

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES

AÑO 26
ENERO-ABRIL 2018

73

EDICIÓN CUATRIMESTRAL
ISSN: 1665-4412

CIENCIAS AGROPECUARIAS, CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS, CIENCIAS DE LA SALUD,
INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS, CIENCIAS ECONÓMICAS, CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES



▲ Especies nativas de *Trichoderma* spp. y su actividad antagónica contra *Meloidogyne incognita* en *Solanum lycopersicum* L.

▲ Detección de *Aconophora compressa* Walker (Hemiptera: Membracidae) en poblaciones de *Pinus greggii*. Nuevo reporte en la Sierra Fría, Aguascalientes, México

▲ Tardígrados asociados a una plantación de cítricos de traspatio en la comunidad de El Palmar en Quintana Roo, México

▲ Análisis ecológico de un área de pago por servicios ambientales hidrológicos en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México

▲ Seguimiento fotogramétrico de exhalaciones del volcán Popocatepetl, en México, durante el año 2016

▲ Recuperación de la función de Green mediante ruido sísmico

▲ Funciones compatibles de ahusamiento-volumen para tres especies de *Pinus* en la Unidad de Manejo Forestal 0808 del estado de Chihuahua

▲ Efectos del té de yerba mate, reflejado en el tiempo obtenido en el trabajo del día (WOD) en deportistas que practican CrossFit

▲ La estrategia ambiental en pequeños negocios de artesanía, un ejemplo de medición

▲ Arquitectura de indicadores estratégicos para elevar la calidad de los servicios médicos de los hospitales de alta especialidad

▲ John Maynard Keynes. *In memoriam*

▲ *Building digital government strategies. Principles and practices* [Construyendo estrategias de gobierno digital. Principios y prácticas] Reseña



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Dirección General de Investigación y Posgrado
Departamento de Apoyo a la Investigación

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES, año 26, núm. 73, periodo enero-abril 2018, es una publicación periódica, cuatrimestral, multidisciplinaria, editada y distribuida por la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, Av. Universidad No. 940, Ciudad Universitaria, C.P. 20131, Aguascalientes, Ags., México. Tel./Fax. 449 9 10 74 00, ext. 34113, www.uaa.mx/investigacion/revista, revistaiyc@correo.uaa.mx. Editor responsable: María del Carmen Martínez Serna. Número de Certificado de Reserva otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor: 04-2002-042412342500-102, ISSN: 1665-4412. Número de Certificado de Licitud de Título: 12284, Número de Certificado de Licitud de Contenido: 8497, ambos otorgados por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Registro Postal en SEPOMEX No. PP01-0003. Diseñada e impresa en el Departamento de Procesos Gráficos de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, Av. Universidad No. 940, Ciudad Universitaria, C.P. 20131, Aguascalientes, Ags., México. Este número se terminó de imprimir el 31 de enero de 2018 con un tiraje de 1,000 ejemplares.

Los artículos firmados son responsabilidad de su autor y no reflejan necesariamente el criterio de la institución, a menos que se especifique lo contrario.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Precio por ejemplar \$60.00 (pesos). Costo por suscripción anual \$160.00 (pesos).

La revista **Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes** está citada en los siguientes índices:

ÍNDICES:

Índice de Revistas Mexicanas de Divulgación Científica y Tecnológica del CONACYT,

<http://www.conacyt.gob.mx>

Índice Internacional, "Actualidad Iberoamericana" ISSN 0717-3636. Centro de Información Tecnológica-CII, La Serrana, Chile, <http://www.citchile.cl>

IRESIE (Índice de Revistas de Educación Superior e Investigación Educativa), <http://iresie.unam.mx>

LATINDEX (Sistema Regional de Información en línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal), <http://www.latindex.org>

PERIÓDICA (Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias), periodica.unam.mx

REDALYC (Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal), <http://www.redalyc.org>

BASES DE DATOS:

BIBLAT (Bibliografía Latinoamericana en revistas de investigación científica y social), <http://biblat.unam.mx/es/>

DIALNET (Hemeroteca de artículos científicos hispanos en internet) <http://dialnet.uniroja.es>

INFORME ACADÉMICO, www.gale-la.com/galeiberoweb/products/db/informe-academico.php

ULRICH'S Periodicals Directory, <http://ulrichsweb.serialssolutions.com>

EBSCO, MÉXICO, <https://www.ebscohost.com>



**ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

FOTOGRAFÍAS DE PORTADA:

• Efecto de las especies de *Trichoderma* • Acercamiento de un ejemplar adulto de *A. compressa* • Cuerpo de *Ramazzottius* • Artesanos vidriando sus piezas en Santa María Atzompa, Oaxaca • Rodajas que representan el perfil del fuste del arbolado • Cascada principal de Mexiquillo • Espécimen sano de *P. greggii*, nótese el follaje en color verde brillante • Aparato bucal-faríngeo de tipo Mesobiotus

DIRECTORIO

Dr. en C. Francisco Javier Avelar González
Rector

M. en Der. Const. J. Jesús González Hernández
Secretario General

Dra. en Admón. María del Carmen Martínez Serna
Directora General de Investigación y Posgrado

Dr. en Farm. Raúl Ortiz Martínez
Decano del Centro de Ciencias Agropecuarias

M. en C. José de Jesús Ruiz Gallegos
Decano del Centro de Ciencias Básicas

M. en C. Luis Enrique Arámbula Miranda
Decano del Centro de Ciencias de la Ingeniería

Dr. Jorge Prieto Macías
Decano del Centro de Ciencias de la Salud

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

Dra. Sandra Yesenia Pinzón Castro
Decana del Centro de Ciencias Económicas y Administrativas

M. en Imp. Salvador de la Cruz Torres
Decano del Centro de Ciencias Empresariales

Dra. Griselda Alicia Macías Ibarra
Decana del Centro de Ciencias Sociales y Humanidades

M. en RSM. José Luis García Ruvalcaba
Decano del Centro de las Artes y la Cultura

CONSEJO EDITORIAL

- Dr. Francisco Cervantes Pérez
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, MÉXICO
CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
- Dr. Alfredo Feria Velasco
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA, MÉXICO
DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES
- Dr. Luis Miguel García Segura
INSTITUTO CAJAL
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
MADRID, ESPAÑA
- Dr. Frank Marcano Requena
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA, VENEZUELA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
- Dr. Javier de Felipe Oroquieta
INSTITUTO CAJAL
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
MADRID, ESPAÑA
- Dr. Philippe Poujeol
UNIVERSIDAD DE NIZA-SOPHIA, ANTIPOLIS FRANCESA, FRANCIA
LABORATORIO DE FISIOLÓGIA CELULAR Y MOLECULAR
- Dr. José Luis Reyes Sánchez
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, MÉXICO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEPTO. DE FISIOLÓGIA, BIOFÍSICA Y NEUROCIENCIAS

COMITÉ EDITORIAL

- Dr. Jaime Raúl Bonilla Barbosa
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS, MÉXICO
CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
- Dr. Juan Carlos A. Jáuregui Correa
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO, MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
- Dra. Edith R. Jiménez Huerta
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA, MÉXICO
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS REGIONALES-INESER
- Dra. María J. Rodríguez-Shadow
INSTITUTO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA E HISTORIA, MÉXICO
DIRECCIÓN DE ETNOLOGÍA Y ANTROPOLOGÍA SOCIAL
- Dr. Óscar Alejandro Viramontes Olivares
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA, MÉXICO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN SOCIAL Y ADMINISTRATIVO
Y SUSTENTABLE
- Dra. Mineko Shibayama
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL IPN, MÉXICO
DEPARTAMENTO DE INFECTÓMICA Y PATOGÉNESIS MOLECULAR
- Dra. María del Carmen Martínez Serna
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
Editor
- Lic. Sandra Margarita Ruiz Guerra
Asistente
- Lic. Mónica Ávalos Valladares
Corrector de estilo
- Mtra. Pia María White
Corrector de estilo idioma Inglés
- DEPARTAMENTO DE PROCESOS GRÁFICOS
Armado e impresión

CONTENIDO

INVESTIGACIÓN

Pág.

CIENCIAS AGROPECUARIAS

- **Especies nativas de *Trichoderma* spp. y su actividad antagónica contra *Meloidogyne incognita* en *Solanum lycopersicum* L.** 5-12
Native species of Trichoderma spp. and its antagonistic activity against Meloidogyne incognita in Solanum lycopersicum L.

Jiram Ivan Cetz Chi
Jairo Cristóbal Alejo
José María Tún Suárez
Fernando Antonio Peraza Luna
Juan Candellero de la Cruz

CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

- **Detección de *Aconophora compressa* Walker (Hemiptera: Membracidae) en poblaciones de *Pinus greggii*. Nuevo reporte en la Sierra Fría, Aguascalientes, México** 13-19
Detection of Aconophora compressa Walker (Hemiptera: Membracidae) in populations of Pinus greggii. New report from the Sierra Fria, Aguascalientes, Mexico

Vicente Díaz-Núñez
Joaquín Sosa-Ramírez
Andrés Herrera-Rodríguez
María Guadalupe Luna-Arvizu

- **Tardígrados asociados a una plantación de cítricos de traspatio en la comunidad de El Palmar en Quintana Roo, México** 20-26
Tardigrades associated with a backyard citrus plantation in El Palmar community in Quintana Roo, Mexico

Abril Anguas-Escalante
Wilbert Andrés Pérez-Pech
Roberto Guidetti
Leopoldo Querubín Cutz-Pool
Héctor Ortiz-León

- **Análisis ecológico de un área de pago por servicios ambientales hidrológicos en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México** 27-36
Ecological analysis of a payment for hydrological environmental services area in the common land La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, Mexico

José Manuel Zúñiga Vásquez
Erick Alberto Martínez López
Carlos Navarrete Gallardo
José de Jesús Graciano Luna
David Maldonado Ayala
Bonifacio Cano Mejía

- **Seguimiento fotogramétrico de exhalaciones del volcán Popocatepetl en México durante el año 2016** 37-48
Photogrammetric follow-up of the Popocatepetl volcano exhalations in Mexico during the year 2016

Rogelio Ramos Aguilar
Patricia Máximo Romero
Andrés Sánchez Hernández
María de la Cruz Vázquez García
Ana Guadalupe Martínez Ortiz
Mariana Reyes Parada
Leslie Pamela Falcón Calderón
Dora Marcela Benítez Ramírez

CONTENIDO

INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS

- **Recuperación de la función de Green mediante ruido sísmico** 49-57
Recovering the Green function by means of seismic noise

Francisco José Sánchez-Sesma
Manuel Carbajal-Romero
José Efraín Rodríguez-Sánchez
Rafael Ávila-Carrera
Alejandro Rodríguez-Castellanos

- **Funciones compatibles de ahusamiento-volumen para tres especies de *Pinus* en la Unidad de Manejo Forestal 0808 del estado de Chihuahua** 58-67
*Taper-volume compatible functions for three *Pinus* species at Management Forest Unit 0808 from Chihuahua state*

Edgar Silva-González
Marco Antonio Nava-Moreno
Francisco Javier Hernández
José Guadalupe Colín

CIENCIAS DE LA SALUD

- **Efectos del té de yerba mate, reflejado en el tiempo obtenido en el trabajo del día (WOD) en deportistas que practican CrossFit** 68-73
Mate tea effects reflected in time performed in the work of the day (WOD) in athletes who practice CrossFit

Alejandra Ortega-Bueno
Margarita Isabel Ruiz-Esparza
Ricardo Ernesto Ramírez Orozco

CIENCIAS ECONÓMICAS Y ADMINISTRATIVAS

- **La estrategia ambiental en pequeños negocios de artesanía, un ejemplo de medición** 74-83
Environmental strategy in handcraft small businesses, an example of measurement

Patricia S. Sánchez Medina

- **Arquitectura de indicadores estratégicos para elevar la calidad de los servicios médicos de los hospitales de alta especialidad** 84-94
Architecture of strategic indicators to improve the quality of medical services of high specialty hospitals

Martha Katty Torres Salgado
Carlos Arturo Vega Lebrún

OBITUARIO

- **John Maynard Keynes. *In memoriam*** 95-96

Gonzalo Maldonado Guzmán

RESEÑA

- ***Building digital government strategies. Principles and practices*** 97-98
[Construyendo estrategias de gobierno digital. Principios y prácticas]

Manuel Díaz Flores

Especies nativas de *Trichoderma* spp. y su actividad antagónica contra *Meloidogyne incognita* en *Solanum lycopersicum* L.

Native species of *Trichoderma* spp. and its antagonistic activity against *Meloidogyne incognita* in *Solanum lycopersicum* L.

Jiram Ivan Cetz Chi*, Jairo Cristóbal Alejo*, José María Tún Suárez*,
Fernando Antonio Peraza Luna**, Juan Candelero de la Cruz**✉

Cetz Chi, J. I., Cristóbal Alejo, J., Tún Suárez, J. M., Peraza Luna, F. A., & Candelero de la Cruz, J. (2018). Especies nativas de *Trichoderma* spp. y su actividad antagónica contra *Meloidogyne incognita* en *Solanum lycopersicum* L. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 5-12.

RESUMEN

En condiciones protegidas, se evaluó el potencial antagónico de cinco especies nativas de *Trichoderma*; *T. harzianum* (Th02-04), *T. harzianum* (Th10-D86), *T. simmonsii* (Th33-58), *T. virens* (Th33-59) y *T. virens* (Th26-52), especies comerciales y un testigo sin inoculantes fúngicos, distribuidas en un diseño completamente al azar y cuatro repeticiones en plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), inoculadas con tres aplicaciones de 1×10^6 conidias ml^{-1} . Se inocularon 18, 500 huevos de *M. incognita* y 10 ml con la concentración inicial de las conidias fúngicas, con aplicaciones al momento, a los ocho y 15 días después del trasplante. El producto comercial y las especies *T. virens* (Th26-52 y Th33-59) lograron disminuir hasta 22% la formación de agallas, 87 y 52.39% de inhibición de producción de formación de hembras por gramo de raíz. El control

Palabras clave: microorganismos benéficos; biocontrolador; nematodo agallador; cultivo tomate.

Keywords: beneficial microorganisms; biocontroller; knot nematode; tomato crop.

Recibido: 19 de abril de 2017, aceptado: 17 de octubre de 2017

* División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Conkal, Tecnológico Nacional de México. Km 16.3, antigua carretera Mérida-Motul, C. P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Correo electrónico: jiram_ivan17@hotmail.com; jairoca54@hotmail.com; tun@colpos.mx

** División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Tizimín, Tecnológico Nacional de México. Final aeródromo Cupul s/n, C. P. 97700, Tizimín, Yucatán, México. Correo electrónico: fperaza45@yahoo.com; candelerocruz@hotmail.com

✉ Autor para correspondencia

de estas especies contra el nematodo favoreció el mejor crecimiento vegetativo de las plantas.

ABSTRACT

Under protected conditions, the antagonistic potential of five native *Trichoderma* strains was evaluated; *T. harzianum* (Th02-04), *T. harzianum* (Th10-D86), *T. simmonsii* (Th33-58), *T. virens* (Th33-59) and *T. virens* (Th26-52), commercial species and a control without fungal inoculans, distributed in a completely randomized design with four replications in tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) inoculated with three applications of 1×10^6 conidia ml^{-1} 18, 500 eggs of *M. incognita* and 10 ml were inoculated with the initial concentration of fungal conidia and with applications at the moment, at 8 and 15 days after transplantation. The commercial product and the species *T. virens* (Th26-52 and Th33-59) managed to reduce up to 22% the formation of galls, an 87 and achieved a 52.39% inhibition of production of female formation per gram of root. The control of these species against the nematode favored a better vegetative growth of the plant.

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de la búsqueda de nuevos productos que disminuyan el deterioro ambiental debido a la aplicación no planificada de agroquímicos en la producción de alimentos, en los últimos años se ha incrementado el número de

aislamientos de microorganismos benéficos con capacidad para estimular el crecimiento vegetativo y su actividad antagonistas de fitopatógenos (Hernández Ochandía et al., 2015; Pinzón Espinoza, Candellero de la Cruz, Tun Suárez, Reyes Oregel, & Alejo, 2015). En particular, el género *Trichoderma* se caracteriza por su habilidad de crecer y adaptarse a diversos tipos de sustratos y condiciones ambientales adversas; esta capacidad se le atribuye a la producción de metabolitos secundarios volátiles de bajo peso molecular y no volátiles que se liberan durante su establecimiento en la rizosfera (Candellero De la Cruz et al., 2015; González et al., 2012; Pinzón Espinoza et al., 2015).

En la península de Yucatán, el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es el segundo cultivar de importancia económica, después del chile habanero (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2015). Sin embargo, los rendimientos son limitados por fitopatógenos de la raíz que causan pérdidas de producción en su cultivo (Sangüesa-Barreda et al., 2015), como *Meloidogyne incognita* que tiene una amplia distribución geográfica y en algunas regiones agrícolas de México, no sólo causa la formación de agallas en la raíz de este cultivo, sino que facilita la penetración e infección de otros fitopatógenos (Herrera Parra, Cristóbal Alejo, Tun Suárez, Góngora Jiménez, & Lomas Barrie, 2011). Por otra parte, la demanda de alimentos inocuos, la presión de la sociedad para generar nuevas políticas internacionales en el uso de estrategias de control más amigables para la salud humana, el ambiente y la preservación de la biodiversidad de poblaciones antagonistas naturales (Bautista Montealegre, Bolaños Benavides, Massae Asakawa, & Villegas E., 2015; Pakeerathan, Mikunthan, & Tharshani, 2009), exigen tácticas de control biorracional de estos fitopatógenos; con base en lo anterior se planteó el siguiente objetivo de estudio: evaluar especies nativas de *Trichoderma* con actividad supresora en las poblaciones del nemátodo agallador *M. incognita* en *S. lycopersicum* L. bajo condiciones protegidas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el laboratorio de Fitopatología y en área de investigación del Instituto Tecnológico de Conkal, en Yucatán, coordenadas 20° 06' latitud norte y 89° 29' longitud oeste.

Obtención de huevos y J₂ de *Meloidogyne incognita*

Se tomaron raíces agalladas de *M. incognita* de plantaciones comerciales de *S. lycopersicum* L. para favorecer el desprendimiento de las masas de huevos y eliminar microorganismos que pudieran dañar su viabilidad, se desinfectaron con hipoclorito de sodio (NaClO) a 1% durante 2 min y al finalizar se realizaron lavados sucesivos con agua potable en tamices de malla número 300 y 400, respectivamente. Se colocaron en estufa de cultivo a 28 °C para su eclosión (Candellero De la Cruz et al., 2015; Pinzón Espinoza et al., 2015). Se realizaron cortes perineales de las hembras, confirmado mediante el patrón perineal la identificación de la especie (Jepson, 1987).

Inoculación *Trichoderma* spp. en semillero

Se obtuvieron de zonas sin actividad agrícola 41 aislados de *Trichoderma* spp. mediante la técnica de filtración de partículas y con éstos se obtuvieron 41 filtrados en medio de cultivo papa dextrosa, para exponer y estimar in vitro el efecto antagonista contra juveniles de segundo estadio (J₂) de *M. incognita*. El estudio preliminar seleccionó a cinco aislados registrados como Th33-58, Th33-59, Th26-52, Th02-04, y Th10-D86 con la capacidad de causar después de 48 h de exposición 100% de mortalidad del nemátodo. El estudio in vivo de estos aislados seleccionados comenzó con la siembra de semilla tomate cv. Río Grande en charolas de poliestireno de 200 cavidades en sustrato comercial Cosmo Peat® (Soria Fregoso, Tun Suárez, Trejo Rivera, & Terán Saldivar, 2002).

Las cepas nativas de *Trichoderma* pertenecientes al laboratorio de Fitopatología de la misma institución se cultivaron en medio de cultivo papa dextrosa agar (PDA) a 28 °C durante ocho días. Cada semilla se inoculó a una concentración de 1 x 10⁶ conidias ml⁻¹ del hongo, al momento de la siembra y 15 días después de la germinación. Las cepas indicadas se identificaron molecularmente con la extracción de DNA, a partir de cultivos monospóricos con el Kit ZR Fungal/Bacterial DNA MiniPrep TM. La amplificación de las regiones ITS1 e ITS2 y 5.8s del ARN ribosomal se realizó con los iniciadores ITS1 e ITS4 (White, Bruns, Lee, & Taylor, 1990).

Los productos de PCR se enviaron a secuenciar a la empresa MacroGen USA, se analizaron y compararon con el banco de genes de NCBI

(National Center for Biotechnology Information) y con ayuda del programa Blast. Los resultados de la identificación con una homología entre 99-100% fue la siguiente: *T. harzianum* (Th02-04), *T. harzianum* (Th10-D86), *T. simmonsii* (Th33-58), *T. virens* (Th33-59) y *T. virens* (Th26-52).

