitalista mundial. *Revista Latinoamericana de Economía* 159:191-210.
- Martínez-Carrera, D. 2014. Contribución de los hongos comestibles, funcionales y medicinales al enfoque de la producción, la dieta, la salud y la cultura en México. Simposio general Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México (noviembre 26-28), CP-AMC-CONACYT-UPAEP, Puebla, Puebla.
- Martínez-Carrera, D. 2002. Current development of mushroom biotechnology in Latin America. *Micología Aplicada International* 14:61-74.
- Martínez-Carrera, D. 2000. Mushroom biotechnology in tropical America. *International Journal of Mushroom Sciences* 3:9-20.
- Martínez-Carrera, D. 1998. Oyster mushrooms. Pp. 242-245. *En: McGraw-Hill Yearbook of Science & Technology 1999*. McGraw-Hill, Inc., Nueva York.
- Martínez-Carrera, D. 1984. Cultivo de *Pleurotus ostreatus* sobre desechos agrícolas. I. Obtención y caracterización de cepas nativas en diferentes medios de cultivo sólido en el laboratorio. *Biotica* 9:243-248.
- Martínez-Carrera, D. & A. Larqué-Saavedra. 1990. Biotecnología en la producción de hongos comestibles. *Ciencia y Desarrollo (CONACYT)* 95:53-64.
- Martínez-Carrera, D. & L. López-Martínez de Alva. 2010. Historia del cultivo comercial de hongos comestibles en México, II: éxitos y fracasos durante el periodo 1991-2009. Pp. 513-551. *En: Hacia un Desarrollo Sostenible del Sistema de Producción-Consumo de los Hongos Comestibles y Medicinales en Latinoamérica: Avances y Perspectivas en el Siglo XXI*. Eds. D. Martínez-Carrera, N. Curvetto, M. Sobal, P. Morales & V. M. Mora. Red Latinoamericana de Hongos Comestibles y Medicinales-COLPOS-UNS-CONACYT-AMC-UAEM-UPAEP-IMINAP, Puebla.
- Martínez-Carrera, D., A. Aguilar, W. Martínez, P. Morales, M. Sobal, M. Bonilla & A. Larqué-Saavedra. 1998a. A sustainable model for rural production of edible mushrooms in Mexico. *Micología Neotropical Aplicada* 11:77-96.
- Martínez-Carrera, D., A. Larqué-Saavedra, P. Morales, M. Sobal, W. Martínez & A. Aguilar. 1993. Los hongos comestibles en México: biotecnología de su reproducción. *Ciencia y Desarrollo (CONACYT)* 108:41-49.
- Martínez-Carrera, D., B. Pérez Armendáriz, Y. Mayett, M. Sobal, P. Morales, P. Ramírez & I. Tello. 2009. Propiedades funcionales agregadas al tequila, otros mezcales y destilados de *Agave* convencionales, derivadas del extracto de un hongo comestible de uso tradicional en México (*Lentinula boryana*). Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, Título de patente IMPI no. 322035. Registro de patente IMPI-MX/E/2009/047387, julio 27. Gaceta de la Propiedad Industrial (SIGA-IMPI-México), enero 2011, p. 26.