Inoculación de huevos de *M. incognita* en plantas de tomate

El trasplante se realizó a los 30 días después de la germinación, en bolsas de plástico para vivero (capacidad de 3 kg) y suelo previamente homogenizado. Se inocularon 10 ml por planta de la solución final fúngica y 18, 500 huevos de *M. incognita* con el mismo volumen de agua alrededor del cuello. Se realizaron aplicaciones con la misma concentración inicial (1×10^6 conidias ml^{-1}), una al momento, a los siete y 15 días después del trasplante. Los tratamientos incluyeron cinco aislados de *Trichoderma* spp.; *T. harzianum* (Th02-04), *T. harzianum* (Th10-D86), *T. simmonsii* (Th33-58), *T. virens* (Th33-59) y *T. virens* (Th26-52), dos testigos; un producto comercial, Fithán (*Trichoderma* spp.) y un testigo sin inoculante fúngico (SINF); cada tratamiento incluyó 10 repeticiones, con 10 plantas como unidad experimental, distribuidas en un diseño completamente al azar, durante 40 días en condiciones protegidas.

Variables de estimación de control del nemátodo

Índice de agallamiento. El índice de agallamiento causado por el nemátodo en los tratamientos se obtuvo en porcentaje mediante el uso de una escala de severidad con 6 clases (Taylor & Sasser, 1983), y para propósitos de análisis se utilizó el punto medio de cada clase: G-0=0, G-1=1-10, G-2=11-25, G-3=26-50, G-4=51-75 y G-5=76-100.

Huevos por un gramo de raíz. Se fragmentaron raíces y se homogenizaron para tomar un gramo de muestra, se licuaron con 30 ml de cloro a 2% durante 11 segundos, se pasaron a tamices de malla número 50, 100, 200, 300 y 400. Se lavaron en agua corriente, éstas se depositaron en frascos de cristal. Finalmente, se contabilizaron con la ayuda de una cámara cuenta nemátodos al microscopio compuesto (Cristóbal Alejo et al., 2010).

Hembras por un gramo de raíz. Para facilitar la disección y observación de hembras adultas que se encuentran en el cilindro vascular se tiñeron con 4 ml de fucsina ácida en 50 ml de agua destilada, se colocó un gramo de raíz, envueltas con las

gasas tipo tela hasta punto de ebullición. Una vez a temperatura ambiente y después de una serie de lavados con agua, se conservaron en glicerina. Para extraer y contabilizar el número de hembras, las raíces teñidas se disecaron con la ayuda de agujas de disección a través del microscopio estereoscópico (Pinzón Espinoza et al., 2015). Transcurridos 40 días se midieron las variables agronómicas; en la variable altura de planta se procedió a extraer las plantas de las bolsas y se fragmentaron las raíces del tallo, con cinta métrica se midió desde el ápice de la planta hasta la base del tallo. Una vez tomadas las muestras de los diferentes estudios se determinó el peso seco foliar de tallos y hojas fraccionadas, se depositaron en bolsas de papel estraza, se colocaron en una estufa de secado a 45 °C durante 20 días. Para el peso seco de raíz se realizó de la misma manera que en la variable peso seco foliar, solamente que para eliminar el exceso de humedad fue durante 10 días. Al finalizar el secado se pesaron en una balanza analítica de marca Denver instrument PK-2401. El volumen de raíces se calculó por desplazamiento volumétrico de agua con una probeta de 1000 ml de capacidad.

Análisis estadístico

Con la información obtenida de las variables respuesta se realizó el análisis de varianza, cuando se encontró diferencia significativa entre los tratamientos, se utilizó como comparador de medias el método de Tukey ($p \leq 0.05$). Los datos se analizaron mediante el paquete estadístico InfoStat versión 2014 (Di Rienzo, 2012).

RESULTADOS

Formación de agallas de *M. incognita*

El análisis de varianza mostró altas diferencias significativas ($P \leq 0.001$) entre tratamientos para la variable formación de agallas. El testigo comercial (Fithan ®) conformado por un consorcio de *Trichoderma* spp. y las especies *T. virens* (Th26-52) y *T. simmonsii* (Th33-59) tuvieron el mejor efecto (Tukey, ≤ 0.05) antagónico, al permitir rangos que oscilaron de 26 a 28% la formación de este parámetro. Le siguen en efectividad biológica las especies *T. simmonsii* (Th33-58) y *T. harzianum* (Th10-D86), hasta con 53% de formación de agallas (tabla 1). Con menos efecto, la especie *T. harzianum* (Th02-04) y el tratamiento testigo sin inoculantes fúngicos (SINF) registraron el valor más alto en este parámetro de estimación, con 70.50 y 84.40% de raíces con agallas.

Tabla 1
Efecto antagónico de especies de *Trichoderma* en el control y reproducción de *Meloidogyne incognita*

Tratamientos	Severidad en la raíz (%)	Número de	
		huevos por un gramo de raíz	hembras por un gramo de raíz
Testigo sin inoculantes fúngicos	84.40a	8161.70a	226.60a
<i>T. harzianum</i> (Th02-04)	70.50a	4470.60b	173.50b
<i>T. harzianum</i> (Th10-D86)	53.00b	3200.80b	155.90b
<i>T. simmonsii</i> (Th33-58)	45.50b	2997.60c	107.90c
<i>T. virens</i> (Th33-59)	28.00c	1062.60d	100.20c
<i>T. virens</i> (Th26-52)	26.00c	912.90d	94.40c
<i>Trichoderma</i> spp. (Fithán®)	22.00c	887.10d	77.70c
DMS	6.02	362.63	17.02
C.V.	9.40	8.59	9.35

Nota: barras con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$), DMS: diferencia mínima significativa, C.V.: coeficiente de variación (%).
Elaboración propia.

Número de huevos de *M. incognita*

El análisis de la varianza evidenció altas diferencias significativas ($P \leq 0.001$) entre tratamientos para el número de huevos por un gramo de raíz en plantas de *S. lycopersicum* L. tratadas con aislados fúngicos de *Trichoderma* spp.

El producto comercial (Fithan®) y las especies identificadas como *T. virens* (Th26-52) y *T. virens* (Th33-59) estadísticamente fueron iguales (Tukey, $P \leq 0.05$), con efectos supresores que oscilaron de 87 a 89.14% en la disminución de huevos por un gramo de raíz de este fitoparásito; siguen las plantas tratadas con las conidiosporas de la especie *T. simmonsii* (Th33-58), con 63.28% de inhibición sobre este parámetro de estimación; continúan en menor porcentaje las especies *T. harzianum* (Th10-D86 y Th02-04) con rangos que van de 45.23 a 60.79% de disminución en la reproducción de este nemátodo. El tratamiento testigo sin inoculantes fúngicos (SINF) tuvo la reproducción más alta del nemátodo con una media de hasta 8,161.70 huevos por un gramo de raíz en *S. lycopersicum* (tabla 1).

Número de hembras de *M. incognita*

En el análisis de varianza la variable mostró una reducción significativa ($P \leq 0.001$) en el número de hembras por un gramo de raíz. Las especies, *T. virens* (Th26-52), *T. simmonsii* (Th33-58), *T. virens* (Th33-59) y el producto comercial (Fithan®) obtuvieron entre

52.39 y 65.72% de reducción sobre este parámetro de estimación; continúan en efectividad biológica las especies *T. harzianum* (Th10-D86) y *T. harzianum* (Th02-04) que disminuyeron la formación de hembras por gramo de raíz de 23.44 al 31.21%. El testigo sin inoculantes fúngicos (SINF) presentó el promedio más alto con 226.60 hembras por gramo de raíz teñida (tabla 1).

Variables agronómicas

El análisis de varianza ($P \leq 0.001$) detectó altas diferencias significativas entre tratamientos para las variables agronómicas de respuesta consideradas para este estudio. En relación con la variable altura de la planta, las especies *T. simmonsii* (Th33-58), *T. virens* (Th33-59), *T. virens* (Th26-52) y el producto comercial (Fithan®) registraron los valores más altos, con incrementos que oscilan de 8.43 a 14.24% de plantas con mayor altura (figura 1). En la variable peso seco foliar resultaron ser positivas en las plantas inoculadas con las cepas *T. virens* (Th33-59) y *T. simmonsii* (Th33-58) con incrementos de 7.33 a 38.48% superiores con respecto al testigo sin inoculantes fúngicos.

Del peso seco de la raíz, las especies *T. virens* (Th33-59), y *T. harzianum* (Th02-04) incrementaron hasta 51.57% la ganancia de esta variable. Para la variable volumen radical, las plantas inoculadas con las especies de *Trichoderma* del producto



Figura 1. Efecto de las especies de *Trichoderma* como promotor del crecimiento en plantas de tomate (*S. lycopersicum* L.) inoculadas con *Meloidogyne incognita*. Fotografía del equipo de trabajo.

comercial (Fithan®) y la especie *T. virens* (Th33-59) indujeron los incrementos más altos, con rangos de ganancias que oscilan de 12.19 a 30.68%. El testigo sin los inoculantes fúngicos presentó los valores más bajos de crecimiento de las plantas (tabla 2).

DISCUSIÓN

Las plantas con mayor cantidad de agallas mostraron una clorosis generalizada, marchitamiento, déficit hídrico generalizado, raíces atrofiadas, poco

ramificadas y carentes de pelos absorbentes. Estos síntomas se observan con mayor severidad cuando se incrementa la producción de proteínas en las agallas, lo cual induce un mal funcionamiento de los reguladores de crecimiento que se asocian con la inadecuada absorción, asimilación y translocación de nutrimentos en toda la planta (Carrillo Fasío, García Estrada, Allende Molar, Márquez Zequera, & Cruz Ortega, 2000).

El efecto supresor en la producción de huevos se encuentra a favor de los tratamientos inoculados con las especies de *Trichoderma*. Resultados similares fueron reportados por Mendoza, Wilson y Colina (2013), así como por Pinzón Espinoza et al. (2015), quienes al evaluar especies nativas y comerciales como *T. atroviride*, *T. harzianum* y *T. viride* en plantas de tomate, lograron disminuir el número de huevos por un gramo de raíz licuada de este cultivar. Leyva Pérez, Castellanos González y Pérez Fernández (2011) al evaluar alternativas con la inclusión de *T. viride*, *Bacillus thuringiensis* y desechos de col fragmentados, lograron afectar la viabilidad parasitaria y con esto reducir hasta 52.67% las poblaciones de *M. incognita* en este mismo cultivar. Por su parte, Goswami, Pandey, Rathour, Bhattacharya, & Singh (2006) con aplicaciones de *Paecilomyces lilacinus* y *T. viride* lograron disminuir hasta 17% la formación de masas de huevos por un gramo de raíz licuada de este fitonemátodo agallador.

Tabla 2

Efecto de las especies de *Trichoderma* en el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate en condiciones protegidas

Tratamientos	Altura cm	Peso seco foliar (tallos y hojas) g	Peso seco de raíz g	Volumen radical cm ³
Testigo sin inoculantes fúngicos	81.30c	22.84d	2.76d	37.50c
<i>T. harzianum</i> (Th02-04)	90.20ab	30.75bc	5.20ab	44.50bc
<i>T. harzianum</i> (Th10-D86)	86.80ab	28.97c	3.62cd	40.80bc
<i>T. simmonsii</i> (Th33-58)	94.80a	34.41ab	3.90cd	45.40bc
<i>T. virens</i> (Th33-59)	94.00a	37.13a	5.76a	47.50ab
<i>T. virens</i> (Th26-52)	92.40a	32.01bc	4.33bc	44.90bc
Fithan®	92.20a	31.70bc	3.35cd	54.10a
DMS	10.48	1.28	3.92	8.79
C.V %	8.53	22.83	9.26	14.36

Nota: Medias con las mismas literales dentro de columnas son estadísticamente iguales, (Tukey, $P \leq 0.05$). DMS: diferencia mínima significativa. C.V.: coeficiente de variación (%).

Elaboración propia.

La reproducción de hembras (*M. incognita*) en raíces de *S. lycopersicum* disminuyó significativamente por consecuencia de las especies de *Trichoderma*. Estudios realizados por Hernández Ochandía et al. (2015), al evaluar el potencial de *T. asperellum* (10^7 UFC ml⁻¹) como biocontrolador de *M. incognita* en plantas de tomate, causó una disminución sobre este parámetro de estimación. Asimismo, la eficiencia antagonista con aplicaciones individuales de *Paezilomyces lilacinus* y *T. viride*, redujeron hasta 37.67 y 21.05% respectivamente, el número de hembras de *M. incognita* (Candeleiro De la Cruz et al., 2015; Goswami et al., 2006; Pinzón Espinoza et al., 2015). El mecanismo que mejor explica este efecto es la producción de compuestos capaces de inducir una respuesta de defensa local o sistémica, se asocian con la síntesis y acumulación de fitoalexinas y flavonoides, a los derivados fenólicos como el 2, 4 diacetilfloroglucinol: DAGP (Chet, Viterbo, Brotman, & Lousky, 2006; Siddiqui & Shaukat, 2004). También se demostró que la producción de antibióticos (Ayatollahy & Fateemy, 2010; Liu, Zhai, Liu, & Zhang, 2009) y de la toxina verticilina A, B y C inducen inhibición de la eclosión de huevos, inmovilidad y mortalidad de juveniles de segundo estadio (J₂) de los nematodos agalladores (Cardona Bustos, Pavas, & Fernández E., 2014).

Así como en este estudio, Haseeb, Sharma y Shukla (2005), además de reducir las poblaciones de *M. incognita*, obtuvieron plantas con mayor vigor y crecimiento vegetativo de hasta 16 y 17.8%. El control del nemátodo por las especies de *Trichoderma* y

la producción del ácido indol-acético, y otros compuestos afines (Vera, Pérez, & Valencia, 2002), son factores que favorecen la solubilización de fosfatos en la rizosfera de los que la planta puede disponer como cationes; hierro, magnesio y manganeso para su nutrición. Sin embargo, resultados contrarios fueron reportados por Del Castillo-Algarate, Collantes-Arana, Cox-Trigoso y Wilson-Krugg (2014), al evaluar la actividad antagonista de especies de *Trichoderma* en la reproducción de *M. incognita* en plantas de *S. lycopersicum*, donde causaron una disminución del peso radicular debido a la formación de huevos que implicaron mayor demanda de agua, nutrimentos, los productos de la fotosíntesis son más vulnerables y en consecuencia disminuye la eficiencia en la formación de raíces primarias y secundarias (Carrillo Fasio et al., 2000).

CONCLUSIONES

Las especies nativas de *Trichoderma*; *T. virens* (Th26-52), *T. virens* (Th33-59) y el producto comercial Fithán® son una alternativa de control biológico eficaz contra *M. incognita*, al reducir hasta 62.20% la formación de agallas, 88.82% el número de huevos por un gramo de raíz licuada y hasta 65.72% de reducción en el número de hembras por un gramo de raíz teñida de *S. lycopersicum*. Además, *T. virens* (Th33-59) fue la más consistente en la actividad antagonista del fitonemátodo agallador y con efectos significativos en los parámetros de estimación sobre el crecimiento de la planta de tomate en condiciones protegidas.

REFERENCIAS

- Ayatollahy, E., & Fatemy, S. (2010). *In vitro* assessment of pathogenicity and culture filtrates of fungi against *Heterodera schachtii*. *Applied Entomology and Phytopathology*, 77(2), 15-17. Recuperado de http://www.sid.ir/EN/VEWSSID/J_pdf/87720100201.pdf
- Bautista Montealegre, L. G., Bolaños Benavides, M. M., Massae Asakawa, N., & Villegas E., B. (2015). Respuesta de fitonematodos de plátano *Musa ABB Simmonds* a estrategias de manejo integrado del suelo y nutrición. *Revista Luna Azul de la Universidad de Caldas*, 40, 69-84. doi: 10.17151/luaz.2015.40.6
- Cardona Bustos, N. L., Pavas, H., & Fernández E., P. (2014). Efecto del filtrado crudo de *Purpureocillium* sp. (Cepa UdeA 0106), sobre la eclosión de huevos y movilidad de juveniles de *Meloidogyne incognita-javanica*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 16(2), 37-44. doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v16n2.47241
- Carrillo Fasio, J. A., García Estrada, R. S., Allende Molar, R., Márquez Zequera, I., & Cruz Ortega, J. E. (2000). Identificación y distribución de especies del nematodo nodulador (*Meloidogyne* spp.) en hortalizas, en Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 18(2), 115-119. Recuperado <http://www.redalyc.org/pdf/612/61218208.pdf>
- Candelero De la Cruz, J., Cristóbal Alejo, J., Reyes Ramírez, A., Tún Suárez, J. M., Gamboa Angulo, M. M., & Ruíz Sánchez, E. (2015). *Trichoderma* spp. promotoras del crecimiento en plántulas de *Capsicum chinense* Jacq. y antagonicas contra *Meloidogyne incognita*. *PHYTON. International Journal of Experimental Botany*, 84(1), 113-119. Recuperado de https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/519/1/2015_AI_id37069_Marcela_Gamboa.pdf
- Chet, I., Viterbo, A., Brotman, Y., & Lousky, T. (2006). Enhancement of plant disease resistance by the biocontrol agent *Trichoderma*. *Life Sciences*. Recuperado de http://www.weizmann.ac.il/Biology/open_day_2006/book/Abstracts/Ilan_Chet.pdf
- Cristóbal Alejo, J., Herrera-Parra, E., Reyes Oregel, V., Ruiz Sánchez, E., Tun Suárez, J. M., & Celis Rodríguez, T. (2010). *Glomus intraradices* contra el control de *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) Chitwood en condiciones protegidas. *Fitosanidad*; 14(1), 25-29. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/fit/v141/fit04110.pdf>
- Del Castillo-Algarate, O., Collantes-Arana, C., Cox-Trigoso, G., & Wilson-Krugg, J. (2014). Efecto de dos especies nativas de *Trichoderma* sobre huevos y juveniles de *Meloidogyne* sp. en condiciones de laboratorio. *REBIOLEST. Revista Científica de Estudiantes de la Universidad Nacional de Trujillo*, 2(1), e24. Recuperado de <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/ECCBB/article/view/641>
- González, I., Infante, D., Martínez, B., Arias, Y., González, N., Miranda, Y., & Peteira, B. (2012). Induction of chitinases and glucanases in *Trichoderma* spp. strains intended for biological control. *Biotecnología Aplicada*, 29, 12-16. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/bta/v29n1/bta02112.pdf>
- Goswami, B. K., Pandey, R. K., Rathour, K. S., Bhattacharya, C., & Singh, L. (2006). Integrated application of some compatible biocontrol agents along with mustard oil seed cake and furadan on *Meloidogyne incognita* infecting tomato plants. *Journal Zhejiang University Science B*, 7(2), 873-875. doi: 10.1631/jzus.2006.B0873
- Haseeb, A., Sharma, A., & Shukla, P. K. (2005). Studies on the management of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*-wilt fungus, *Fusarium oxysporum* disease complex of green gram, *Vigna radiata* cv. ML-1108. *Journal of Zhejiang University Science B*, 6(8), 736-742. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16052706>
- Hernández Ochandía, D., Rodríguez, M. G., Peteira, B., Miranda, I., Arias, Y., & Martínez, B. (2015). Efecto de cepas de *Trichoderma asperellum* Samuels, Lieckfeldt y Nirenberg sobre el desarrollo del tomate y *Meloidogyne incognita* (Kofoid y White) Chitwood. *Revista de Protección Vegetal*, 30(2), 139-147. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rpv/v30n2/rpv08215.pdf>
- Herrera Parra, E., Cristóbal Alejo, J., Tun Suárez, J. M., Góngora Jiménez, J. A., & Lomas Barrie, C. T. (2011). Nematofauna nociva (*Meloidogyne* spp.) en cultivos hortícolas tropicales: Distribución y perspectivas de manejo en Yucatán. En M. Gamboa Angulo & R. Rojas Herrera (Eds.), *Recursos genéticos microbianos en la zona Golfo-Sureste de México* (Vol. 1, pp. 138-150). México: Subnargem-CICY-UADY-SAGARPA.
- Jepson, S. (1987). *Identification of root-knot nematodes* (*Meloidogyne* species). WI: C.A.B. International.
- Leyva Pérez, A. R., Castellanos González, L., & Pérez Fernández, A. C. (2011). Alternativas de lucha contra nemátodos noduladores en el cultivo del tomate en condiciones de organopónicos. *Centro Agrícola*, 38(3), 5-9.
- Liu, Y. J., Zhai, C. Y., Liu, Y., & Zhang, K. Q. (2009). Nematicidal activity of *Paecilomyces* spp. and isolation of a novel active compound. *The Journal of Microbiology*, 47(3), 248-252. doi: 10.1007/s12275-009-0012-2

- Mendoza, G. A. T., Wilson, J. H., & Colina, J. C. (2013). Efecto de *Trichoderma atroviride*, *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma viride* sobre huevos de *Meloidogyne* sp. en condiciones de laboratorio. *REBIOLEST. Revista Científica de Estudiantes de la Universidad Nacional de Trujillo*, 1(2), e65. Recuperado de <http://www.revistas.unitru.edu.pe/index.php/ECCBB/article/view/479/457>
- Pakeerathan, K., Mikunthan, G. I., & Tharshani, N. (2009). Effect of different animal manures on *Meloidogyne incognita* (Kofoid and White) on tomato. *World Journal of Agricultural Sciences*, 5(4), 432-435.
- Pinzón Espinoza, L. F., Candelero de la Cruz, J., Tun Suárez, J. M., Reyes Oregel, V., & Alejo, C. J. (2015). Control de *Meloidogyne incognita* en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) con la aplicación de *Trichoderma harzianum*. *Fitosanidad*, 19(1), 5-11. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209146971001>
- Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J. J., Linares, J. C., Hernández, R., Oliva, J., Gazol, A., González de Andrés, E., Montes, F., ..., de la Riva, J. (2015). Papel de los factores bióticos y las sequías en el decaimiento del bosque: Aportaciones desde la dendroecología. *ECOSISTEMAS. Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 24(2), 15-23. doi: 10.7818/ecos.2015.24-2.03
- Siddiqui, I. A., & Shaukat, S. S. (2004). *Trichoderma harzianum* enhances the production of nematocidal compounds *in vitro* and improves biocontrol of *Meloidogyne javanica* by *Pseudomonas fluorescens* in tomato. *Letters in Applied Microbiology*, 38(2), 169-175. doi:10.1111/j.1472-765X.2003.01481.x
- Soria Fregoso, M. J., Tun Suárez, J. M., Trejo Rivero, A. J., & Terán Saldívar, R. (2002). *Paquete tecnológico para la producción de chile habanero (Capsicum chinense Jacq.)*. Conkal, Yucatán, México: SEP.DGETA.ITA-2. Recuperado de https://www.cofupro.org.mx/cofupro/archivo/fondo_sectorial/Michoacan/32michoacan.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2015). Avance de siembras cosechas. Resumen Nacional por producto, Otoño-Invierno 2014 de riego y temporal [Base de datos]. Recuperado de <http://www.siap.gob.mx/index>
- Taylor, A. L., & Sasser, J. N. (1983). Biología, identificación y control de los nematodos de nódulo de la raíz (especies de *Meloidogyne*). EE. UU.: Universidad del estado de Carolina del Norte-Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Recuperado de http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAQ245.pdf
- Vera, D. F., Pérez, H., & Valencia, H. (2002). Aislamiento de hongos solubilizadores de fosfatos de la rizósfera del arazá (*Eugenia stipitata*, Myrtaceae). *Acta Biológica Colombiana*, 7(1), 33-40. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/26037>
- White, T. J., Bruns, T. D., Lee, S. B., & Taylor, J. W. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. En M. A. Innis, D. H. Gelfand, J. J. Sninsky, & T. J. White (Eds.), *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications* (pp. 315-321). San Diego, CA: Academic Press.

Detección de *Aconophora compressa* Walker (Hemiptera: Membracidae) en poblaciones de *Pinus greggii*. Nuevo reporte en la Sierra Fría, Aguascalientes, México

Detection of *Aconophora compressa* Walker (Hemiptera: Membracidae) in populations of *Pinus greggii*. New report from the Sierra Fria, Aguascalientes, Mexico

Vicente Díaz-Núñez*✉, Joaquín Sosa-Ramírez**,
Andrés Herrera-Rodríguez***, María Guadalupe Luna-Arvizu****

Díaz-Núñez, V., Sosa-Ramírez, J., Herrera-Rodríguez, A., & Luna-Arvizu, M. G. (2018). Detección de *Aconophora compressa* Walker (Hemiptera: Membracidae) en poblaciones de *Pinus greggii*. Nuevo reporte en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 13-19.

RESUMEN

La invasión de especies biológicas es uno de los disturbios con mayores efectos negativos en los ecosistemas. En el Área Natural Protegida Sierra Fría, durante el 2013 se observó un insecto chupador afectando una población de *Pinus greggii* var. *greggii*. Para localizar más sitios infestados se realizaron recorridos por cuatro localidades donde se usó esta especie para reforestaciones. El insecto fue identificado usando claves específicas para el orden Membracidae y corroborado con especialistas en taxonomía. Para analizar la posible dispersión del insecto se realizó un monitoreo durante dos años en sitios con reforestaciones donde se usó *P. greggii* var. *greggii*. El insecto se identificó como *Aconophora compressa* Walker, una especie usada para el control biológico de plantas arvenses en

Palabras clave: especies invasoras; control biológico; reforestación; *Pinus greggii*; plaga forestal.

Keywords: invasive species; biological control; reforestation; *Pinus greggii*; forest pest.

Recibido: 21 de julio de 2017, aceptado: 27 de octubre de 2017

* Invitación de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Av. Universidad 940, Ciudad Universitaria, C. P. 20131, Aguascalientes, Aguascalientes, México. Correo electrónico: vicente-diaz@hotmail.com

** Centro de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Km. 3.5 Carr. Jesús María-Ejido San Lorenzo, C. P. 20920, Jesús María, Aguascalientes, México. Correo electrónico: jsosar@correo.uaa.mx

*** Comisión Nacional Forestal. Calle María Concepción Maldonado No. 301, C. P. 20040, Fracc. La Concordia, Aguascalientes, México. Correo electrónico: andresherrera_54@yahoo.com.mx

**** Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas Aguascalientes. Av. Francisco I. Madero 718, C. P. 20259, Aguascalientes, México. Correo electrónico: mariag.luna@conanp.gob.mx

✉ Autor para correspondencia

cultivos tropicales. Durante los últimos dos años no se han observado nuevas infestaciones. Los resultados indican que antes de realizar cualquier reforestación debe realizarse una revisión exhaustiva del estado fitosanitario de las plantas que se usarán.

ABSTRACT

The introduction of biological species is a disturbance with some of the most negative effects on ecosystems. In the Sierra Fria-Natural Protected Area-, in the year 2013, the damage of a sucking insect was observed affecting a population of *Pinus greggii* var. *greggii*. To identify more infested sites, four places were surveyed where this species was used in afforestation. The insect was identified using specific taxonomic clues to the order Membracidae and corroborated with specialists. To study the possible dispersion of the insect, for two years reforested sites where *P. greggii* var. *greggii* was used were monitored. The insect was identified as *Aconophora compressa* Walker, comonly used for the biological control of arable plants in tropical crops. During the last two years new infestations have not been observed. The results indicate that before carrying out any reforestation, a comprehensive review of the phytosanitary status of the vegetation to be used should be undertaken.

INTRODUCCIÓN

La invasión de especies biológicas es una de las principales amenazas a la biodiversidad, a la conservación de los ecosistemas y a los servicios ambientales (Showalter, 1981; Von Holle & Motzkin, 2007). Las especies exóticas son las introducidas en un ecosistema fuera de su distribución natural; sin

embargo, no todas logran proliferar y su población se restringe. Las especies se tornan invasoras cuando sus características les confieren la capacidad de colonizar, establecerse y causar daños al ambiente (Pimentel, Zuniga, & Morrison, 2005). Las mismas pueden existir tanto en ecosistemas terrestres como marinos, lo que altera los ciclos biológicos y reduce su productividad (McNeely, 2000).

La introducción de insectos y patógenos representa uno de los mayores problemas por varias razones, entre ellas, su corto ciclo reproductivo y la facilidad de dispersión (Pimentel, Lach, Zuniga, & Morrison, 2000). Una de las principales vías para la introducción de insectos y patógenos no nativos causantes de plagas y enfermedades es el uso de especies forestales exóticas (Liebhold, Brokerhoff, Garrett, Parke, & Britton, 2012). En EE. UU., por ejemplo, de 455 especies de insectos y agentes causales de enfermedades forestales no nativas identificadas, 82 (65 especies de insectos y 17 de patógenos) tuvieron como principal vía de traslado la introducción de plantas vivas (Aukema et al., 2010).

Los insectos invasores, además de afectar la biodiversidad, ocasionan graves pérdidas de recursos agrícolas y forestales. En todas partes del mundo la introducción de especies, accidental o intencionalmente (la mayoría con fines de ornato y de control biológico para regular las poblaciones de otros organismos) ha generado resultados negativos (Aukema et al., 2010; Haack, Hérard, Sun, & Turgeon, 2010). Un ejemplo de esto es la introducción accidental del escarabajo descortezador *Dendroctonus valens* LeConte en China hacia la década de 1980. Esta especie en EE. UU. no constituye un factor de mortalidad en las diferentes especies de pinos donde se ha reportado (Sun, Miao, Zhang [Zhen], Zhang [Zhongning], & Gillette, 2004); no obstante, en el país asiático se considera una plaga altamente destructiva en poblaciones de *Pinus tabuliformis* Carr. -la especie más frecuentemente usada para plantaciones forestales-, ocasionando pérdidas económicas de varios millones de dólares (Yan, Sun, Don, & Zhang, 2005).

En EE. UU. los insectos y enfermedades exóticas han ocasionado serios problemas económicos y ecológicos. El defoliador *Profenusa thompsonii* (Konow), introducido de Europa a EE. UU. en la década de 1900, es responsable de la defoliación y mortalidad del arbolado en casos severos de infestación, en extensas áreas urbanas de Alaska

(United Department of Agriculture Forest Service-Alaska Region, 2010). La escama algodonosa *Adelges tsugae* (Annand) es un homóptero nativo del este de Asia, cuyos hospederos son diferentes especies de *Tsuga* (*Tsugae* spp.) y *Picea* (*Picea* spp.). En el año 2007, una evaluación reflejó que el insecto está afectando a la población de *Tsugae* en cerca de 50 % de su distribución territorial (Rentch, Fajvan, Evans, & Onken, 2008).

En México, entre las especies mejor documentadas se encuentra la palomilla del nopal (*Cactoblastis cactorum*). Este insecto fue usado como control biológico en *Opuntia* spp., en Australia y Sudáfrica, donde algunas especies de este género se consideraban invasoras; sin embargo, posiblemente los fenómenos climáticos ocasionaron su dispersión hacia el continente americano (Zimmermann, Pérez Sandy y Cyen, Gulovob, Soberón, & Sarukhán, 2000).

La Sierra Fría en Aguascalientes, México, es un macizo montañoso localizado al noroeste del estado, en 1994 esta zona fue decretada como Área Natural Protegida (Gobierno del estado de Aguascalientes, 1994), comprende una superficie de 107,000 ha y corresponde aproximadamente a 20% del área estatal. A pesar de su estatus, han ocurrido diversas introducciones de organismos, que van desde especies forestales provenientes de otros estados hasta grandes mamíferos originarios de otros países. Aunque no existe un censo de las especies exóticas presentes en la Sierra Fría, algunas observaciones sugieren que en el caso de la vegetación, al menos dos especies de coníferas (*Pinus greggii* var. *greggii* Engelm. y *Pinus ayacahuite* Ehr. var. *brachyptera* Shaw (Sin; *Pinus strobiformis*) han sido usadas como una alternativa de reforestación, la primera, por su rápido crecimiento y facilidad de adaptación (Muñoz Flores, Coria Ávalos, García Sánchez, Velasco Bautista, & Martínez Molina, 2012; Musálem & Martínez Cantero, 2003), y la segunda, por iniciativa de algunos propietarios. Durante 2016 se encontraron evidencias de una población aislada de un pino identificado posteriormente como *P. ayacahuite* (datos no publicados) en la localidad conocida como "Monte grande" (F. J. Díaz Martínez, comunicación personal); no obstante, se tienen registros de al menos tres predios (rancho La Ciénega, rancho Peña Parada y barranca de Palo Gordo) donde se usó la especie mencionada para reforestación antes de ser identificada, por lo que se le consideró como introducida.

En 2006 se encontró a *Neodiprion omosus* Smith, una especie de mosca sierra, infestando sitios reforestados con diferentes especies de pinos, la más afectada (80%) fue *Pinus devoniana* Lindl. Fue el primer reporte de este insecto para la Sierra Fría. Solamente se encontraron cuatro puntos de infestación, distribuidos en el predio "El Búfalo" y en la presa "La Araña". En revisiones posteriores no se han reportado daños en más localidades. Asimismo, algunas especies de fauna exótica se han introducido con fines cinegéticos (ie. Elk (*Cervus elaphus* L.); venado cola blanca texano (*Odocoileus virginianus texanus* Zimm.), ñu (*Connochaetes gnou* Lich.), entre otros) (Sosa-Ramírez, Solís-Cámara, Jiménez-Sierra, Íñiguez-Dávalos, & Ortega-Rubio, 2014) y aunque se desconocen con certeza los efectos que pudieran causar en la flora y fauna nativas, algunos autores (Sosa-Ramírez et al., 2014) sugieren que el paisaje puede modificarse y esto pondría en riesgo la permanencia de la diversidad biológica en el área.

P. greggii es una de las especies de coníferas que más se han usado en reforestaciones, tanto en áreas naturales como urbanas. Por ejemplo, en 2011 existían al menos dos proyectos de reforestación de 100 ha cada uno en el uso común del ejido Rincón de Romos. Por otra parte, la introducción de especies exóticas está prohibida en áreas naturales protegidas, como en el caso de la Sierra Fría, por los riesgos que implica para la diversidad nativa. Por la importancia y condición de la especie, es necesario establecer un sistema que permita detectar las posibles plagas y enfermedades que afectan a esta y otras especies y no llegue a convertirse en un riesgo potencial para la diversidad nativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Detección e identificación del agente causal de daño en una reforestación de *P. greggii* var. *greggii*

Como parte del proyecto "Diagnóstico fitosanitario en comunidades forestales del estado de Aguascalientes" se desarrollaron recorridos en los diferentes ecosistemas del estado. En abril de 2013 se realizaron visitas de diagnóstico en la Sierra Fría en comunidades naturales dominadas por poblaciones de *Pinus teocote* Schltdl. & Cham., *P. leiophylla* Schltdl. & Cham., *P. durangensis* Ehren., *Quercus potosina* Trel., *Q. eduardii* Trel., *Q. sideroxylla* Humb. & Bompl. y asociaciones de ellas. En una visita realizada al predio forestal "Peña Parada", ubicado en las coordenadas UTM 747392 este y 2451219

norte, con una altitud promedio de 2535 m.s.n.m., se revisó un área reforestada con plantas de *P. greggii* var. *greggii* de dos años de edad (D. Domínguez, comunicación personal), se observaron signos de defoliación y mortalidad de la parte aérea del arbolado. Una revisión de cada espécimen mostró exudaciones sobre el fuste, posiblemente producto de la aparición de insectos con aparato bucal chupador. En el mismo predio se revisaron cinco sitios reforestados con la misma especie de conífera. En el primero, 80% de los árboles mostraron signos y síntomas de daño por insectos y en 60% de los casos se encontraron insectos en fase de ninfa, adultos e inmaduros (figura 1). En el segundo sitio se encontró daño por infestación en 30 % de los árboles, en el tercer sitio 40%, en el cuarto sitio 20% y 30% en el quinto sitio.

Con la finalidad de encontrar una posible distribución del organismo causante del daño en



Figura 1. Esquema de daño por *A. compressa* Walker en plantaciones de *P. greggii* var. *greggii* en algunos sitios de la Sierra Fría. (a) espécimen sano de *P. greggii*, nótese el follaje en color verde brillante; (b) colonia de individuos adultos de *A. compressa* (ver círculo en color azul y el follaje amarillento, producido posiblemente por la extracción de savia) sobre el tallo de *P. greggii*; (c) una colonia de ninfas de *A. compressa* sobre el tallo de *P. greggii*, no se aprecian adultos; (d) ejemplares de *A. compressa* sobre el tallo de *P. greggii*, se observan algunas ninfas del mismo género.

Imagen cortesía de Vicente Díaz-Núñez.

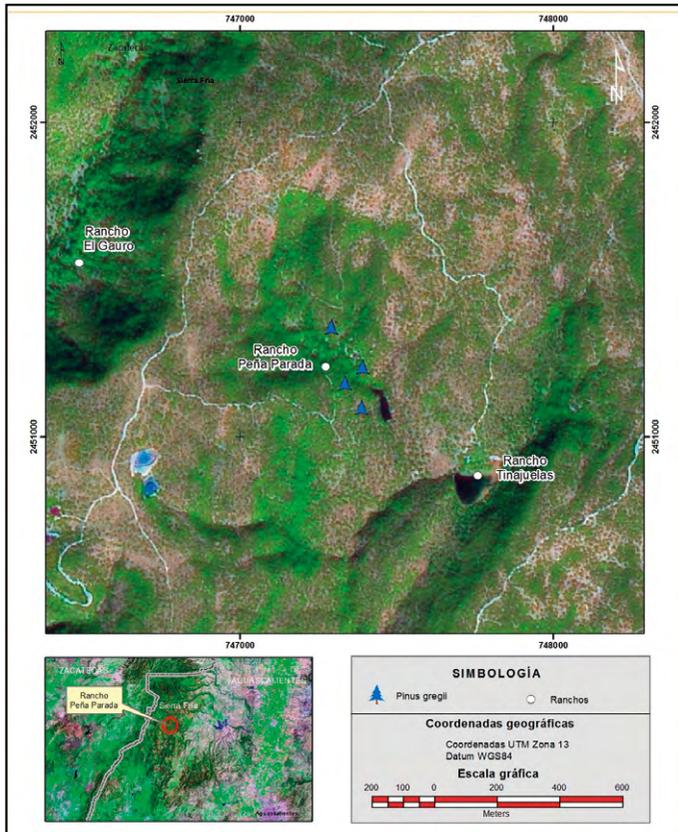


Figura 2. Sitios de reforestación donde se detectó la presencia de *A. compressa*, afectando poblaciones de *P. greggii* en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. Imagen cortesía de Vicente Díaz-Núñez.

P. greggii se realizaron recorridos de observación y análisis de los sitios con reforestación en cinco predios de la Sierra Fría: (a) Barranca Piletas, (b) Barranca de Juan Francisco, (c) Predio el Búfalo, y Rancho San Francisco (figura 2).

En ninguno de los sitios de trabajo se identificaron signos y síntomas de daños por el organismo detectado en el primer sitio. Para la identificación se realizaron colectas de ninfas y adultos, mismas que fueron colocadas en frascos con alcohol a 70% para su almacenamiento y posterior identificación. La identificación se llevó a cabo con base en literatura especializada (Day, 1999; Wallace & Deitz, 2004); sin embargo, se contó con la colaboración de Stuart McKamey, adscrito al Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (McKamey, 2007).

Monitoreo de reforestaciones con *P. greggii*

Durante los años 2014, 2015, y 2016 se realizaron dos visitas anuales, al inicio de la temporada de

lluvias, en el mes de junio, y durante la temporada de temperaturas más altas, correspondiente al mes de mayo (CONAGUA, 2017) en el predio donde originalmente se localizó el insecto, así como en el área de bienes comunales del ejido Rincón de Romos, donde en 2011 se realizó una reforestación con *P. greggii* en una superficie de 100 ha. En esta última se establecieron 10 sitios de muestreo de 500 m² representativos de la parcela y distribuidos aleatoriamente.

RESULTADOS

De acuerdo con la estructura de varias muestras de adultos y ninfas tomadas en campo y corroboradas en laboratorio mediante el uso de un estereoscopio, los insectos analizados corresponden al género *Aconophora* (Hemiptera: Membracidae), específicamente a *Aconophora compressa* Dietrich, una especie de insecto chupador comúnmente conocido como periquito de la lantana, relacionado como agente de control biológico de *Lantana camara* L. (lantana) (Verbenacea), una especie arbustiva considerada como nociva para las actividades ganaderas por su capacidad invasora en condiciones naturales. Se muestran figuras ilustrativas de *A. compressa* (figura 3).

En el monitoreo realizado no se encontraron evidencias de infestación; sin embargo, en 2015 se encontró un solo ejemplar adulto de *A. compressa* en la localidad ejidal de Rincón de Romos. En el muestreo de 2016 no existió infestación en ninguna de las localidades analizadas.



Figura 3. Ejemplares de *A. compressa*. a) Adulto de *A. compressa* posado sobre una ramilla de *P. greggii* en la Sierra Fría. b) Acercamiento de un ejemplar adulto de *A. compressa*. Imágenes cortesía de Vicente Díaz-Núñez.

DISCUSIÓN

En muchos de los estudios de caso que se han analizado, tanto en México como en el extranjero, la introducción de especies exóticas con diferentes fines (ornato, restauración, control biológico) han sido más perjudiciales que benéficas (Pimentel et al., 2005) y se ha recurrido a prácticas de manejo alternativas para reducir el daño que ocasionan a la diversidad nativa (Dahlsten et al., 2005; Haack et al., 2010).

En el caso de las áreas naturales protegidas, la normatividad existente indica que no debe permitirse el ingreso de especies ajenas al sitio, pues existe el riesgo de que se introduzcan y proliferen organismos asociados (Ortiz-Monasterio, 2014), que bajo las condiciones propias de la especie introducida sus efectos sean mínimos, pero que en otras condiciones ambientales su población se torne dañina (Simberloff & Von Holle, 1999). Por otra parte, debe evitarse el uso de especies exóticas de flora y fauna y darse prioridad a las especies nativas, tanto en las iniciativas de los propietarios (en este caso, reforestaciones y plantaciones con fines comerciales) como en los programas gubernamentales establecidos por los diferentes niveles de gobierno.