- Martínez-Carrera, D., F. Vergara, S. Juárez, A. Aguilar, M. Sobal & W. Martínez. 1996. Simple technology for canning cultivated edible mushrooms in rural conditions in Mexico. *Micología Neotropical Aplicada* 9:15-27.
- Martínez-Carrera, D., M. Bonilla, M. Sobal, A. Aguilar, W. Martínez & A. Larqué-Saavedra. 1999. A culture collection of edible mushrooms and its significance for germplasm preservation, breeding, and the development of mushroom cultivation in Mexico. *Micología Neotropical Aplicada* 12:23-40.
- Martínez-Carrera, D., M. Sobal, A. Aguilar, M. Navarro, M. Bonilla & A. Larqué-Saavedra. 1998b. Canning technology as an alternative for management and conservation of wild edible mushrooms in Mexico. *Micología Neotropical Aplicada* 11:35-51.
- Martínez-Carrera, D., M. Sobal, P. Morales, W. Martínez, M. Martínez & Y. Mayett. 2004. Los Hongos Comestibles: Propiedades Nutricionales, Medicinales, y su Contribución a la Alimentación Mexicana. CP-BUAP-UPAEP-IMINAP, Puebla. 44 pp.
- Martínez-Carrera, D., N. Curvetto, M. Sobal, P. Morales & V. M. Mora (Eds.). 2010. Hacia un Desarrollo Sostenible del Sistema de Producción-Consumo de los Hongos Comestibles y Medicinales en Latinoamérica: Avances y Perspectivas en el Siglo XXI. Red Latinoamericana de Hongos Comestibles y Medicinales-COLPOS-UNSCONACYT-AMC-UAEM-UPAEP-IMINAP, Puebla. 648 pp.
- Martínez-Carrera, D., P. Morales, M. Sobal, M. Bonilla & W. Martínez. 2007. México ante la globalización en el siglo XXI: el sistema de producción-consumo de los hongos comestibles. Pp. 209-224. *En: El Cultivo de Setas Pleurotus spp. en México*. Eds. J. E. Sánchez, D. Martínez-Carrera, G. Mata & H. Leal. ECOSUR-CONACYT, México, D.F.
- Martínez-Carrera, D., P. Morales, M. Sobal, M. Bonilla, W. Martínez & Y. Mayett. 2012. Los hongos comestibles, funcionales y medicinales: su contribución al desarrollo de las cadenas agroalimentarias y la seguridad alimentaria en México. Pp. 449-474. *En: Memorias Reunión General de la Academia Mexicana de Ciencias: Ciencia y Humanismo (Agrociencias)*. Academia Mexicana de Ciencias, México, D.F.
- Martínez-Carrera, D., P. Morales, M. Sobal, S. T. Chang & A. Larqué-Saavedra. 1991a. Edible mushroom cultivation for rural development in tropical America. Pp. 805-811. *Science and Cultivation of Edible Fungi (Proceedings of the 13th International Congress)*. Ed. M. J. Maher. A. A. Balkema Press, Rotterdam.
- Martínez-Carrera, D., R. Leben, P. Morales, M. Sobal & A. Larqué-Saavedra. 1991b. Historia del cultivo comercial de los hongos comestibles en México. *Ciencia y Desarrollo (CONACYT)* 96:33-43.
- Mattila, P., K. Könkö, M. Eurola, J.-M. Pihlava, J. Astola, L. Vahteristo, V. Hietaniemi, J. Kumpulainen, M. Valtonen & V. Piironen. 2001. Contents of vitamins, mineral elements, and some phenolic compounds in cultivated mushrooms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49:2343-2348.
- Mayell, M. 2001. Maitake extracts and their therapeutic potential, a review. *Alternative Medicine Review* 6:48-60.
- Mayett, Y., D. Martínez-Carrera, M. Sobal, P. Morales & M. Bonilla. 2012. Mushroom prices and their effect on consumption: the case of Mexico. *Micología Aplicada Internacional* 24:11-26.
- Meneses, M. E., D. Martínez-Carrera, A. R. Tovar Palacio, P. Morales Almora, M. Sobal Cruz, T. Bernabé González, H. Escudero Uribe, M. Bonilla Quintero & W. Martínez Sánchez. 2014. Nutrigenómica de la interacción hongos comestibles, funcionales y medicinales - metabolismo de lípidos: su impacto potencial en obesidad, síndrome metabólico y enfermedades cardiovasculares. Simposio general Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México (noviembre 26-28), CP-AMC-CONACYT-UPAEP, Puebla, Puebla.
- Meneses, M. E., D. Martínez-Carrera, P. Morales, M. Sobal, H. Escudero, M. Sánchez, A. R. Tovar & N. Torres. 2015a. Beneficial effects of extract from Mexican genetic resources of *Ganoderma lucidum* on cholesterol metabolism and gut microbiota in C57BL6 mice. 17th International Symposium on Atherosclerosis, International Atherosclerosis Society (mayo 23-26), Amsterdam, Holanda.
- Meneses, M. E., D. Martínez-Carrera, P. Morales, M. Sobal, T. Bernabé, O. Granados-Portillo, N. Torres & A. Tovar. 2015b. A *Ganoderma lucidum* extract derived from Mexican genetic resources and its effect on lipid metabolism gene expression and liver fatty acid composition. *The FASEB Journal* 29(1 supplement):271.4.
- Mizuno, T. 1999. The extraction and development of antitumor-active polysaccharides from medicinal mushrooms in Japan (review). *International Journal of Medicinal Mushrooms* 1:9-29.