Existen algunos casos documentados sobre el daño causado por los insectos del género *Aconophora* en comunidades y poblaciones para el control de plantas arvenses (Palmer, Wilson, & Pullen, 1996; The State of Queensland DEEDI, 2010). En EE. UU., desde 1995 se ha estado evaluando el uso de *A. compressa* para el control de varias especies de plantas exóticas e invasoras; sin embargo, aún no se ha analizado si esto pudiera traer efectos adversos (Manners, Walter, Palmer, Dhileepan, & Hastwell, 2006). En México, la misma especie fue introducida en el estado de Morelos como un método de control biológico de las poblaciones de *L. camara* L. (Verbenaceae), una especie de planta silvestre considerada como invasora para los pastizales (Palmer et al., 1996); sin embargo, se han encontrado registros de especímenes ovipositando sobre *Juniperus* spp. y *Jacaranda* spp., aunque no representan daños potenciales para estas especies (Palmer et al., 1996).

La especie de *Aconophora* detectada en la Sierra Fría, Aguascalientes, representa el primer caso reportado en una especie forestal, tampoco se



Figura 4. Cañada de piletas, Sierra Fría, Aguascalientes. Paisaje dominado por *P. leiophylla*, *P. teocote* y *Q. sideroxylla*. Imagen cortesía de Vicente Díaz-Núñez y Joaquín Sosa-Ramírez.

tienen reportes de su presencia en plantas arvenses de bosque templado y bosque tropical seco en la entidad. En el caso de los reportes de la aparición de mosca sierra (2006) y de *A. compressa* (2013), es probable que en los hospederos *P. devoniana* y *P. greggii* var. *greggii*, respectivamente, la infestación se haya debido a la introducción de especímenes infestados donados por la Comisión Nacional Forestal local, pero producidos en otro estado de la república, por lo que la primera acción que debe realizarse es una rigurosa inspección para verificar que las plantas usadas con fines de reforestación y restauración estén sanas.

A pesar del estatus de área natural protegida que presenta la Sierra Fría (figura 4), por su rápido crecimiento, en años pasados se usó la especie *P. greggii* en algunas localidades para reforestar áreas afectadas principalmente por el daño de escarabajos descortezadores del género *Dendroctonus*, como una iniciativa de los propietarios del área, no como parte de los programas auspiciados por los gobiernos federal y estatal (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional Forestal, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente del Estado, entre otras), aunque en los recorridos realizados no se ha encontrado regenerado natural de esta especie, probablemente esto indique que no se ha reproducido y que, muy probablemente, desaparecerá del ecosistema de manera natural. En los predios recorridos, solamente se ha encontrado al

membrácido afectando poblaciones de *P. greggii*; sin embargo, no se descarta la posibilidad de que el insecto pueda dispersarse hacia otras comunidades de coníferas, específicamente en regenerados, reforestaciones y plantaciones comerciales, por lo que es importante que investigadores, especialistas en sanidad forestal y sobre todo los propietarios y responsables del manejo de cada uno de los predios realicen monitoreo para detectar áreas con posible daño.

CONCLUSIONES

El insecto chupador identificado corresponde a *A. compressa*, su hospedero principal son las plantas arvenses y es el primer registro en la zona afectando a una especie forestal. En la Sierra Fría, su hospedero es *P. greggii* var. *greggii*, una especie de conífera exótica que se ha usado en programas de reforestación,

aunque no tiene una distribución amplia en el paisaje forestal. Es importante continuar con el monitoreo para detectar probables infestaciones y su dispersión hacia otras comunidades de pinos.

Agradecimientos

Los autores reconocen el apoyo brindado por la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Aguascalientes, así como por la Comisión Nacional Forestal. Se agradece a Francisco Javier Díaz Martínez, Luis Alberto Hernández Gaytán y Marcos Ruiz Esteban por su participación en el trabajo de campo. Se agradece el financiamiento otorgado por la Comisión de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Congreso de la Unión (COMARNAT) a través del proyecto original "Manejo Fitosanitario y Recuperación de Zonas en Ecosistemas Perturbados, en la Sierra Fría, Aguascalientes, México".

REFERENCIAS

- Aukema, J. E., McCullough, D. G., Von Holle, B., Liebhold, A. M., Britton, K., & Frankel, S. J. (2010). Historical accumulation of nonindigenous forest pests in the Continental United States. *Bioscience*, 60(11), 886-897. doi: 10.1525/bio.2010.60.11.5
- Comisión Nacional del Agua. (2017). Información climatológica del estado de Aguascalientes. 4 de Julio de 2017 [Portal electrónico]. Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales5110/NORMAL01103.TXT>.
- Dahlsten, D. L., Daane, K. M., Paine, T. D., Sime, K. R., Lawson, A. B., Rowney, D. L., ..., Taylor, G. (2005). Imported parasitic wasp helps control red gum lerp psyllid. *California Agriculture*, 59(4), 229-234.
- Day, M. F. (1999). The genera of Australian Membracidae (Hemiptera: Auchenorrhyncha). *Invertebrate Taxonomy* 13(4), 629-747.
- Gobierno del estado de Aguascalientes. (1994). *Periódico oficial del estado de Aguascalientes*, Tomo LVII, no. 5.
- Haack, R. A., Hérard, F., Sun, J., & Turgeon, J. J. (2010). Managing invasive populations of Asian longhorned beetle and citrus longhorned beetle: A worldwide perspective. *Annual Review of Entomology*, 55, 521-546.
- Liebhold, A. M., Brockerhoff, E. G., Garrett, L. J., Parke, J. L., & Britton, K. O. (2012). Live plant imports: The major pathway for forest insect and pathogen invasions of the US. *Frontiers in Ecology and the Environment* 10(3), 135-143.
- Manners, A. G., Walter, G. H., Palmer, W. A., Dhileepan, K., & Hastwell, G. T. (2006). Retrospective host testing of *Aconophora compressa*: Reproduction and survival on the target weed, *Lantana camara*, and non-target species. En C. Preston, J. H. Watts, & N. D. Crossman (Eds.), *Managing weeds in a changing climate: Proceedings of the Fifteenth Australian Weed Conference* (pp. 595-598). South Australia: Weed Management Society of South Australia.
- McKamey, S. H. (2007). Taxonomic catalogue of the leafhoppers (membracoidea). Part 1. Cicadellinae. *Memoirs of the American Entomological Society*, 78, 1-394.
- McNeely, J. A. (2000). The future of alien-invasive species: Changing social views. En H. A. Mooney & R. J. Hoobs (Eds.), *Invasive species in a changing world* (350 pp.). Washington, DC: Island Press.
- Muñoz Flores, H. J., Coria Ávalos, V. M., García Sánchez, J. J., Velasco Bautista, E., & Martínez Molina, G. (2012). Evaluación de una plantación de *Pinus greggii* (Engelm.) con dos espaciamentos. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(11), 57-70.
- Musálem, M. A., & Martínez Cantera, G. (2003). *Monografía de Pinus greggii Engelm.* Libro técnico no. 9 (341 pp.). El Horno, Chapingo, Estado de México, México: INIFAP-SAGARPA-CONACYT-CONABIO.
- Ortiz-Monasterio, A. (2014). Gestión de las especies exóticas invasoras: Análisis de la legislación mexicana. En R. Mendoza y

- P. Koleff (Coords.), *Especies acuáticas invasoras en México* (pp. 169-184). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Palmer, W. A., Wilson, B. W., & Pullen, K. R. (1996). The host range of *Aconophora compressa* Walker (Homoptera: Membracidae): A potential biological control agent for *Lantana camara* L. (Verbenaceae). *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, 98, 617-624.
 - Pimentel, D., Lach, L., Zuniga, R., & Morrison, D. (2000). Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioSciences*, 50(1), 53-65.
 - Pimentel, D., Zuniga, R., & Morrison, D. (2005). Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*, 52(3), 273-288.
 - Rentch, J., Fajvan, M. A., Evans, R. A., & Onken, B. (2008). Using dendrochronology to model hemlock woolly adelgid effects on eastern hemlock growth and vulnerability. *Biological Invasions* 11, 551-563. doi: 10.1007/s10530-008-9270-x
 - Showalter, T. D. (1981). Insect herbivore relationship to the state of the host plant: Biotic regulation of ecosystem nutrient cycling through ecological succession. *Oikos*, 37(1), 126-130.
 - Simberloff, D., & Von Holle, B. (1999). Positive interactions of nonindigenous species: Invasional meltdown. *Biological Invasions* 1(1), 21-32.
 - Sosa-Ramírez, J., Solís-Cámara, A. B., Jiménez-Sierra, C. L., Íñiguez-Dávalos, L. I., & Ortega-Rubio, A. (2014). Manejo del Área Natural Protegida Sierra Fría, Aguascalientes: Situación actual y desafíos. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 22(60), 71-77.
 - Sun, J., Miao, Z., Zhang, Z. [Zhen], Zhang, Z. [Zhongning], & Gillette, N. E. (2004). Red turpentine beetle, *Dendroctonus valens* Le Conte (Coleoptera: Scolytidae) response to host semiochemicals in China. *Environmental Entomology*, 33, 206-212.
 - The State of Queensland, Department of Employment, Economic Development and Innovation. (2010). *Aconophora on fiddlewood trees*. *Aconophora compressa* [Hoja informativa]. Recuperada de <http://www.arboroperations.com.au/wp-content/uploads/2014/08/aconophora-on-fiddlewood-trees-deedi-factsheet.pdf>
 - United States Department of Agriculture-Forest Service (Alaska Region). (2010). *Invasive exotic insect species: Amber marked birch leaf miner* [Reporte breve]. Recuperado de http://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5299799.pdf
 - Von Holle B., & Motzkin, G. (2007). Historical land use and environmental determinants of nonnative plant distribution in coastal southern New England. *Biological Conservation*, 136(1), 33-43.
 - Wallace, M. S., & Deitz, L. L. (2004). Phylogeny and systematics of the treehopper subfamily Centrotinae (Hemiptera: Membracidae). En *Memoirs on Entomology, International* (Vol. 19, 377 pp.). FL: Associated Publishers.
 - Yan, Z., Sun, J., Don, O., & Zhang, Z. (2005). The red turpentine beetle, *Dendroctonus valens* Le Conte (Scolytidae): An exotic invasive pest of pine in China. *Biodiversity & Conservation*, 14(7), 1735-1760.
 - Zimmermann, H. G., Pérez Sandy y Cyen, M., Gulovob, J., Soberón, J., & Sarukhán, J. (2000). *Cactoblastis cactorum*, una nueva plaga de muy alto riesgo para las opuntias de México. *CONABIO Biodiversitas*, 6(33), 1-14.

Tardígrados asociados a una plantación de cítricos de traspatio en la comunidad de El Palmar en Quintana Roo, México

Tardigrades associated with a backyard citrus plantation in El Palmar community in Quintana Roo, Mexico

Abril Anguas-Escalante*✉, Wilbert Andrés Pérez-Pech**, Roberto Guidetti***, Leopoldo Querubín Cutz-Pool**, Héctor Ortiz-León**

Anguas-Escalante, A., Pérez-Pech, W. A., Guidetti, R., Cutz-Pool, L. Q., & Ortiz-León, H. (2018). Tardígrados asociados a una plantación de cítricos de traspatio en la comunidad de El Palmar en Quintana Roo, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 20-26.

RESUMEN

El presente estudio provee el registro de tardígrados de líquenes en una plantación de cítricos de traspatio de la comunidad de El Palmar en el estado de Quintana Roo, México. Se proporciona la diagnosis de los géneros *Ramazzottius*, *Mesobiotus* y *Milnesium*. Se discute sobre la riqueza y abundancias de tardígrados en el estado. Se proporciona un cuadro comparativo de los caracteres más relevantes de los tres géneros.

ABSTRACT

This study provides records of tardigrades in lichen in a backyard plantation of citrics of a rural community in Quintana Roo, Mexico. A diagnosis is given of *Ramazzottius*, *Mesobiotus* and *Milnesium* genera are given. The richness of species and abundance of tardigrades in Quintana Roo are discussed. A comparative table of the most relevant characteristics of the three genera is proposed.

Palabras clave: Tardigrada; liquen; agroecosistema.

Keywords: Tardigrada; lichen; agroecosystem.

Recibido: 21 de marzo de 2017, aceptado: 30 de octubre de 2017

* El Colegio de la Frontera Sur. Laboratorio de Pesquerías B13, Ave. Centenario km 5.5, C. P. 77014, Chetumal, Quintana Roo, México. Correo electrónico: abrilanguas@hotmail.com

** Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Instituto Tecnológico de Chetumal, Tecnológico Nacional de México. Av. Insurgentes No. 330, C. P. 77013, Chetumal, Quintana Roo, México. Correo electrónico: pilon_45@hotmail.com; cutzpool@yahoo.com; oilh@yahoo.com.mx

*** Department of Life Sciences, University of Modena and Reggio Emilia. Via Campi 213/D, 41125, Modena, Italy. Correo electrónico: roberto.guidetti@unimore.it

✉ Autor para correspondencia

INTRODUCCIÓN

Los tardígrados son micrometazoarios hidrófilos con simetría bilateral, generalmente presentan tallas de 50 a 1500 μm , sin embargo, se ha documentado que *Milnesium eurytomum* Maucci, 1988, puede llegar a medir más de los 2 mm de longitud (Guil, 2008; Kaczmarek, Bartels, Roszkowska, & Nelson, 2015; Marley, McInnes, & Sands, 2011). El cuerpo de estos animales se divide en cinco pseudosegmentos, el primero corresponde a la cabeza. Los cuatro restantes conforman el cuerpo, donde cada cual contiene un par de patas (Marley et al., 2011; Ramazzotti & Maucci, 1983). En la mayoría de los eutardígrados, así como algunos heterotardígrados (limnoterrestres) pueden existir garras insertadas directamente a cada pata (Pilato & Binda, 2010); mientras que en los Arthrotardigrada (tardígrados marinos) existen individuos que presentan dígitos en sus patas, sobre los cuales se originan garras o discos adhesivos (Fontoura, Bartels, Jørgensen, Kristensen, & Hansen, 2017).

Los tardígrados son considerados verdaderos cosmopolitas, pues se encuentran distribuidos prácticamente en todo el planeta, en ambientes terrestres y acuáticos (Glime, 2013). En su entorno son depredadores de nemátodos (Sánchez-Moreno, Ferris, & Guil, 2008) y también pueden ser depredados por colémbolos (Palacios-Vargas & Vidal-Acosta, 1994). En los últimos 25 años se ha observado un incremento en la descripción de nuevas especies de tardígrados (Degma, Bertolani, & Guidetti, 2014). Sin embargo, su conocimiento sigue considerándose incipiente (Guil & Cabrero-

Sañudo, 2007). Lo anterior pudo ser constatado por Bartels, Apodaca, Mora, y Nelson (2016) al estimar la diversidad global de tardígrados. En dicho trabajo se determinó que el phylum Tardigrada además de ser pobre en especies, también es un grupo muy poco estudiado.

En México, el estudio sobre los tardígrados se remonta desde 1911 y la mayoría de los registros, al igual que los trabajos de investigación desarrollados en el país han sido esporádicos y muchas de las veces no son publicados (Hoffman & Jiménez, 1994; Kaczmarek, Michalczyk, & McInnes, 2014). Hasta ahora se han registrado 16 géneros y 43 especies de tardígrados en 11 estados del país (Beasley, 1972; Beasley, Kaczmarek, & Michalczyk, 2008; Claps & Rossi, 2002; Heinis, 1911; Kaczmarek, Diduszko, & Michaelczyk, 2011; Kaczmarek et al., 2014; May, 1948; Moreno-Talamantes, Roszkowska, Guayasamín, Flores Maldonado, & Kaczmarek, 2015; Pilato & Lisi, 2006; Schuster, 1971). En Quintana Roo, los esfuerzos por conocer la riqueza genérica de tardígrados son recientes. El primer estudio fue realizado en 2016, donde Pérez-Pech, Cutz-Pool, Guidetti, y Blanco-Piñón (2016) proporcionan los primeros registros genéricos de estos organismos en un área urbana en la ciudad de Chetumal.

El estudio en áreas rurales, así como en sus ecosistemas modificados, tales como áreas de cultivo es importante, ya que permite conocer la riqueza faunística asociada a estos ambientes (Stupino, Iermanó, Gargoloff, & Bonicatto, 2014). Actualmente, el conocimiento de tardígrados en comunidades rurales es aún escaso. Sin embargo, los que se han realizado han demostrado que estos ambientes pueden albergar una alta diversidad de tardígrados (Johansson, Calloway, Miller, & Linder, 2011; Meininger, Uetz, & Snider, 1985; Meyer, Hinton, & Samletzka, 2013; Séméria, 1981). El hecho de que la humedad en estos lugares no disminuye drásticamente permite el establecimiento del líquen y el musgo, microecosistemas que amortiguan la pérdida de humedad permitiendo la presencia de estos organismos (Glime, 2013). También se ha comprobado el valor como indicador de calidad ambiental de algunas especies de tardígrados al evaluar la diversidad de los mismos en ambientes urbanos y rurales en Argentina (González-Reyes et al., 2016).

El presente estudio tiene como objetivo obtener la riqueza genérica de tardígrados asociada a muestras de líquen colectadas en arboles de una

plantación de cítricos de traspatio, en la comunidad rural El Palmar en el municipio de Othón Pompeyo Blanco en el estado de Quintana Roo, México (figura 1). Con ello se busca contribuir al conocimiento de tardígrados en áreas rurales, así como generar nuevos registros genéricos para el estado de Quintana Roo.



Figura 1. (A) Plantación de traspatio en la comunidad de palmar donde se realizó el estudio. (B) Ambiente muestreado. (C) Especimen observado. Elaboración propia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en una plantación de cítricos en un traspatio ubicado en la comunidad "El Palmar" ($18^{\circ} 26' 48'' N$, $88^{\circ} 31' 47'' W$, 10 m de altitud) en el Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo. La toma de muestras consistió en la colecta de líquen en 11 árboles realizado el 3 de septiembre de 2016. El líquen se obtuvo desprendiéndolo con una navaja desde la corteza del árbol. Las muestras fueron tomadas a 1 m de altura del suelo, se realizó el desprendimiento de 10 cm^2 de líquen por árbol. El resguardo de las muestras fue en sobres de papel encerado, donde se anotaron los datos de colecta: nombre del colector, fecha, lugar y número de árbol. Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Zoología en el Instituto Tecnológico de Chetumal, los organismos colectados fueron montados e identificados en el laboratorio de pesquerías en El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) unidad Chetumal. Para analizar las muestras, fueron

colocadas en cajas de Petri e hidratadas con agua potable durante 1 h. Una vez sometido a una humedad adecuada, el líquen fue revisado utilizando un microscopio Stemi DV4 Carl Zeiss® de disección con el fin de separar y contabilizar a los tardígrados encontrados. Para realizar la identificación de los géneros se realizaron preparaciones permanentes empleando el líquido de Hoyer como medio de montaje. Para la identificación taxonómica se realizaron observaciones y toma de fotografías digitales a través del microscopio óptico VELAB B-1T®. Se emplearon claves de identificación especializada (Nelson, Guidetti, & Rebecchi, 2010; Pilato & Binda, 2010; Ramazzotti & Maucci, 1983). De igual manera, se estructuró un cuadro comparativo con las características diferenciales de los géneros identificados. Los caracteres tomados en cuenta fueron la configuración de las garras y el aparato bucal faríngeo (tabla 2). Los organismos colectados e identificados se depositaron en el Laboratorio de Zoología en el Instituto Tecnológico de Chetumal.

RESULTADOS

Se obtuvieron un total de 717 individuos pertenecientes a tres familias y tres géneros de la clase Eutardigrada. Los 11 árboles muestreados tuvieron presencia de tardígrados, el promedio de tardígrados recolectados por muestra fue de 65 con una desviación estándar de 215. La abundancia máxima fue de 250 individuos en el árbol 10 y la mínima de 18 individuos en el árbol 5 (tabla 1). Los tres géneros registrados son nuevos para el estado. El género *Ramazzottius* fue el mejor representado en cuanto a su

abundancia, con 592 organismos, es decir, 83% del total de los ejemplares colectados (figura 2, tabla 1). Este género también fue registrado en todas las muestras de líquenes embebidos en los árboles de los cítricos muestreados. Se obtuvo un cuadro comparativo con los caracteres diferenciales de los géneros identificados en el presente estudio (tabla 2).

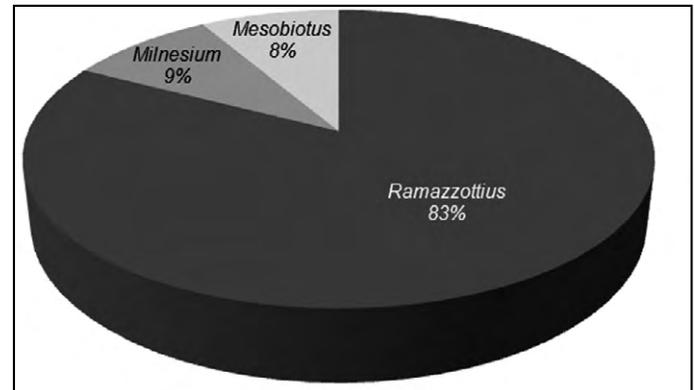


Figura 2. Distribución de la abundancia relativa de tardígrados asociados a los líquenes de cítricos de un traspatio en la comunidad de El Palmar, Quintana Roo. Elaboración propia.

Diagnóstico de géneros

Género: *Milnesium* (Milnesiidae) Doyère 1840 (figura 3A). Tardígrados con un par de papilas cefálicas y seis papilas peribucales. Garras del tipo *Milnesiidae* (la ramificación primaria y secundaria completamente separadas) (figura 3C). Aparato bucal-faríngeo del modelo *Milnesium* (figura 3B), con un amplio tubo bucal en las especies conocidas. Bulbo faríngeo elongado sin apófisis y placoides ausentes. Largas láminas peribucales.

Tabla 1
Clase, Familias, Géneros y abundancias de tardígrados colectados por árbol en el área de estudio

Clase/Familia/Género	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11
<i>Eutardigrada</i>											
<i>Ramazzottiidae</i>											
<i>Ramazzottius</i>	54	34	42	1	15	31	38	25	20	219	113
<i>Milnesiidae</i>											
<i>Milnesium</i>	7	4				2	3	4	1	31	12
<i>Macrobotidae</i>											
<i>Mesobiotus</i>	2		18	35	3	1	1	1			

Nota: A1-11, árboles donde los tardígrados fueron colectados. Elaboración propia.

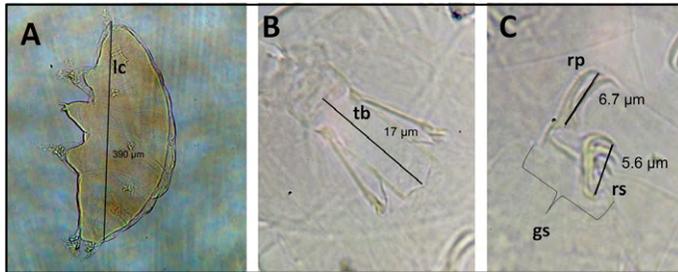


Figura 3. (A) Cuerpo de *Milnesium*; (B) Aparato bucal-faríngeo *Milnesium*; (C) Garras tipo *Milnesiidae*-gs garras separadas, lc: longitud corporal, tb: tubo bucal rp: ramificación primaria, rs: ramificación secundaria. Fotografías tomadas por el equipo de estudio.

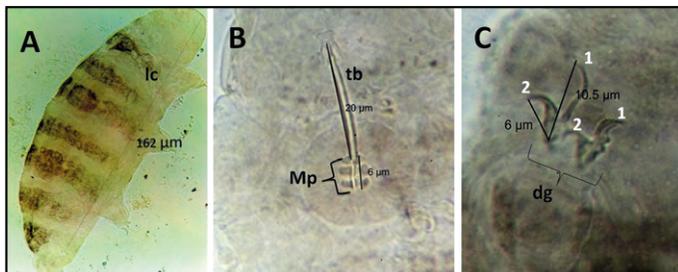


Figura 4. (A) Cuerpo de *Ramazzottius*; (B) aparato bucal del tipo *Hypsibius*, variante *Ramazzottius*; (C) garras del tipo *Ramazzottius*-2, 1, 2, 1 configuración asimétrica de las diplogarras, dg: diplogarras, tb: tubo bucal, Mp: macroplacoides, lc: longitud corporal. Fotografías tomadas por el equipo de estudio.

Género: *Ramazzottius* Binda y Pilato, 1986 (figura 4A). Tardígrados con un par de órganos elípticos presentes en la cabeza. Diplogarras (garras unidas) del tipo *Ramazzottius* con configuración asimétrica 2, 1, 2, 1 ramificaciones: secundaria, primaria, secundaria, primaria (figura 4C). Diplogarras externas con una sección basal más larga que la ramificación secundaria, ramificación primaria muy larga y delgada conectada con un tracto basal delgado y flexible. Diplogarras internas más cortas y robustas unificadas en un único elemento rígido. Aparato bucal-faríngeo

de tipo *Hypsibius*, variante *Ramazzottius* (figura 4B). Apófisis faríngea y dos placoides presentes. Estilete furcado de la forma tradicional. Lúnulas de garras reducidas y muy pequeñas presentes o ausentes. Huevos puestos libremente, se caracterizan por presentar procesos en su pared.

Género: *Mesobiotus* (Macrobotidae) Vecchi, Cesari, Bertolani, Jönsson, Rebecchi & Guidetti, 2016 (figura 5A). Macrobiotoides con diplogarras de tipo-“Y” con arreglo simétrico (ramificaciones: secundaria, primaria, primaria, secundaria) del modelo *Mesobiotus* (figura 5C), con un tracto común caracterizado por un septo interno que define una parte distal. Cutícula sin poros. Aparato bucal-faríngeo con un anillo bucal que contiene 10 láminas peribucal. Tubo bucal rígido, tres macroplacoides redondeados dispuestos a lo largo de una línea curva y un microplacode. La distancia entre el microplacode y el tercer macroplacode es reducida (el espacio entre estas es menor que la longitud del microplacode) (figura 5B). Huevos puestos libremente, caracterizado por procesos cónicos o hemisféricos, generalmente con puntas.

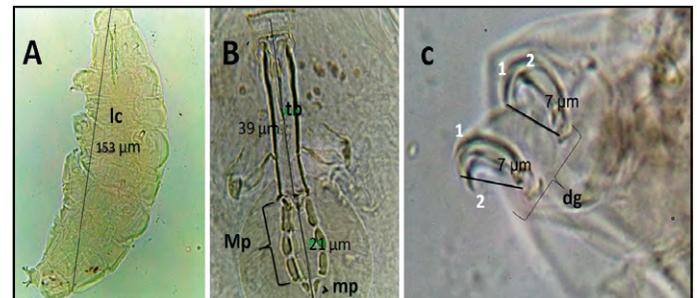


Figura 5. (A) Cuerpo de *Mesobiotus*; (B) aparato bucal-faríngeo de tipo *Mesobiotus*; (C) diplogarras-2, 1, 1, 2 configuración simétrica de las diplogarras, dg: diplogarras, tb: tubo bucal, Mp: macroplacoides, mp: microplacoides. Fotografías tomadas por el equipo de estudio.

Tabla 2
Diferencias de caracteres de *Ramazzottius*, *Milnesium* y *Mesobiotus*

Género	Garras	Placoides	Configuración de garras	Configuración de placoides
<i>Ramazzottius</i>	Unidas (figura 4C)	Presentes	Asimétrica (1, 2, 1, 2) (figura 4C)	2 macroplacoides (figura 4B)
<i>Milnesium</i>	Separadas (figura 3C)	Ausentes (figura 3B)	-	-
<i>Mesobiotus</i>	Unidas (figura 5C)	Presentes	Simétrica (2, 1, 1, 2) (figura 5C)	3 macroplacoides 1 microplacode (figura 5C)

Nota: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

La biodiversidad constituye la base de la vida y de la sustentabilidad de los agroecosistemas, por lo cual las áreas de cultivo proveen de nichos para diferentes organismos (Stupino et al., 2014). El ser humano al emplear las áreas agrícolas para obtener recursos y cubrir sus necesidades básicas genera ambientes modificados en los cuales algunos grupos faunísticos son reemplazados y muchos otros logran adaptarse, tal es el caso de los tardígrados y una variedad de microartrópodos (Pérez-Pech & Cutz-Pool, 2015). En Quintana Roo se han reportado ácaros, colémbolos, y una variedad de artrópodos como excelentes colonizadores de ambientes modificados (Cutz-Pool, Alcocer-May, Ortiz-León, Castro-Pérez, & López-Chan, 2015; Cutz-Pool, Escalante-Poot, & Ortiz-León, 2016; Pérez-Pech, Cutz-Pool, & Martín-Cerón, 2014), entre estos las áreas agrícolas (Pérez-Pech & Cutz-Pool, 2015). El presente estudio aporta al conocimiento de la fauna agroecosistémica de la entidad con la inclusión de los tardígrados a la lista de organismos presentes en los cultivos.

El líquen, musgo, y la hojarasca, son los ecosistemas preferidos en ambientes naturales por los géneros registrados (Kaczmarek et al., 2014). En ambientes modificados (urbanos y rurales) los tardígrados generalmente optan por habitar líquen y musgo, lo que relaciona su diversidad con la salud ambiental de estos sitios (Glime, 2013; González-Reyes et al., 2016); por lo que algunas especies han sido catalogadas como indicadoras de calidad ambiental (*Macrobotus hufelandi*, Schultze, 1834), o detectoras de ambientes urbanos, es el caso de *Milnesium* (González-Reyes et al., 2016). En el presente trabajo los tardígrados se encontraron asociados a líquen en árboles de cítricos en una plantación de traspatio en la comunidad de El Palmar. *Milnesium* fue registrado durante el estudio. Sin embargo, sus abundancias fueron relativamente bajas respecto a *Ramazzottius*, un género que en estudios anteriores ha mostrado altas abundancias en este mismo ambiente, frente a otras especies de tardígrados y otros micrometazoarios (Šatkauskienė, 2012).

Los géneros reportados en el presente trabajo, junto a los documentados por Pérez-Pech et al. (2016),

suman un total de seis géneros para Quintana Roo, procedentes de distintos biotopos. La particularidad de los estudios sobre tardígrados en el estado de Quintana Roo radica en que han explorado la diversidad genérica en ambientes modificados (urbanos y rurales), los cuales han sido poco estudiados en el mundo (Meyer et al., 2013). Los trabajos realizados han demostrado que estos ambientes albergan una variedad de microecosistemas que favorecen la supervivencia de los tardígrados, por lo que pueden presentar una notable riqueza genérica y específica (Johansson et al., 2011; Meininger et al., 1985; Meyer et al., 2013). Es destacable que aun cuando el esfuerzo de muestreo entre este trabajo y el realizado por Pérez-Pech et al. (2016) no fue el mismo, la riqueza genérica documentada en el presente estudio es similar a la reportada en sitios urbanos de la ciudad de Chetumal, así como que algunos géneros estuvieron mejor representados que otros. *Doryphoribius* fue el mejor representado en el área urbana de Chetumal con 94% de abundancias con respecto a *Macrobotus* y *Echiniscus*, quienes representaron 6%, respectivamente. En el presente estudio, el género *Ramazzottius* representó 83% del total de las abundancias, mientras que *Milnesium* y *Mesobotus* 17% (tabla 1, figura 2).

Cabe señalar que el número de muestras estudiadas por Pérez-Pech et al. (2016) fueron mucho más que en el presente trabajo, por lo que es necesario dirigir estudios con diseños de muestreo estandarizados para determinar estadísticamente las diferencias de la riqueza, abundancia y diversidad entre ambientes urbanos y rurales, lo que incluye distintos biotopos potenciales capaces de ser ocupados por los tardígrados (Meyer et al., 2013).

CONCLUSIONES

Se contribuye notablemente en el conocimiento de la fauna de tardígrados en el estado de Quintana Roo, se proporcionan tres nuevos registros genéricos. Se hace patente la necesidad de mayores esfuerzos para conocer las diferencias en diversidad de tardígrados entre áreas urbanas y rurales para ser considerados como buenos indicadores en la salud ambiental.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la línea de investigación Biodiversidad en ecosistemas terrestres (Ecología de Artrópodos) del Instituto Tecnológico de Chetumal, a la estudiante de biología Juana Itzel Crisanto Rodríguez por el apoyo brindado para realizar la colecta de campo, al programa Preparación al Posgrado y Asistentes de Investigador

2016 del Colegio de la Frontera Sur, del cual fue becario el primer autor durante la realización del proyecto, al Dr. Alberto de Jesús Navarrete por las facilidades otorgadas para utilizar las instalaciones del Laboratorio de Pesquerías para la separación, montaje e identificación de los tardígrados, así como a los revisores del presente trabajo por sus acertadas observaciones.

REFERENCIAS

- Bartels, P. J., Apodaca, J. J., Mora, C., & Nelson, D. R. (2016). A global biodiversity estimate of a poorly known taxon: phylum Tardigrada. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 178(4), 730-736.
- Beasley, C. W. (1972). Some tardigrades from Mexico. *Southwestern Naturalist*, 17, 21-29.
- _____, Kaczmarek, L., & Michalczyk, L. (2008). *Doryphoribius mexicanus*, a new species of Tardigrada (Eutardigrada, Hypsibiidae) from Mexico (North America). *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 121(1), 34-40.
- Claps, M. C., & Rossi, G. (2002). Tardigrada. En J. Llorente-Bousquets, & J. E. Bousquets (Eds.), *Biodiversidad, taxonomía y biogeografía de artrópodos de México: Hacia una síntesis de su conocimiento*. Vol. III (pp. 171-186). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cutz-Pool, L. Q., Alcocer-May I. S., Ortiz-León H. J., Castro Pérez J. M. y López-Chan J. A. (2015). Riqueza genérica y preferencia de hábitat de Collembola (Hexapoda: Collembola) en el municipio de Othon Pompeyo Blanco Quintana Roo. *Entomología Mexicana*, 2, 161-166.
- Cutz-Pool, L. Q., Escalante-Poot, G. A., & Ortiz-León, H. J. (2016). Arañas (Arachnida: Araneae) asociadas a dos ecosistemas contrastante en el ejido de Petcacab, Quintana Roo. *Entomología mexicana*, 3, 58-63.
- Degma, P., Bertolani, R., & Guidetti, R. (2014). *Actual checklist of Tardigrada species*. Ver. 31. Recuperado de [http://www.tardigrada.modena.unimo.it/miscellanea/Actual checklist of Tardigrada.pdf](http://www.tardigrada.modena.unimo.it/miscellanea/Actual%20checklist%20of%20Tardigrada.pdf) on
- Fontoura, P., Bartels, P. J., Jørgensen, A., Kristensen, R. M., & Hansen, J. G. (2017). A dichotomous key to the genera of the Marine Heterotardigrades (Tardigrada). *Zootaxa*, 4294(1), 1-45.
- Glime, J. M. (2013). Tardigrades. En *Bryophyte Ecology: Vol. 2. Bryological Interaction*. Digital Commons @ Michigan Tech. Recuperado de www.bryoecol.mtu.edu
- González-Reyes, A., Acosta, X., Corronca, J., Rocha, M., Doma, I., & Repp, E. Y. (2016). Evaluación de la diversidad en comunidades de tardígrados (Ecdysozoa: Tardigrada) en hábitats urbano y rural de la ciudad de Salta (Argentina). *Iheringia. Série Zoologia*, 106. doi: 10.1590/1678-4766e2016026
- Guil, N. (2008). New records and within-species variability of Iberian tardigrades (Tardigrada), with comments on the species from the *Echiniscus blumi-canadensis* series. *Zootaxa*, 1757(1), 1-30.
- Guil, N., & Cabredo-Saduño, F. J. (2007). Analysis of the species description process for a littleknown invertebrate group: the limnoterrestrial tardigrades (Bilateria, Tardigrada). *Biodiversity and Conservation*, 16(4), 1063-1086.
- Heinis, F. (1911). Beitrag zur Kenntnis der zentralamerikanischen moss fauna. *Revue Suisse de Zoologie*, 19, 253-266.
- Hoffman, A., & Jiménez, M. L. (1994). Tardígrados en México. *Anales del Instituto de Biología Serie Zoología*, 65(2), 297-301.
- Johansson, C., Calloway, S., Miller, W. R., & Linder, E. T. (2011). Are urban and rural tardigrade (Tardigrada) communities distinct and determined by pH: A case study from Fresno County, California. *The Pan-Pacific Entomologist*, 87(2), 86-97.
- Kaczmarek, Ł., Bartels, P. J., Roszkowska, M., & Nelson, D. R. (2015). The zoogeography of marine Tardigrada. *Zootaxa*, 4037, 1-189.
- Kaczmarek, L., Diduszko, D., & Michalczyk, L. (2011). New records of Mexican Tardigrada. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82, 1324-1327.
- Kaczmarek, L., Michalczyk, L., & McInnes, S. J. (2014). Annotated zoogeography of non-marine Tardigrada. Part I: Central America. *Zootaxa*, 3763(1), 001-062.
- Marley, N. J., McInnes, S. J., & Sands, C. J. (2011). Phylum Tardigrada: a re-evaluation of the Parachela. *Zootaxa*, 2819, 51-64.
- May, R. M. (1948). Nouveau genre et espèces de tardigrade du Mexique: *Haplomacrobotus hermosillensis*. *Bulletin de la Société Zoologique de France*, 73, 95-97.

- Meininger, C. A., Uetz, G. W., & Snider, J. A. (1985). Variation in epiphytic microcommunities (tardigrade-lichen-bryophyte assemblages) of the Cincinnati, Ohio area. *Urban Ecology*, 9(1), 45-61.
- Meyer, H. A., Hinton, J. G., & Samletzka, C. A. (2013). Water bears in the Anthropocene: a comparison of urban and Woodland tardigrade (Phylum Tardigrada) communities in Southwestern Louisiana, USA. *Journal of Limnology*, 72, 123-127.
- Moreno-Talamantes, A., Roszkowska, A. M., Guayasamín, P. R., Flores Maldonado, J. J., & Kaczmarek, Ł. (2015). First record of *Dactylobiotus parthenogeneticus* Bertolani, 1982 (Eutardigrada: Murrayidae) in Mexico. *Check List*, 11(4), 1-5.
- Nelson, D. R., Guidetti, R., & Rebecchi, L. (2010). Tardigrada. En J. H. Thorp, & P. A. Covich (Eds.), *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates* (pp 455-484). Elsevier.
- Palacios-Vargas, J. G., & Vidal Acosta, M. V. (1994). Nuevas especies de Friesea (Collembola: Neanuridae) de reservas biológicas de México. *Southwestern Entomologist*, 19(3), 291-291.
- Pérez-Pech, W. A., & Cutz-Pool, L. Q. (2015). Estructura y sucesión de la fauna de artrópodos edáficos de maíz, en José María Morelos, Quintana Roo, México. *Ingeniantes*, 2(1), 25-28.
- Pérez-Pech, W. A., Cutz-Pool, L. Q., & Martín-Cerón, A. (2014). Colémbolos (Hexapoda: Collembola) de una vegetación secundaria en el municipio de José María Morelos Quintana Roo, México. *Entomología Mexicana*, 1, 509-513.
- Pérez-Pech, W. A., Cutz-Pool, L. Q., Guidetti, R., & Blanco-Piñón, A. (2016). Primer registro genérico de tardígrados, habitantes del área urbana de Chetumal Quintana Roo, México. *Entomología Mexicana*, 3, 912-918.
- Pilato, G., & Binda, M. G. (2010). Definition of families, subfamilies, genera and subgenera of the Eutardigrada, and keys to their identification. *Zootaxa*, 2404, 1-54.
- Pilato, G., & Lisi, O. (2006). Notes on some tardigrades from southern Mexico with description of three new species. *Zootaxa*, 1236, 53-68.
- Ramazzotti, G., & Maucci, W. (1983). Il phylum Tardigrada. III edizione riveduta e aggiornata. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, 41, 1-1012.
- Sánchez-Moreno, S., Ferris, H., & Guil, N. (2008). Role of tardigrades in the suppressive service of a soil food web. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 124(3), 187-192.
- Šatkauskienė, I. (2012). Microfauna of lichen (*Xanthoria parietina*) in Lithuania: Diversity patterns in polluted and non-polluted sites. *Baltic Forestry*, 18(2), 255-262.
- Schuster, R. O. (1971). Tardigrada from the Barranca del Cobre, Sinaloa and Chihuahua, Mexico. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 84(26), 213-224.
- Séméria, Y. (1981). Recherches sur la faune urbaine et sub-urbaine des Tardigrades muscicoles et lichenicoles I. Nice-ville. *Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon*, 50(7), 231-237.
- Stupino, S. A., Iermanó, M. J., Gargoloff, N. A., & Bonicatto, M. M. (2014). La biodiversidad en los agroecosistemas. En S. J. Sarandón, & C. C. Flores (Eds.), *Agroecología: Bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables* (pp. 131-158). La Plata: Universidad Nacional de La Plata.

Análisis ecológico de un área de pago por servicios ambientales hidrológicos en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México

Ecological analysis of a payment for hydrological environmental services area in the common land La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, Mexico

José Manuel Zúñiga Vásquez*✉, Erick Alberto Martínez López*, Carlos Navarrete Gallardo*, José de Jesús Graciano Luna*, David Maldonado Ayala*, Bonifacio Cano Mejía**

Zúñiga Vásquez, J. M., Martínez López, E. A., Navarrete Gallardo, C., Graciano Luna, J. J., Maldonado Ayala, D., & Cano Mejía, B. (2018). Análisis ecológico de un área de pago por servicios ambientales hidrológicos en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 27-36.

RESUMEN

En México la Comisión Nacional Forestal implementa el pago por servicios ambientales hidrológicos, cuyo objetivo es reducir la tasa de deforestación en zonas críticas para recarga de agua. Aunque se da seguimiento a los proyectos aprobados, no se tiene un análisis de los beneficios que genera este mecanismo. Generar información para evaluar estos beneficios juega un papel clave. El objetivo principal de esta investigación fue realizar un análisis ecológico de un área beneficiaria de pago por servicios ambientales hidrológicos del ejido La Ciudad, a siete años de la asignación del apoyo. Se analizó la cobertura forestal del área, el estado de la vegetación, la diversidad de especies y la calidad del agua. Los resultados mostraron que el área cuenta con un porcentaje considerable de cobertura forestal y niveles aceptables de biodiversidad. En análisis de calidad del agua mostró una posible contaminación por lo que se recomienda un monitoreo más recurrente.