- Mizuno, T. 1995. *Shiitake, Lentinus edodes*: functional properties for medicinal and food purposes. *Food Reviews International* 11:111-128.
- Moncalvo, J.-M., H.-F. Wang & R.-S. Hseu. 1995. Gene phylogeny of the *Ganoderma lucidum* complex based on ribosomal DNA sequences. Comparison with traditional taxonomic characters. *Mycological Research* 99:1489-1499.
- Morales, P., M. Sobal, M. Bonilla, W. Martínez, P. Ramírez, I. Tello, T. Spezzia, N. Lira, R. De Lima, S. Villa, E. Montiel & D. Martínez-Carrera. 2010. Los hongos comestibles y medicinales en México: recursos genéticos, biotecnología, y desarrollo del sistema de producción-consumo. Pp. 91-108. *En: Hacia un Desarrollo Sostenible del Sistema de Producción-Consumo de los Hongos Comestibles y Medicinales en Latinoamérica: Avances y Perspectivas en el Siglo XXI*. Eds. D. Martínez-Carrera, N. Curvetto, M. Sobal, P. Morales & V. M. Mora. Red Latinoamericana de Hongos Comestibles y Medicinales-COLPOS-UNS-CONACYT-AMC-UAEM-UPAEP-IMINAP, Puebla.
- Nanba, H., N. Kodama, D. Schar & D. Turner. 2000. Effects of Maitake (*Grifola frondosa*) glucan in HIV-infected patients. *Mycoscience* 41:293-295.
- Ngai, P. H. K. & T. B. Ng. 2003. Lentin, a novel potent antifungal protein from shiitake mushroom with inhibitory effects on activity of human immunodeficiency virus-1 reverse transcriptase and proliferation of leukemia cells. *Life Sciences* 73:3363-3374.
- Nieminen, P., V. Kärjä & A.-M. Mustonen. 2009. Myo- and hepatotoxic effects of cultivated mushrooms in mice. *Food and Chemical Toxicology* 47:70-74.
- Ooi, V. E. C. & F. Liu. 2000. Immunomodulation and anti-cancer activity of polysaccharide-protein complexes. *Current Medicinal Chemistry* 7:715-729.
- Peña-Luna, M., A. Hidalgo-Miranda, S. Romero-Córdoba, M. Sobal Cruz, P. Morales Almora, G. Jiménez-Sánchez & D. Martínez-Carrera. 2014. Genómica de las propiedades anticancerígenas de los hongos comestibles, funcionales y medicinales: investigaciones INMEGEN-CP. Simposio general Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México (noviembre 26-28), CP-AMC-CONACYT-UPAEP, Puebla, Puebla.
- Peña-Luna, M., A. Hidalgo-Miranda, S. Romero-Córdoba, M. Sobal Cruz, P. Morales Almora, G. Jiménez-Sánchez & D. Martínez-Carrera. 2015a. Genómica de las propiedades anticancerígenas de los hongos comestibles, funcionales y medicinales: investigaciones INMEGEN-CP. *En: Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México*. Eds. D. Martínez-Carrera & J. Ramírez Juárez. Biblioteca Básica de Agricultura, IICA, Academia Mexicana de Ciencias, México, D.F.
- Peña-Luna, M., S. Romero-Córdoba, P. Morales, M. Sobal, H. Escudero, A. Hidalgo-Miranda & D. Martínez-Carrera. 2015b. Gene expression profiles of triple negative breast cancer cells treated with a standardized extract of a Mexican strain of *Ganoderma lucidum*. *International Symposium on Frontiers in Cancer Biology & Drug Development Abstracts* (p. 38). Marzo 12-13, Hong Kong.
- Piketty, T. 2014. *El Capital en el Siglo XXI*. Fondo de Cultura Económica, México, D.F. 663 pp.
- Porter, M. E. 1998. *The Competitive Advantage of Nations*. The Free Press, Nueva York. 855 pp.
- Ramberg, J. E., E. D. Nelson & R. A. Sinnott. 2010. Immunomodulatory dietary polysaccharides: a systematic review of the literature. *Nutrition Journal* 9:54. doi: 10.1186/1475-2891-9-54.
- Refaie, F. M., A. Y. Esmat, A. S. Daba, W. M. Osman & S. M. Taha. 2010. Hepatoprotective activity of polysaccharopeptides from *Pleurotus ostreatus* mycelium on thioacetamide-intoxicated mice. *Micología Aplicada Internacional* 22:1-13.
- Rop, O., J. Mlcek & T. Jurikova. 2009. Beta-glucans in higher fungi and their health effects. *Nutrition Reviews* 67:624-631.
- Rosas-Peralta, M. & F. Attie. 2007. Enfermedad cardiovascular, primera causa de muerte en adultos de México y el mundo. *Archivos de Cardiología de México* 77: 91-93.
- Roupas, P., J. Keogh, M. Noakes, C. Margetts & P. Taylor. 2012. The role of edible mushrooms in health: evaluation of the evidence. *Journal of Functional Foods* 4:687-709.
- Roupas, P., J. Keogh, M. Noakes, C. Margetts & P. Taylor. 2010. Mushrooms and agaritine: a mini-review. *Journal of Functional Foods* 2:91-98.

- Rubio, B. 2014. El Dominio del Hambre: Crisis de Hegemonía y Alimentos. UACH-CP-UAZ-Juan Pablos Editor, México, D.F. 270 pp.
- Salud. 2011. Perfil Epidemiológico de los Tumores Malignos en México. Secretaría de Salud (www.salud.gob.mx), México, D.F. 196 pp.
- Salud. 2005. Norma Oficial Mexicana NOM-043-SSA2-2005. Servicios básicos de salud. Promoción y educación para la salud en materia alimentaria. Diario Oficial de la Federación (enero 23, 2006), México, D.F.
- Shin, A., J. Kim, S. Y. Lim, G. Kim, M. K. Sung, E. S. Lee & J. Ro. 2010. Dietary mushroom intake and the risk of breast cancer based on hormone receptor status. *Nutrition and Cancer* 62:476-483.
- Sliva, D., A. Jedinak, J. Kawasaki, K. Harvey & V. Slivova. 2008. *Phellinus linteus* suppresses growth, angiogenesis and invasive behavior of breast cancer cells through the inhibition of AKT signalling. *British Journal of Cancer* 98:1348-1356.
- Smith, J. E., N. J. Rowan & R. Sullivan. 2002. Medicinal mushrooms: a rapidly developing area of biotechnology for cancer therapy and other bioactivities. *Biotechnology Letters* 24:1839-1845.
- Sobal, M., P. Morales, M. Bonilla, G. Huerta & D. Martínez-Carrera. 2007. El Centro de Recursos Genéticos de Hongos Comestibles (CREGENHC) del Colegio de Postgraduados. Pp. 27-40. En: *El Cultivo de Setas Pleurotus spp. en México*. Eds. J. E. Sánchez, D. Martínez-Carrera, G. Mata & H. Leal. ECOSUR-CONACYT, México, D.F.
- Sumiya, T., Y. Ikeda, A. Broadmeadow, K. May, L. Pritchard, C. Horne & B. Burlinson. 2008. Himematsutake (Iwade strain 101) extract (ABM-FD): genetic toxicology and a 3-month dietary toxicity study in rats. *Food and Chemical Toxicology* 46:1949-1959.
- Tamura, K., J. Dudley, M. Nei & S. Kumar. 2007. MEGA4: molecular evolutionary genetics analysis (MEGA). *Molecular Biology and Evolution* 24:1596-1599.
- Tilg, H. & A. Kaser. 2011. Gut microbiome, obesity, and metabolic dysfunction. *The Journal of Clinical Investigation* 121:2126-2132.
- Villarreal, L. & J. Pérez-Moreno. 1989. Los hongos comestibles silvestres de México, un enfoque integral. *Micología Neotropical Aplicada* 2:77-114.
- Visser, E.-J. 2004. Enfoque internacional sobre el desarrollo de cadenas agroalimentarias. FAO-SAGARPA, México, D.F. 85 pp.
- Wang, D. M. & Y. J. Yao. 2005. Intrastrain internal transcribed spacer heterogeneity in *Ganoderma* species. *Canadian Journal of Microbiology* 51:113-121.
- Wang, H. X. & T. B. Ng. 2001. Isolation and characterization of velutin, a novel low-molecular-weight ribosome-inactivating protein from winter mushroom (*Flammulina velutipes*) fruiting bodies. *Life Sciences* 68:2151-2158.
- Wasser, S. P. 2011. Current findings, future trends, and unsolved problems in studies of medicinal mushrooms. *Applied Microbiology and Biotechnology* 89:1323-1332.
- Wasser, S. P. 2002. Medicinal mushrooms as a source of antitumor and immunomodulating polysaccharides. *Applied Microbiology and Biotechnology* 60:258-274.
- Watt, B. K. & A. L. Merrill. 1975. Composition of Foods. USDA, Agriculture handbook 8, Washington, D.C. 190 pp.
- Wong, J. H., H. X. Wang & T. B. Ng. 2008. Marmorin, a new ribosome inactivating protein with antiproliferative and HIV-1 reverse transcriptase inhibitory activities from the mushroom *Hypsizygus marmoreus*. *Applied Microbiology and Biotechnology* 81:669-674.
- Xu, T., R. B. Beelman & J. D. Lambert. 2012. The cancer preventive effects of edible mushrooms. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry* 12:1255-1263.
- Yang, J.-H., H.-C. Lin & J.-L. Mau. 2001. Non-volatile taste components of several commercial mushrooms. *Food Chemistry* 72:465-471.
- Zhang, M., S. W. Cui, P. C. K. Cheung & Q. Wang. 2007. Antitumor polysaccharides from mushrooms: a review on their isolation process, structural characteristics and antitumor activity. *Trends in Food Science and Technology* 18:4-19.