Palabras clave: PPSAH; ejercicio fiscal 2009; calidad del agua; índices de biodiversidad; NDVI; clasificación supervisada.

Keywords: PPSAH; fiscal year 2009; water quality; biodiversity; NDVI; supervised classification.

Recibido: 11 de mayo de 2017, **aceptado:** 8 de enero de 2018

* Instituto Tecnológico de El Salto. Mesa del Tecnológico s/n, C. P. 34942, El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México. Correo electrónico: josema.zuva@gmail.com; eyr_1992@hotmail.com; carlosnav@hotmail.com; gracluna@hotmail.com; davma12@yahoo.com.mx

** Unidad de Prestación de Servicios Ejidales # 6. Carretera Durango-Mazatlán km 102, C. P. 34950, Col. El Salto, El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México. Correo electrónico: canomejia@gmail.com

✉ Autor para correspondencia

ABSTRACT

In Mexico, the National Forestry Commission implements the payment for hydrological environmental services, whose objective is to reduce the rate of deforestation in critical areas for water recharging. Although the approved projects are followed up, there is no analysis of the benefits generated by this mechanism. Generating information for these evaluations plays a key role. The main objective of this research was to perform an ecological analysis of payment for hydrological environmental services beneficiary area in the common land La Ciudad, seven years after the allocation of support. The forest cover of the area, the state of the vegetation, the diversity of species and the quality of the water were analyzed. The results showed that the area has a considerable percentage of forest cover and acceptable biodiversity. In the analysis of water quality, contamination can occur, which is why more frequent monitoring is recommended.

INTRODUCCIÓN

Los servicios ambientales son todos los beneficios que proporcionan los ecosistemas (servicios de provisión, regulación, culturales y de soporte) y generan beneficios para la sociedad y el equilibrio ecológico (INECOL, 2005; Niemelä, 2012; SEMARNAT, 2003). A pesar del impacto positivo que generan estos servicios en las economías mundiales, muchos de estos están desestimados o no tienen un valor financiero y el deterioro que sufre la base de los recursos naturales ha ocasionado que la permanencia de estos beneficios esté amenazada (MEA, 2005). Por ello la preocupación por mejorar la calidad de vida se fun-

da en la idea de mantener los productos y servicios que el ambiente presta (Del Ángel-Pérez, Villagómez-Cortés, & Díaz-Padilla, 2011). Ante esta situación desde hace algunos años se han creado estrategias de conservación a nivel mundial a partir de la Conferencia de Río de Janeiro (Perevochtchikova, Rojo Negrete, Martínez, & Fuentes Mariles, 2015).

En México se inició con la estrategia del pago por servicios ambientales (modalidad de Hidrológicos, PSAH), y fue incluido en las políticas públicas de conservación. De 2003 a la fecha la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) opera el Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PPSAH), con el objetivo de reducir la tasa de deforestación en zonas críticas para la recarga de agua (Perevochtchikova & Ochoa-Tamayo, 2012). Dicho programa cuenta con criterios y reglas de operación, los cuales se han ido modificando de acuerdo con las necesidades para administrar los recursos económicos y aspectos técnicos posibles de evaluar en campo (Cisneros, García, Muñoz-Piña & Rivera, 2011; COLPOS, 2008). Aunque la CONAFOR mantiene un programa de seguimiento de los proyectos aprobados en todo el país, no se tiene un análisis de los beneficios ambientales que generan estos mecanismos, por lo que se hace evidente la falta de cuantificación y monitoreo de los servicios ambientales (no sólo refiriéndose a la cobertura forestal analizada por la CONAFOR) (Perevochtchikova et al., 2015). Un punto de partida lo constituye la generación de información a nivel local para evaluar los beneficios que produce el programa en las áreas apoyadas.

En el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México, se encuentra un área de pago por servicios ambientales hidrológicos, fue beneficiado con dicho programa durante el periodo 2009-2013 y a la fecha sigue como beneficiario del mismo. Esta área no cuenta con información ecológica para realizar una evaluación del PPSAH a nivel local. Bajo la hipótesis de que el área se encuentra en buenas condiciones ecológicas, el principal objetivo de esta investigación fue realizar una caracterización ecológica del área de PSAH a siete años de la asignación del apoyo (ejercicio fiscal 2009) para la generación de información y establecer una línea base para evaluaciones futuras.

MATERIALES Y MÉTODOS

En cuanto al área de estudio, el ejido La Ciudad se ubica en el macizo montañoso denominado Sierra

Madre Occidental dentro del municipio de Pueblo Nuevo (figura 1). Los principales tipos de clima son C (E) (M): semifrío húmedo, C (E) (W2): semifrío subhúmedo, C (W2): templado subhúmedo, todos con lluvias en verano, la precipitación media anual es de 1200 m.m., y una temperatura media anual de 18 °C, con máximas de 22 °C y mínimas de 3 °C (UPSE 6, 2009). El área destinada a pago por servicios ambientales hidrológicos cuenta con una superficie de 780 hectáreas.

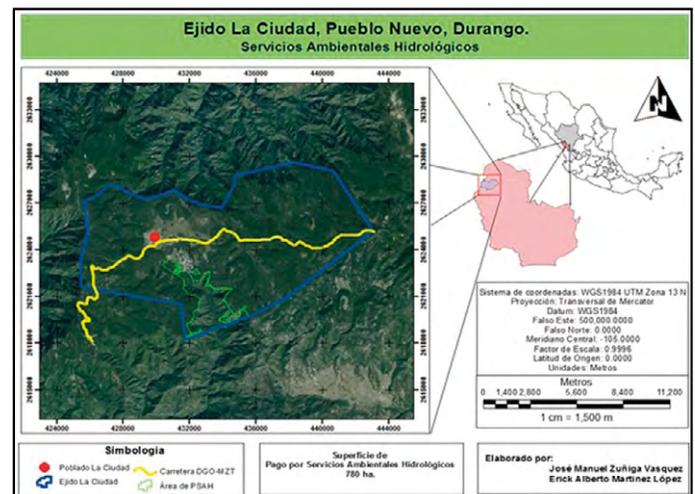


Figura 1. Ubicación del área de pago por servicios ambientales hidrológicos (PSAH), ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México.

Elaboración propia.

En cuanto a la metodología, se realizó una caracterización de la biodiversidad a través de índices de diversidad y se estimó la cobertura forestal por medio de técnicas de teledetección.

Caracterización de la biodiversidad

Se recopiló información general y dasométrica de 20 sitios de dimensiones fijas, distribuidos al azar dentro del área de PSAH, los sitios fueron de forma circular y de una superficie de 1000 m². Se contemplaron todos los árboles dentro del sitio con diámetro normal ≥ 10 cm, se identificó su especie y se midió diámetro normal (cm), altura total (m), y diámetro de copa (m) en x, y (norte-sur y este-oeste).

Con la información recopilada se estimaron índices de biodiversidad dentro de los cuales se estimó la riqueza de especies a través de los índices de Margalef y Menhinick (tabla 1): los cuales cuantifican el número de especies presentes.

Tabla 1
Índices de riqueza de especies

Margalef	$D_{Mg} = \frac{S - 1}{\ln N}$	
Menhinick	$D_{Mn} = \frac{s}{\sqrt{N}}$	Donde S = número de especies N = número total de individuos

Nota: Elaboración propia.

Tabla 2
Índices de dominancia

Simpson	$\lambda = \sum pi^2$	Donde: pi = abundancia proporcional de la especie i .
McIntosh	$D = \frac{N - U}{N - \sqrt{N}}$	Donde: N = número total de individuos $U = \sqrt{\sum ni^2}$ ($i=1, 2, 3, \dots, S$).
Berger-Parker	$d = \frac{N_{max}}{N}$	Donde: N_{max} : es el número de individuos en la especie más abundante.

Nota: Elaboración propia.

También se estimó la dominancia de las especies con los índices Simpson, McIntosh y Berger-Parker (tabla 2); estos son métodos sustentados en la estructura ya que calculan la distribución proporcional del valor de importancia de cada especie, como la abundancia relativa; es decir, identifican las especies más comunes.

Además se estimó el valor de importancia ecológica para cada especie a través del índice de valor de importancia (IVI), el cual jerarquiza la dominancia de cada especie. Para esta investigación se agregó el parámetro de cobertura de copa relativa al índice de valor de importancia, por lo cual la expresión del índice de valor de importancia se estructuró de la siguiente manera:

$$IVI = Ar + Dr + Fr + Cr$$

donde:

IVI= Índice de valor de importancia

Ar = Abundancia relativa, es igual al número de ár-

boles de una especie sobre el número total de individuos de todas las especies.

Dr = Dominancia relativa, es la cobertura en área basal de una especie en relación a la cobertura en área basal total de las especies.

Fr = Frecuencia relativa, es el número de veces que se presenta una especie referida a la frecuencia total de todas las especies.

Cr = Cobertura relativa, es la cobertura de copa de una especie en relación con la cobertura de copa total de las especies.

Análisis de cobertura forestal. Se utilizó una imagen del satélite Landsat 8 con resolución de 30 m en sus bandas y una resolución de 15 m en la banda pancromática. La imagen se obtuvo a través del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) (USGS, s. f.). La imagen utilizada (LC80310442015085LGN00) fue capturada por el sensor OLI_TIRS a las 23:54:32 horas del día 26 de marzo del año 2015.

La imagen se procesó con ayuda del software ArcGIS 10.2 (ESRI, s. f.), a través de la herramienta GEOBIA-LANDSAT 8, diseñada por el Centro de Sistemas de Información Geográfica de la Universidad de Gdansk, Polonia (Urbanski, 2014).

Debido a que las imágenes satelitales pueden presentar alteraciones radiométricas y geométricas de forma que no coincida con el tono, posición y tamaño de los objetos, se realizó una corrección atmosférica para eliminar los posibles errores (Flood, 2014; Vermote & Kotchenova, 2008). A través de un Pan-sharpen en todos los canales espectrales se mejoró la resolución espacial de la imagen, este es un proceso de fusión de alta resolución pancromática y menor resolución multiespectral de imágenes para crear una imagen en color de alta resolución (Mucher, Steinnocher, Kressler, & Heunks, 2000). Posteriormente se realizó una clasificación supervisada, la cual es un proceso en que se utilizan píxeles de identidad conocida, para clasificar píxeles de identidad desconocida (Arango Gutierrez, 2005; Chuvieco, 2006). Para la clasificación de la imagen se trabajó con seis categorías o clases:

- Clase 1: Sin cobertura vegetal (asentamientos, zonas rocosas, suelo).
- Clase 2: Pastizal
- Clase 3: Bosque abierto de pino (bosque poco denso, áreas de regeneración).
- Clase 4: Bosque de pino-encino
- Clase 5: Bosque de pino
- Clase 6: Cuerpos de agua y sombras.

Un factor importante en el proceso de clasificación supervisada es la validación de la misma, que debe ser evaluada y reportada con métricas informativas adecuadas para la comunidad de usuarios. Se llevó a cabo un análisis de matrices de confusión, con la que se evaluó la precisión de la clasificación. Se utilizó el valor del coeficiente kappa (κ), el cual computa el acuerdo entre la imagen clasificada y la verdad de terreno.

Como complemento se calculó el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI), este índice se relaciona con el comportamiento radiométrico de la vegetación, la actividad fotosintética y la

estructura foliar de las plantas y es utilizado generalmente para la discriminación de cubiertas vegetales, medir el vigor de las plantas y la producción de biomasa (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015).

La fórmula del NDVI es:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

donde:

IRC = valores de píxel de la banda infrarroja

R = valores de píxel de la banda roja

Análisis de las características físicas y químicas del agua. Se recolectaron muestras de agua en el arroyo Mexiquillo, perteneciente al área de PSAH y del cual se abastecen los habitantes del ejido. Se realizó un análisis de las características físicas y químicas, utilizando el analizador de iones C3010 y el equipo portátil HACH DR 2800, el cual es un espectrofotómetro con rango de longitud de onda que oscila de 340 a 900 nm. El equipo proporciona lecturas digitales en unidades directas de los resultados y brinda pruebas seguras (Hach Company, 2000).

Se analizaron algunas propiedades como conductividad eléctrica o conductividad, turbidez, pH, nitratos (NO_3), nitritos (NO_2), fosfatos y oxígeno disuelto. Los resultados se compararon con los valores y límites permisibles de calidad de agua de acuerdo con las normas oficiales mexicanas NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 1995), NOM-001-ECOL-1996 (SEMARNAP, 1997), y NOM-CCA-032-ECOL-2010 (SSA, 2010).

RESULTADOS

Caracterización de la diversidad

Se contabilizaron 960 individuos (N) y un valor para la riqueza de especies (S) de 13 resultantes del muestreo. La Tabla 3 muestra la información silvícola-dasométrica de las especies.

En los valores obtenidos de los índices de riqueza de especies (Margalef y Menhinick) se observó que el área se encuentra entre rangos aceptables y moderadamente regulares (tabla 4).

Tabla 3
Información silvícola-dasométrica de las especies encontradas en el área de PSAH

Especie	No. de individuos/ha	Área basal m ² /ha	Cobertura de copa m ² /ha
<i>Pinus cooperi</i>	33	1.9632	547.2522
<i>Pinus durangensis</i>	268	16.1708	4618.4827
<i>Pinus leiophylla</i>	32	1.2119	439.5009
<i>Pinus teocote</i>	3	0.151	39.4997
<i>Pinus lumholtzii</i>	2	0.0785	40.7308
<i>Pinus ayacahuite</i>	15	0.2847	145.3216
<i>Juniperus spp</i>	41	1.317	534.7808
<i>Cupressus spp.</i>	14	0.5885	107.6764
<i>Pseudotsuga mensiezii</i>	1	0.0245	4.949
<i>Alnus spp</i>	8	0.196	84.1222
<i>Arbutus chiapensis</i>	8	0.1582	79.9135
<i>Quercus sideroxila</i>	47	3.039	937.4544
<i>Quercus rugosa</i>	11	0.8991	260.6163

Nota: Elaboración propia.

Tabla 4
Valores de riqueza de especies para el área de PSAH

Riqueza de especies	
Índice de Margalef	1.7475
Índice de Menhinick	0.4195

Nota: Elaboración propia.

Los índices de dominancia (Simpson, McIntosh y Berger-Parker) toman en cuenta la representatividad de las especies con mayor valor de importancia sin evaluar la contribución del resto de las especies, en este caso los resultados muestran en rangos de cero a uno la dominancia de una especie un valor muy cercano a uno representa muy baja biodiversidad (tabla 5).

Tabla 5
Valores de dominancia de las especies del área de PSAH

Dominancia	
Índice de Simpson	0.3403
Índice de McIntosh	0.4305
Índice de Berger-Parker	0.5583

Nota: Elaboración propia.

El valor de importancia es un indicador de la importancia fitosociológica de una especie, dentro de una comunidad, describe que la variación en la composición florística es una de las características más importantes que deben ser determinadas en estudios de vegetación (Curtis & McIntosh, 1951). En la Tabla 6 se muestran los valores de importancia de las especies más y menos abundantes del área.

Con la corrección mejora la resolución de la imagen satelital (figura 2) y de la clasificación supervisada se obtuvieron seis clases o categorías de cobertura (figura 3).

Con base en dichas categorías resultantes se realizó el cálculo de cobertura en el área de PSAH. Para no tener una sobreestimación de la cobertura, la categoría de sombra se contabilizó como área sin cobertura, por lo cual el área con cubierta forestal abarca una superficie de 598.88 ha, con las cuales se estimó un porcentaje cubierto de 76%. La tabla 7 se presentan las superficies de las clases de cobertura identificadas.

El proceso de validación a través del coeficiente Kappa reveló la precisión de la clasificación, al arrojar valores para la precisión general de la clasificación de 79%. De acuerdo con la escala propuesta

Tabla 6
Parámetros del valor de importancia ecológica de las especies del área de PSAH

Especie	Densidad relativa	Dominancia relativa	Frecuencia relativa	Cobertura relativa	Valor de importancia
<i>Pinus durangensis</i>	56.7600	63.0876	32.2290	58.5518	210.6284
<i>Quercus sideroxyla</i>	9.5274	11.4898	21.3342	11.5477	53.8992
<i>Pinus leiophylla</i>	6.7741	4.6239	12.4917	5.9149	29.8046
<i>Pinus cooperi</i>	6.3126	7.0772	8.1610	6.7645	28.3152
<i>Juniperus spp</i>	7.4711	4.7457	4.8431	7.0701	24.1299
<i>Pinus ayacahuite</i>	3.2288	1.3033	7.8478	1.9059	14.2857
<i>Quercus rugosa</i>	2.5492	2.6673	2.6674	3.1106	10.9945
<i>Arbutus chiapensis</i>	1.5447	0.7653	5.0184	1.0495	8.3779
<i>Alnus spp</i>	1.5834	0.7575	4.1649	1.0462	7.5520
<i>Cupressus spp.</i>	3.0487	2.3581	0.2686	1.8457	7.5210
<i>Pinus teocote</i>	0.6484	0.6833	0.5546	0.5445	2.4307
<i>Pinus lumholtzii</i>	0.4167	0.3765	0.3316	0.5840	1.7088
<i>Pseudotsuga mensiezii</i>	0.1351	0.0645	0.0877	0.0647	0.3520

Nota: Análisis de cobertura forestal.
Elaboración propia.

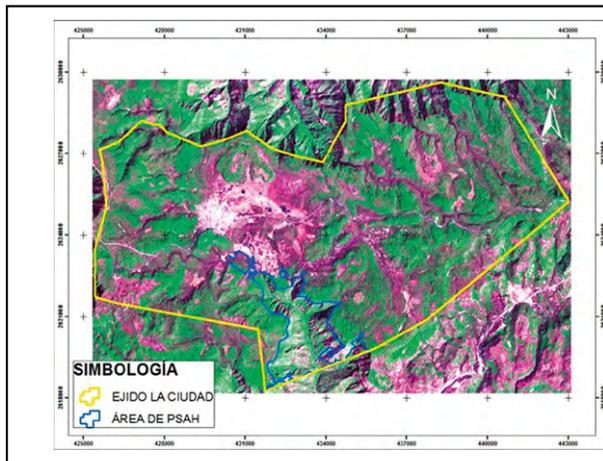


Figura 2. Combinación de bandas de imagen Landsat 8 con resolución a 15m para clasificación de coberturas.
Elaboración propia.

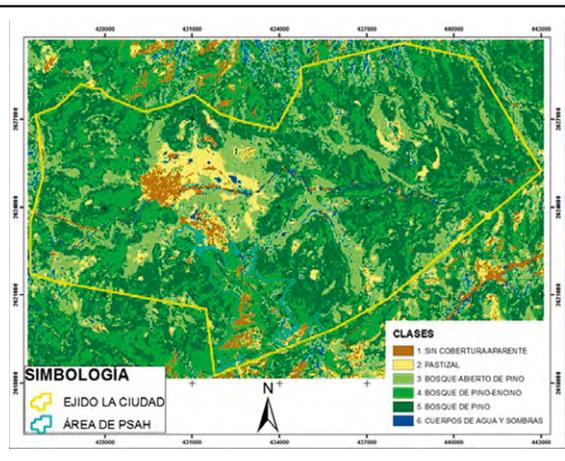


Figura 3. Clasificación supervisada por clases o coberturas.
Elaboración propia.

por Monserud & Leemans (1992), para la interpretación del valor de dicho coeficiente donde valores menores a 0.40 se clasifican como pobres, 0.40-0.55 suficientes, 0.55-0.70 buenos, 0.70-0.85 muy buenos y mayores a 0.85 excelentes, se obtuvieron valores considerados muy buenos.

De acuerdo con el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (figura 4), se encontraron coin-

cidencias entre los valores de dicho índice y los resultados de la clasificación supervisada, ya que se encuentran muy pocos valores negativos dentro del área. Este índice genera valores entre -1 y 1, que básicamente representan el verdor de las plantas, cualquier valor negativo corresponde principalmente a las nubes, al agua o nieve; mientras que valores cercanos a cero corresponden principalmente a las rocas y al terreno desnudo.

Tabla 7
Superficie por clase o tipo de cobertura

Clases	Tipo de cobertura	Superficie (ha)
1	Sin cobertura vegetal (asentamientos, zonas rocosas, suelo)	135.26
2	Pastizal	20.04
3	Bosque abierto de pino (Bosque poco denso, áreas de regeneración)	153.17
4	Bosque de pino-encino	190.18
5	Bosque de pino	235.48
6	Cuerpos de agua y sombras	46.06
Total		780

Nota: Elaboración propia.

Análisis de las características físicas y químicas del agua

Los resultados de las características físicas y químicas del agua indican que son inferiores o se encuentran entre los límites permisibles enlistados por las normas oficiales mexicanas, excepto los niveles de fosfatos, lo cual indica una posible contaminación del agua (tabla 8).

DISCUSIÓN

Estos resultados constituyen una primer aproximación al establecimiento de una base para la evaluación del Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México. Asimismo, constituyen una herramienta para la toma de decisiones para el buen manejo de esta área. Las técnicas utilizadas para la caracterización ecológica del área fueron de gran ayuda para el monitoreo de los servicios ambientales hidrológicos, ya que se contempla la evaluación de la calidad del agua, la cobertura forestal y la diversidad de especies presentes en el área, de acuerdo con Perevochtchikova et al. (2015) la cuantificación y monitoreo de los servicios ambientales no sólo debe basarse en la cobertura forestal.

Caracterización de la diversidad. El estudio de la biodiversidad es una herramienta que ayuda a monitorear el estado de los bosques. De acuerdo con Nívar-Cháidez y González-Elizondo (2009), los bosques diversos son más productivos que los bosques simples. Los niveles de biodiversidad encontrados en el área son comparables con los reportados por un estudio de la diversidad de los bosques templados del estado de Durango (Nívar-Cháidez & González-

Tabla 8

Límites permisibles y valores de las propiedades físicas y químicas del agua del área de PSAH

Propiedades	Límites permisibles	Valores obtenidos
Turbidez	5 unidades de turbidez nefelométricas (UTN).	0.68 UTN
Nitratos	10	1.0 mg/l
Nitritos	0.05	0.018 mg/l
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5	07
Conductividad eléctrica	No mayor a 2000 μ S/cm.	37.1 μ S/cm
Oxígeno disuelto	No menor a 6 mg/l	11 mg/l
Fosfatos	No mayor a 0.01mg/l	0.54 mg/l

Nota: Elaboración propia.

Elizondo, 2009). También son muy similares a los resultados reportados por Graciano-Luna (2001), para la región de El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México.

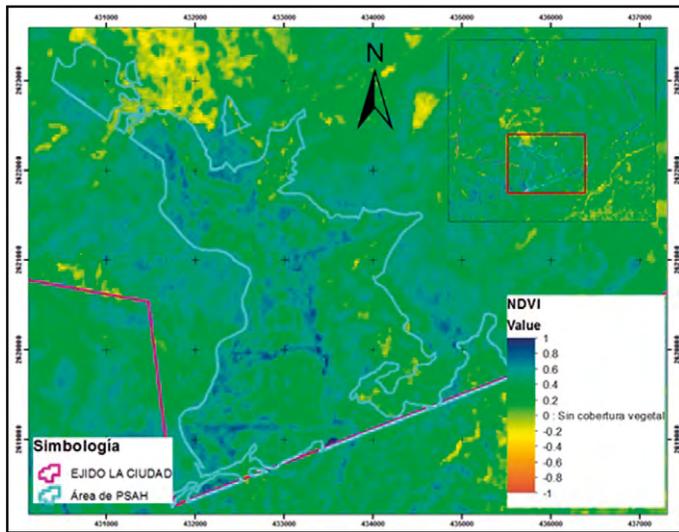


Figura 4. Valores del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado para el área de PSAH. Elaboración propia.

Los valores de importancia de las especies más altos fueron del género *Pinus*, seguidos del género *Quercus*, lo cual describe que el área de PSAH en su mayoría es un bosque mezclado de pino-encino. La especie dominante del área fue *Pinus durangensis* y la menos representativa fue *Pseudotsuga mensiezii*, es muy importante poner atención en las especies de baja representatividad, ya que una especie rara o escasa en una comunidad es sustituida por otra que es abundante, por tanto, la diversidad disminuye y las especies dominantes colonizan las áreas que quedaron de las especies que fueron eliminadas. Magurran (1988) menciona que el identificar un cambio en la diversidad, ya sea en el número de especies, en la distribución de la abundancia de las

especies o en la dominancia, alerta acerca de procesos empobrecedores.

Análisis de cobertura forestal

El análisis de la cobertura forestal a través de técnicas de teledetección proporciona una herramienta útil para la toma de decisiones y para el monitoreo de la vegetación (Mucher et al., 2000). La identificación de los tipos de cobertura establece una línea base para las actividades de monitoreo (Gómez, White, & Wulder, 2016). En el análisis aquí realizado se detectaron distintas clases de cobertura, lo que en campo hubiera sido muy costoso, por tanto, el análisis de coberturas a través de manera remota constituyó una opción confiable, ya que este proceso es evaluado de manera estadística (Gómez et al., 2016; Monserud & Leemans, 1992). Además, el uso del Índice Estandarizado Diferencial de Vegetación (NDVI) ayudo a corroborar que no se encontraban muchos valores negativos en el área, lo que indica que la mayoría de la cobertura pertenece a vegetación. Este índice es derivado de las mediciones de la reflectancia óptica de la luz solar en las longitudes de onda rojas e infrarrojas cercanas, lo cual puede ayudar a monitorear el estado fenológico de la vegetación (Eastman, Sangermano, Machado, Rogan, & Anyamba, 2013).

Análisis de las características físicas y químicas del agua

Es importante realizar estudios de esta cuenca hidrográfica, ya que abastece de agua a la zona agrícola del estado de Sinaloa (Arriaga-Cabrera et al., 2000). Los resultados de las características físicas y químicas del agua mostraron que los niveles de fosfatos fueron muy elevados, esto indica la posible contaminación



Figura 5. Cascada principal de Mexiquillo. Fotografía de Kunstphoto (2010) tomada del portal electrónico AllTravels.

del agua en esta zona, de la cual se abastecen los habitantes del ejido La Ciudad y otros habitantes de comunidades aguas abajo y sus principales usos son para riego y uso doméstico. Cuando hay cantidades excesivas de fosfato existe la fuerte sospecha de contaminación del agua debido al uso de fertilizantes y detergentes, así como materia fecal en el agua (Larrea-Murrell, Rojas-Badía, Romeu-Álvarez, Rojas-Hernández, & Heydrich-Pérez, 2013). Asimismo, esos altos niveles pueden causar eutrofización, proceso provocado por un exceso de nutrientes en el agua, principalmente de nitrógeno y fósforo. Las consecuencias son ríos con mucha vegetación y otros organismos que agotan el oxígeno del agua y llevan a la ausencia de vida en ella (Quirós, 2000).

En los humanos la ingesta masiva de productos con fosfatos puede ocasionar trastornos de salud como la hiperfosfatemia o aumento de los niveles de fosfato inorgánico en la sangre, que está relacionado con una insuficiencia renal, ya que es el riñón el encargado de eliminarlos del cuerpo humano (Ca-

rretero, 2009). Las muestras fueron recolectadas en temporada de lluvias, lo que pudo generar que las corrientes arrastraran sedimentos, pero de igual manera es importante que se ponga especial interés en este tema, ya que puede ocasionar enfermedades en las personas que se abastecen de las aguas de esta área.

CONCLUSIONES

El ejido La ciudad cuenta con una cobertura forestal considerable y con una biodiversidad moderada. En cuanto a la calidad del agua, se encontraron evidencias de contaminación y un análisis microbiológico escapa de los alcances de este estudio, por lo que se recomienda un monitoreo exhaustivo y la toma de medidas de prevención en la contaminación de cuerpos de agua y elaboración de obras para el cuidado de la misma. Esos resultados ayudarán para evaluaciones futuras de los beneficios del Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en la región estudiada.

REFERENCIAS

- Arango Gutiérrez, M. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas Vegetales sobre imágenes digitales de sensores Remotos: "landsat-etm+". *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2611-2634.
- Arriaga-Cabrera, L. et al. (Coords.). (2000). *RTP-56 Pueblo Nuevo. Regiones terrestres prioritarias de México* (pp. 270-272). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Tlistado.html>
- Carretero, C. M. (2009). *Hiperfosfatemia. Actualidad Científica; Avances Farmacológicos*, 28(2): 61-62.
- Chuvieco, E. (2006). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel.
- Cisneros, A., García, H., Muñoz-Piña, C., & Rivera, M. (2011). Retos de la focalización del Programa de Pago por los Servicios Ambientales en México. *Revista Española de Estudios Agro-sociales y Pesqueros*, 228, 87-113.
- Colegio de Postgraduados-Comisión Nacional Forestal. (2008). *Evaluación externa de los apoyos de los Servicios Ambientales Ejercicio Fiscal 2007 [Resumen ejecutivo]*. México: Autor. Recuperado de https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&src=s&source=web&cd=4&ved=0CDAQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.cnf.gob.mx%3A8090%2Fsnif%2Fportal%2Fcomponent%2Fphocadownload%2Fcategory%2F55psa%3Fdownload%3D266%3Aresumenejecutivo&ei=osFcVZK4AY2yyATbjjDwBw&usq=AFQjCNEaQj7aeMbJ5e0BQ9_3uN69VJdNbQ
- Curtis, J. T., & McIntosh, R. P. (1951). An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 32(3), 476-496.
- Del Ángel Pérez, A. L., Villagómez Cortés, J. A., & Díaz Padilla, G. (2011). Valoración socioeconómica del pago por servicios ambientales hidrológicos en Veracruz (Coatepec y San Andrés Tuxtla). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 95-112.
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Machado, E. A., Rogan, J., & Anyamba, A. (2013). Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (NDVI), 1982-2011. *Remote Sensing*, 5(10), 4799-4818.
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (s. f.). ArcGIS Resource Center [Portal electrónico]. Recuperado de <http://resources.arcgis.com/es/home/>
- Flood, N. (2014). Continuity of reflectance data between Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI, for both top-of-atmosphere and surface reflectance: A study in the Australian landscape. *Remote Sensing*, 6, 7952-7970. doi: 10.3390/rs6097952
- Gómez, C., White, J. C., & Wulder, M. A. (2016). Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 55-72.
- Graciano-Luna, J. J. (2001). *Técnicas de evaluación dasométrica y ecológica de los bosques de coníferas bajo manejo de*

- la Sierra Madre Occidental del centro sur de Durango, México. Tesis de Maestría. Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León. Recuperada de <http://eprints.uanl.mx/897/1/1020145409.PDF>
- Hach Company. (2000). *Manual de análisis de agua. Procedimientos seleccionados del manual de Hach sobre análisis de agua* (2ª. ed. en español, versión de la 3a en inglés). CO, EE. UU.: Autor. Recuperado de <https://documents.mx/download/link/water-analysis-manual-spanish-manual-de-analisis-de-agua>
 - Instituto Nacional de Ecología. (2005). *Manual para el desarrollo de programas de pago por servicios ambientales hidrológicos locales*. México: Autor. Recuperado de http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/serv_amb_manual_psa.pdf
 - Kunstphoto (2010). *Cascada principal de Mexiquillo [Fotografía]*. Recuperada de <https://es.alltravels.com/mexico/durango/la-ciudad/fotos/corriente-foto-964189>
 - Larrea-Murrell, J. A., Rojas-Badía, M. M., Romeu-Álvarez, B., Rojas-Hernández, N. M., & Heydrich-Pérez, M. (2013). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: Revisión de la literatura. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 44(3), 24-34.
 - Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
 - Magurran, A. E. (1988). *Ecological diversity and its measurement* (179 pp.). Princeton, NJ: Princeton University Press.
 - Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Our human planet: Summary for decision makers* (109 pp.). Washington, DC: Island Press.
 - Monserud, R. A., & Leemans, R. (1992). Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. *Ecological modelling*, 62(4), 275-293.
 - Mucher, C. A., Steinnocher, K. T., Kressler, F. P., & Heunks, C. (2000). Land cover characterization and change detection for environmental monitoring of pan-Europe. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6-7), 1159-1181.
 - Návar-Cháidez, J. J., & González-Elizondo, S. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica*, 27, 71-87.
 - Niemelä, J. (Ed.). (2012). *Urban Ecology: Patterns, processes, and applications*. U. S.: Oxford University Press.
 - Perevochtchikova, M., & Ochoa Tamayo, A. M. (2012). Avances y limitantes del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en México, 2003-2009. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 89-112.
 - Perevochtchikova, M., Rojo Negrete, I. A., Martínez, S., & Fuentes Mariles, G. E. (2015). Información hidroclimatológica para la evaluación de los efectos del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos. Caso de estudio de la comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 11(1), 37-55.
 - Quirós, R. (2000). La eutrofización de las aguas continentales de Argentina. En *I Reunión de la Red Temática de la eutrofización de lagos y embalses. Subprogramas XVII, Cooperación Iberoamericana. Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. (CYTED)*. 16 y 17 de marzo, Mar del Plata, Argentina (12 pp.). Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/94c4/00769471d0bd15c6580390665aa667c9f92d.pdf>
 - Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación*, 6 de enero de 1997. Recuperado de www.economia-noms.gob.mx/normas/noms/1997/001-ecol.pdf
 - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). *Introducción a los servicios ambientales*. México: Autor. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/185547214/Introduccion-a-Los-Servicios-Ambientales#scribd>
 - Secretaría de Salud y Asistencia. (1995). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*, 30 de noviembre de 1995. Recuperado de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>
 - _____ (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-032-SSA2-2010, para la vigilancia epidemiológica, prevención y control de las enfermedades transmitidas por vector. *Diario Oficial de la Federación*, 1 de junio de 2011. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5192591&fecha=01/06/2011
 - Unidad de Prestación de Servicios Ejidales No. 6 El Salto, A. C. (2009). *Programa de mejores prácticas de manejo (PMPM), ejido La Ciudad* (22 pp.). Informe Final. El Salto P. N., Durango, México: Autor.
 - United States Geological Survey. (s. f.). Science for a changing world [Portal electrónico]. Reston, Virginia, U. S. Recuperado de <https://ers.cr.usgs.gov/login/>
 - Urbanski, J. (2014). *GEOBIA for ArcGis. Integration of GEOBIA with gis for semi-automatic land cover mapping from Landsat 8 imagery* [Presentación de Power Point]. Presentada en 5th GEOBIA Conference en GIS Centre, University of Gdansk, Thessaloniki, Poland. Recuperada de <http://ocean.ug.edu.pl/~oceju/CentrumGIS/GEOBIA%20in%20ArcGIS.pdf>
 - Vermote, E. F., & Kotchenova, S. (2008). Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces. *Journal of Geophysical Research*, 113(D23).

Seguimiento fotogramétrico de exhalaciones del volcán Popocatepetl, en México, durante el año 2016

Photogrammetric follow-up of the Popocatepetl volcano exhalations, in Mexico, during the year 2016

Rogelio Ramos Aguilar*✉, Patricia Máximo Romero*, Andrés Sánchez Hernández**, María de la Cruz Vázquez García***, Ana Guadalupe Martínez Ortiz****, Mariana Reyes Parada****, Leslie Pamela Falcón Calderón****, Dora Marcela Benítez Ramírez*****

Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Sánchez Hernández, A., Vázquez García, M. C., Martínez Ortiz, A. G., Reyes Parada, M., Falcón Calderón, L. P., & Benítez Ramírez, D. M. (2018). Seguimiento fotogramétrico de exhalaciones del volcán Popocatepetl, en México, durante el año 2016. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 37-48.

RESUMEN

En el siguiente trabajo se muestra un estudio sobre la reciente actividad del volcán Popocatepetl, analizando imágenes de las columnas eruptivas del mismo y apoyados en herramientas de fotogrametría terrestre y satelital para su clasificación; se calculó la emanación de gases, cenizas, altura y dirección.

Después de 67 años, el día 21 de diciembre de 1994 el volcán tuvo actividad eruptiva. Las columnas alcanzaron 3 km de altitud aproximadamente, aumentó la emisión de ceniza y los sismómetros indicaban temores del movimiento del magma en la estructura.

Palabras clave: volcán; Popocatepetl; cráter; fotogrametría.

Keywords: volcano; Popocatepetl; crater; photogrammetry.

Recibido: 22 de mayo de 2017, aceptado: 13 de noviembre de 2017

* Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 Sur, C. P. 72570, C. U., Puebla, Puebla, México. Correo electrónico: rogelio.ramos@correo.buap.mx; patricia.maximo@correo.buap.mx

** Facultad de Arquitectura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 Sur, C. P. 72570, C. U., Puebla, Puebla, México. Correo electrónico: andres.sanchez@correo.buap.mx

*** Bufete de Ingeniería en Telecomunicaciones y Sistemas. José Toribio Medina 130, C. P. 06880, Algarín, Ciudad de México, México. Correo electrónico: mayanegui@gpo-bits.com.mx

**** Colegios de Ingeniería Topográfica y Geodésica y Mecánica y Eléctrica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 Sur, C. P. 72570, C. U., Puebla, Puebla, México. Correo electrónico: ana.martinez@alumno.buap.mx; mariana.reyes@alumno.buap.mx; leslie.falcon@alumno.buap.mx

***** Universidad de Boyacá campus Tunja. Carrera 2a Este 64-169, Tunja, Colombia. Correo electrónico: dmbenitez@uniboyaca.edu.co

✉ Autor para correspondencia

Este acontecimiento marcó la reactivación del volcán; en este estudio se muestra un análisis fotogramétrico de la superficie y perímetro del cráter para determinar las deformaciones que ha sufrido hasta 2016 generadas por la actividad volcánica; para este estudio se recurrió a imágenes satelitales y aplicación de software especializado para su procesamiento.

ABSTRACT

The following work shows a study about the recent activity of the Popocatepetl volcano, analyzing images of the eruptive columns of the same and supported by terrestrial and satellite photogrammetry tools for their classification; the emanation of gases, ashes, height and direction were calculated.

After 67 years, on December 21, 1994 the volcano had an eruptive activity. The columns reached up to 3 km altitude, the ash emission increased and the seismometers indicated tremors of the movement of the magma in the structure.

This event marked the reactivation of the volcano, this study shows an analysis of the surface and perimeter of the crater, to determine the deformations that it has suffered until 2016 generated by the activity that the volcano has experienced; for this study, satellite images and application of specialized software for its processing were used.

INTRODUCCIÓN

Entre las estructuras volcánicas que se encuentran en México, el volcán Popocatepetl se ubica como uno

de los de mayor interés, basándose en su actividad sísmica y eruptiva reciente. Se localiza en los límites de los estados de Puebla, México y Morelos en el centro del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), con coordenadas 19°02' norte, y 98°62' oeste; su forma lo clasifica como un estratovolcán.

A lo largo de su historia, el volcán ha sufrido modificaciones, según Demant (1978) se podría dividir en dos fases; la primera se caracteriza por la formación y posterior destrucción de dos edificios volcánicos: Nexpayantla y El Fraile. El primero destruido por una erupción ocurrida aproximadamente hace 200,000 años.

En su lugar, se formó una caldera volcánica denominada El Fraile, originada por una depresión de vertientes andesíticos y dacíticos. Sin embargo, esta geoforma sufrió un colapso hace 30,000 años aproximadamente, provocando una erupción y destruyendo el lado sur del mismo. (Macías, 2005, p. 396)

Posteriormente, registró erupciones plinianas que formaron el cono actual, seguido por periodos de actividad intensa con erupciones explosivas, la última de este tipo en el año 800 d.C. Existen registros prehispánicos de actividad fumarólica entre los años 1363 y 1512 (figura 1). "En el año 1519, Hernán Cortés relata sobre una emisión de ceniza y el historiador Bernal Díaz redactó sobre una erupción ocurrida ese mismo año y en 1539, sobre una emisión de ceniza" (Macías, 2005, p. 395).



Figura 1. Erupción del Popocatepetl en 1509. Códice Telleriano Remensis (Espinasa-Pereña, 2014).

Dicha actividad se prolongó hasta el año 1593, en 1642 se registran emisiones de ceniza y actividad fumarólica. De 1663 a 1697 el volcán experimentar una erupción de mediana intensidad, con flujos de lava andesítica (De la Cruz, 1997).

En 1927 ocurrió una fuerte erupción, con expulsión de material piroclástico que ocasionó la formación de un domo de lava en el fondo del cráter. En 1993 incrementó su actividad con fumarolas y sismicidad. "En octubre de 1994, se registró un pico de energía sísmica" (Espinasa-Pereña & Martín-Del Pozzo, 2006, p. 102).

En marzo de 1996 nuevamente se registran emisiones de ceniza e índices importantes de sismicidad que apuntaban a movimiento de magma de forma gradual; se identifica un cuerpo creciente de lava en el interior del cráter y el 30 de abril de ese año sufre una exhalación explosiva. "La expulsión provoca lluvia de ceniza en las comunidades vecinas como Xalitziñtla y San Nicolás de los Ranchos y los piroclastos son lanzados a distancias considerables en las inmediaciones del volcán" (Espinasa-Pereña & Martín-Del Pozzo, 2006, p. 119).

Un evento explosivo con altas columnas de ceniza y fragmentos de pómez ocurrió el 30 de junio de 1997 entre las 18:11 y las 19:26 (tiempo local). En pocos minutos la columna eruptiva alcanzó 13 km de altura, un evento explosivo con columnas de ceniza y en las siguientes horas se reportaron lluvias de ceniza en estados vecinos como México e inclusive Cuernavaca; el material sólido fue lanzado en un radio de 10 km con una concentración importante al norte de la estructura, en su mayoría fragmentos de pómez de hasta 10 cm y también fueron expulsadas rocas de varios decímetros en los flancos del volcán. El cuerpo de lava descubierto en 1996 fue destruido en su mayoría por esta explosión, pero el 4 de julio se pudo apreciar que un nuevo cuerpo de lava comenzaba a aparecer sobre los restos del anterior.