Se terminó de imprimir en enero de 2016, en
Printing Arts México, Guadalajara, Jalisco, México
El tiraje consta de 1 000 ejemplares

Con el impulso de las grandes revoluciones científico-tecnológicas, el proceso de globalización en el mundo ha dado origen a una crisis civilizatoria de carácter multidimensional, porque no sólo es social y económica, sino también ecológica, energética y alimentaria. Su magnitud afecta los pilares que sustentan la supervivencia humana, sobre todo si se considera el fenómeno del cambio climático. En este contexto, el Sistema Agroalimentario de México es un componente estratégico para garantizar la seguridad alimentaria, la seguridad nacional y el desarrollo sustentable de la sociedad.

México tiene una condición privilegiada en el mundo. Cuenta con un acervo histórico que concentra una gran riqueza cultural, notable sustento alimentario por haber sido centro de origen de la agricultura, amplia diversidad biológica, un patrón alimentario de los más diversos que existen, y abundantes recursos naturales. Esta condición garantizó por siglos la dieta de la población mexicana, cumpliendo con los principios fundamentales de una alimentación sana y equilibrada. Sin embargo, las asimetrías ocasionadas por el contexto internacional y la complejidad de las políticas públicas establecidas durante las últimas décadas han generado cambios radicales en la producción de alimentos, así como en los principios que sustentaban la dieta de la población, a nivel nacional y regional, convirtiendo a México en un importador agroalimentario neto.

En este libro, los expertos más reconocidos en diversas disciplinas abordan, de manera integral y a profundidad, el Sistema Agroalimentario de México, analizando los ejes temáticos de sociedad y alimentación, alimentos y recursos base, alimentos y salud, así como de alimentos, sociedad y cultura. Asimismo, de manera específica, se abordan los sistemas agroalimentarios sustentables de origen vegetal, animal y microbiano. Se argumenta la necesidad de generar un enfoque transversal que promueva la producción y el consumo de alimentos con impacto no sólo en la dieta y la salud humana, sino que también formen parte de la cultura de la población.

También se plantea la conformación de un sistema nacional integrado de instituciones relacionadas con la ciencia, tecnología e innovación en el sector agroalimentario, el cual permita concentrar las investigaciones en los ejes temáticos de mayor relevancia, así como transferir de manera eficiente el conocimiento generado. La construcción de un enfoque de esta naturaleza es impostergable, ya que los alimentos serán cada día más estratégicos en la economía mundial y el futuro de la humanidad.



Editorial del Colegio
de Postgraduados



COLEGIO DE
POSTGRADUADOS
Campus Puebla



Fundación
COLPOS



IMINAP, A.C.



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



ISBN 978-607-715-314-6



9 786077 153146

Martínez-Carrera
Ramírez Juárez
Editores

Ciencia, Tecnología e Innovación en
el Sistema Agroalimentario de México