De 1997 a 2000, estudios del CENAPRED (2012) revelaron la formación de cuatro domos que fueron destruidos por actividad explosiva en el último mes del 2000 y por lo cual 40,000 habitantes fueron evacuados, ya que fragmentos de rocas salieron como proyectiles a 5 km del cráter y la actividad volcánica aumentaba. El volumen de lava que se acumuló en el interior del cráter se estimaba entre 15 y 19 millones de metros cúbicos y presentaba un crecimiento

MATERIALES Y MÉTODOS

importante con respecto al tiempo transcurrido. "A mediados de diciembre, tuvieron lugar tres erupciones de mediana intensidad, con columnas de ceniza moderadas y material incandescente lanzado a pocos kilómetros del cráter" (Espinasa-Pereña & Martín-Del Pozzo, 2006, p. 102).

En enero de 2001 se presentaron exhalaciones de vapor de agua seguidas por flujos piroclásticos de ceniza que entraron en contacto con el glaciar El Fraile, generó un lahar que descendió aproximadamente 15 km. Desde ese año hasta el 2011 crecieron y se destruyeron 35 domos; el año 2011 empezaría con expulsión de material incandescente emitido hasta aproximadamente 500 metros en el flanco este del volcán.

Desde el mes de febrero hasta septiembre de 2001 hubo diariamente 100 exhalaciones de baja intensidad, posteriormente disminuyeron y se aceleraron con eventos sísmicos de baja magnitud para así dar lugar a la formación del domo 34 que habría sido destruido en noviembre de ese año por una explosión donde el volcán emitió roca basáltica y columnas de ceniza que alcanzaron los 2 km, se observaron fumarolas en las laderas externas que indicaban una sobrepresión; el sistema de detección de anomalías térmicas (MODVOLC) de la Universidad de Hawái (HIGP, s. f.) localizó puntos calientes en el cráter del volcán, lo cual se asoció con un emplazamiento del domo que el 9 de diciembre llegaría a su fin con una explosión de material incandescente. Los tremores duraron hasta el 18 del mismo mes y una semana después el Sistema MODVOLC apagó la alarma, lo que indica el fin de ese proceso eruptivo.

A partir del año 2012 su actividad ha sido continua por esa razón. El objetivo de este trabajo es analizar la modificación del perímetro del cráter por la actividad del volcán, para ello se empleará la fotogrametría, que permite obtener medidas fidedignas a partir de fotografías aéreas que reúnen requisitos prefijados, con el objeto de determinar características métricas tales como tamaño, forma y posición, como también producir una representación precisa del objeto fotografiado enfocándose en la medición de exhalaciones mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) que fue diseñado para almacenar, capturar, analizar y manipular la información referenciada geográficamente y como herramienta auxiliar se utilizará una cámara.

Para el análisis y el seguimiento fumarólico se utilizaron técnicas fotogramétricas terrestres y satelitales, una cámara activa las 24 h del día permite la vigilancia visual que consiste en observar las manifestaciones físicas del volcán, tales como derrumbes o deslaves, deformaciones, fumarolas, emisiones de ceniza y gases o cualquier otra que indique cambios perceptibles. Para realizar este monitoreo se instaló una cámara de video en Calpan (CBTA 255), la cual envía directamente información para la generación de una base de datos para el análisis estadístico. Para el análisis del cráter se aplicaron sistemas de información geográfica de última generación. Además se contó con información documentada de CENAPRED y se emplearon herramientas libres de la Universidad de Hawái y de distintos sitios web como el United States Geological Survey (USGS, s. f.) y el EARTHQUAKE8.

Análisis de la actividad fumarólica

El estudio de las fumarolas se realizó gracias a la instalación de una cámara de monitorización que tiene su estación principal en el municipio de Calpan, Puebla (19.06° N, 98. 27° O). Se trata de un circuito cerrado que proporciona la imagen en tiempo real del volcán Popocatepetl, medio por el cual se hace constante vigilancia y permite la obtención de fotografías para su estudio. La distancia entre donde se encuentra instalada la cámara y el volcán es de 21.1 kilómetros, según la medición con la herramienta de Google Earth. El análisis que se muestra a continuación se llevó a cabo entre agosto y diciembre de 2016.

Se aplicó técnica fotogramétrica para medición de fumarolas, se estableció un factor de escala variable, ya que el tamaño de las imágenes proporcionadas por la cámara en ocasiones no era constante (movimiento) debido a fenómenos meteorológicos. Como referencia para sacar el factor de escala se tomó la altura del volcán (5426 m.s.n.m.), a partir de ese dato se determinó la altura de las fumarolas registradas en el lapso previamente señalado. Sin embargo, es importante señalar que existe un rango de incertidumbre en las mediciones debido a la capacidad panorámica de la cámara, que en caso de fumarolas de gran tamaño como las que se exponen más adelante resulta con un faltante de aproximadamente 2,000 metros. Para lograr el análisis de manera precisa, estos datos fueron cotejados con los expuestos por el CENAPRED.

Metodología empleada para el año 2012

Mediante el programa ArcGis y con la imagen LANDSAT obtenida de la plataforma USGS se comenzó el proceso con la georreferencia de la imagen, se aplicó el datum WGS84 y se creó así un nuevo archivo SHAPE, con la característica de polígono, se le asignó un nombre de referencia. Con la herramienta de Editar se delimitó el cráter para crear un polígono que permitió al programa analizar la información contenida en la imagen y así poder obtener los datos necesarios como perímetro y área (figura 2).

Metodología empleada para el año 2013

El proceso para el análisis fue el mismo que se explicó anteriormente. La imagen de satélite rapideye fue obtenida de la plataforma PLANET (s. f.) y se referenció al datum WGS84. Posteriormente se trazó un polígono delimitando el cráter

Metodología empleada para el año 2014

En este proceso se utilizaron imágenes LANDSAT, fue obtenida de la plataforma USGS, y en las figuras que se muestran a continuación se puede observar que se llevó a cabo el mismo procedimiento que en los anteriores análisis.

Metodología empleada para el año 2015

Se utilizaron imágenes *rapideye* de la plataforma PLANET y las figuras que se muestran a continuación describen el procedimiento que se llevó a cabo, que es idéntico al descrito en los años anteriores.

Metodología empleada para el año 2016

Por último, la imagen de este año fue obtenida por la plataforma PLANET y analizada de la misma manera que las anteriores, como se puede observar en las siguientes imágenes.

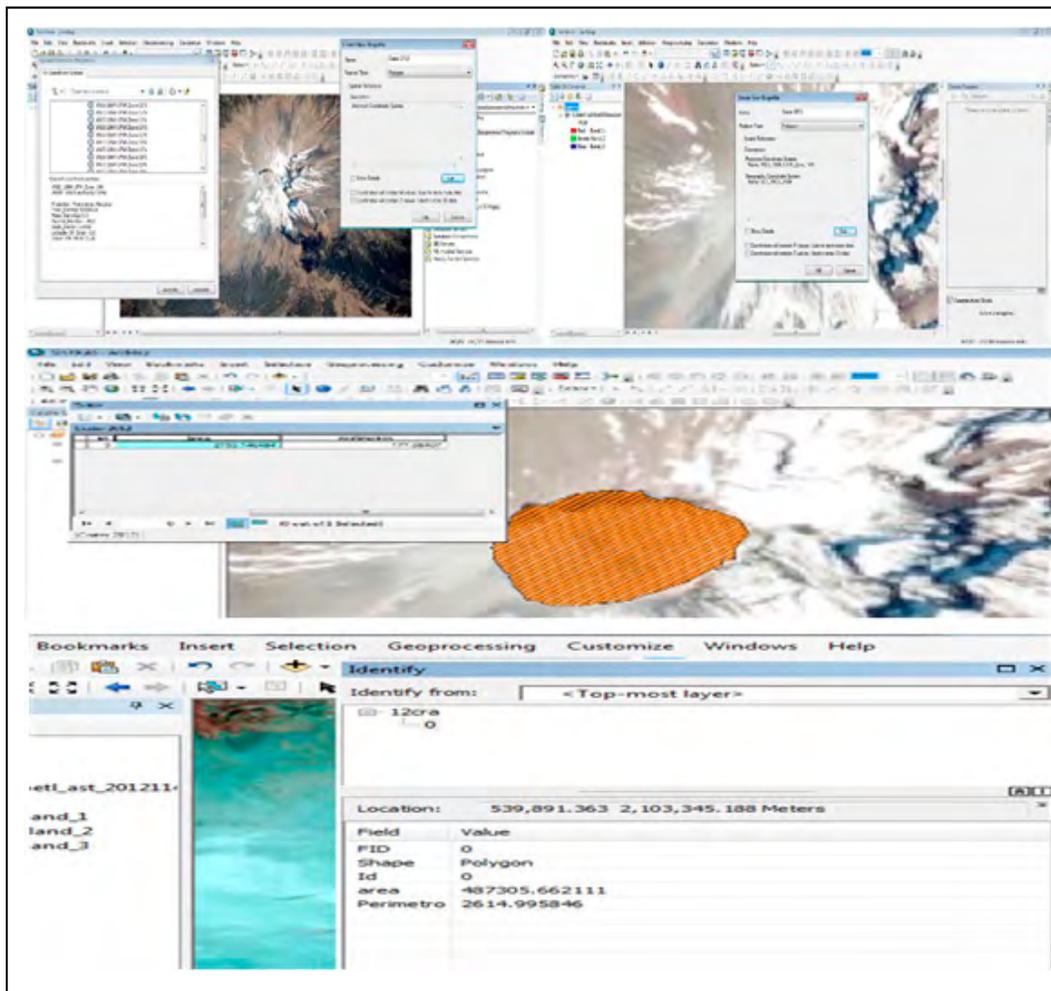


Figura 2. Proceso para obtener el perímetro y área del cráter y determinar las deformaciones de los últimos años. Elaboración propia.

Tabla 1
Tabulación de datos recabados con el estudio de las imágenes

Fecha	Hora	Altura (m)	Tipo de fumarola	Orientación
09/14/2016	02:27:37	1716,91	Vapor de agua	Noreste
09/23/2016	07:01:33	1961,91	Vapor de agua	Noreste
09/23/2016	07:50:20	1356,77	Vapor de agua	Noreste
09/23/2016	07:50:59	1428,77	Vapor de agua	Noreste
09/23/2016	08:35:41	1096,36	Vapor de agua	Noreste
09/23/2016	08:50:28	1298,32	Vapor de agua	Noreste
10/10/2016	08:14:52	1693,45	Vapor de agua	Norte
10/10/2016	08:23:10	1492,53	Vapor de agua	Norte
10/10/2016	09:05:26	2927,66	Vapor de agua	Norte
10/10/2016	10:23:04	1291,61	Vapor de agua	Noreste
10/11/2016	05:05:47	-	Incandescencia	-
10/11/2016	07:15:23	1090,70	Vapor de agua	Norte
10/11/2016	09:03:24	1865,67	Vapor de agua	Norte
10/13/2016	05:19:43	-	Incandescencia	-
10/23/2016	04:26:04	-	Incandescencia	-
10/23/2016	05:45:33	-	Incandescencia	-
10/23/2016	08:03:35	3572,46	Vapor de agua	Norte
10/23/2016	08:55:57	2904,44	Vapor de agua	Norte
10/23/2016	09:17:24	2671,56	Vapor de agua	Norte
10/23/2016	10:49:37	2672,09	Vapor de agua	Norte
10/23/2016	10:59:25	2933,49	Vapor de agua	Norte
10/23/2016	11:06:43	1423,18	Vapor de agua	Noreste
10/24/2017	07:47:48	-	Vapor de agua	Noreste
10/25/2017	05:05:45	-	Incandescencia	-

Nota: Elaboración propia.

RESULTADOS

Base de datos

En la tabla 1 se presenta la base de datos con la fecha, hora, altura en metros, tipo de fumarola observada (vapor de agua, ceniza, incandescencia) y dirección de la fumarola con respecto a la dirección del viento.

Bimestre: agosto-septiembre. Este periodo de exhalaciones comenzó el 25 de agosto, cuando el volcán emitió columnas de ceniza que rápidamente se dirigieron al noreste por la dirección de los vientos y la baja intensidad de la fumarola. Desde las 7:10 h hasta las 8:07 h (figura 3) aproximadamente, la columna observada que obtuvo una altura inicial

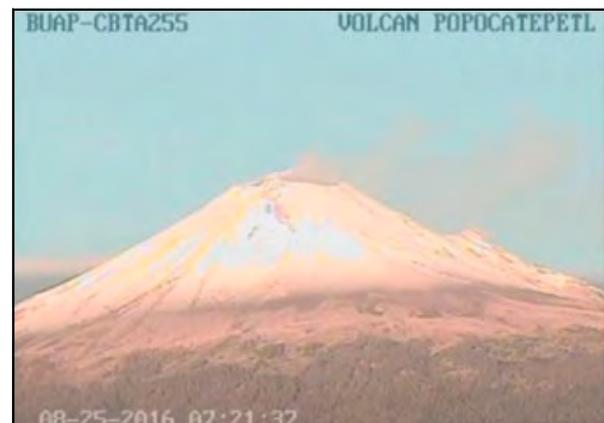


Figura 3. Exhalación de ceniza ocurrida el 25 de agosto con una altura de 1,273 m. Elaboración propia.

de 1,583 m se disipó con una mediana rapidez hasta los 1,273 m, lo que llevó a suponer que la actividad fumarólica había concluido. Esto fue desmentido una hora después, cuando el volcán experimentó una exhalación de vapor de agua que se elevó a los 1,432 m con la misma dirección.

Después de esto la actividad disminuyó hasta las 18:08 h (figura 4), después hubo una fumarola de ceniza que emergió a la superficie con una presión considerable ya que a pesar de los vientos que se dirigían al noreste, la columna se levantó con una altitud de 3,509 m hacia el norte, para después y a medida que la actividad volvió a disminuir, disiparse.



Figura 4. Exhalación de ceniza del día 25 de agosto con una altura de 3,509 m. Elaboración propia.

Le siguieron emanaciones que alcanzaron más de 3,000 m de altitud, pero la liberación de energía fue mínima, por lo que éstas se disipaban rápidamente y no fue necesario alertar a las poblaciones que colindan con el volcán. Esta actividad se caracterizó por fumarolas de vapor de agua con un registro de al menos 20 exhalaciones a lo largo del día, en la última semana de agosto. Una comparación de la actividad registrada a lo largo del mes se puede apreciar en la figura 5.

Mientras que el mes de septiembre no se presentó mucha actividad, destacada la que ocurrió el día 23, alrededor de las siete de la mañana con una columna de vapor de agua que alcanzó aproximadamente los 2,000 m de altitud (figura 6). El resto del día el volcán siguió exhalando vapor de agua que no alcanzó la

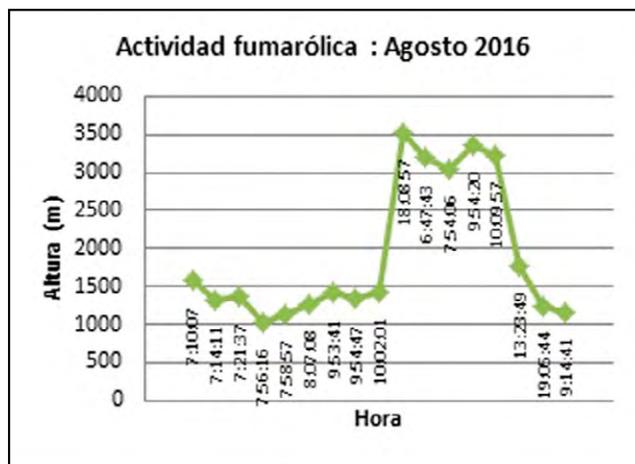


Figura 5. Puntos bajos y mínimos de actividad fumarólica de agosto. Elaboración propia.

altitud previamente señalada, con una dirección al noroeste y una dispersión de mediana rapidez. Esta actividad se pudo deber al clima que afectó la zona, provocando una nevada en la punta del volcán, con probable filtración de agua que desencadenaría las exhalaciones posteriores.

El resto del mes no se presentaron eventualidades y la actividad disminuyó de manera considerable. El sistema de monitoreo visual no reconoció ninguna exhalación, por tanto, no hubo alertas que pudieran indicar un nuevo evento eruptivo; en la figura 7 se puede apreciar la actividad que se presentó a lo largo del mes de septiembre y con la herramienta de la Universidad de Hawái, MODVOLC, se pudo constatar que no se registró algún punto caliente, con lo que el bimestre finalizó sin actividad significativa.

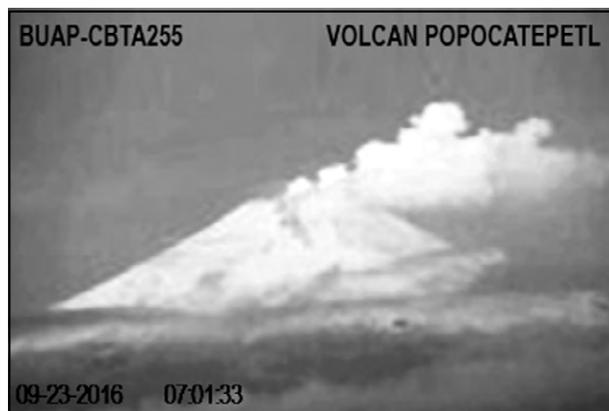


Figura 6. Exhalación de vapor de agua el día 26 de septiembre que alcanzó los 2,000 m. Elaboración propia.

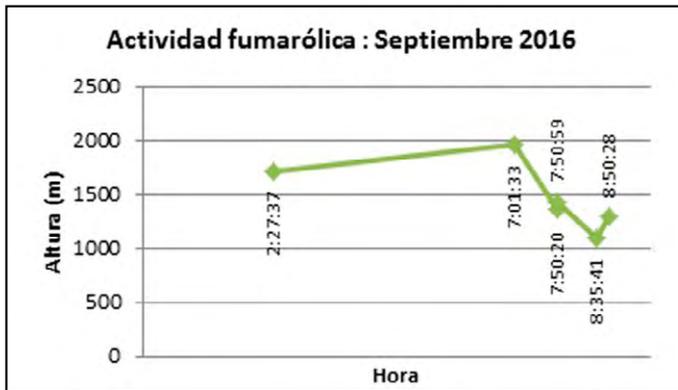


Figura 7. Se muestran los puntos bajos y altos de actividad fumarólica de septiembre. Elaboración propia.

Bimestre: octubre-noviembre. Fue el bimestre con mayor actividad volcánica, se registraron incandescencia y fumarolas importantes. Si bien el cambio de septiembre a octubre fue paulatino; la segunda semana de octubre, el día 10 aproximadamente a las 8:14 h, comenzó con una exhalación de vapor de agua que alcanzó hasta los 2,927.66 metros a las 9:05 h (figura 8), sin disiparse rápidamente, por lo cual por varios minutos la columna se extendió hacia el norte para después difuminarse al noreste. En la tarde se pudo apreciar incandescencia en el cráter del volcán y en la noche se podía apreciar de nuevo una exhalación pequeña de vapor de agua. De manera similar transcurrieron los días siguientes, con una actividad importante de incandescencia en el cráter y exhalaciones de baja intensidad de vapor de agua.



Figura 8. Exhalación de vapor de agua a las 9:05:26 h del día 10 de octubre. Elaboración propia.

Sin embargo, el 23 del mismo mes el volcán liberó energía con una exhalación de vapor de agua que se elevó hasta los 3,572.46 m (figura 9) y que se mantuvo en una altitud considerable en el transcurso aproximado de tres horas, además de conservar la dirección norte, y a las 11:06 h, que comenzó a disminuir la actividad fumarólica, con dirección al noroeste (figura 10).



Figura 9. Exhalación de vapor de agua que ocurrió el día 23 de octubre, de 3,572 m. Elaboración propia.



Figura 10. Cambio de dirección al noroeste de la exhalación de vapor de agua del día 23 de octubre. Elaboración propia.

Ese día en el sistema MODVOLC figuró un punto caliente (figura 11) en el volcán, por lo cual se puede relacionar este evento con la actividad de la cual se tuvo registro.

En el curso del mes la incandescencia seguía constante en el cráter del volcán. Hubo emisión de material, fragmentos basálticos que no eran proyectados muy lejos del cráter, por lo cual no fue necesario realizar evacuaciones de las poblaciones cercanas en el transcurso del mes. El mayor número

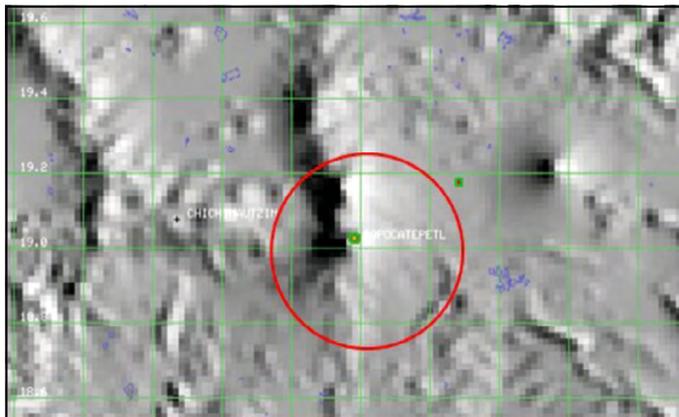


Figura 11. Aparición de un punto caliente en el volcán según la herramienta MODVOLC. Elaboración propia.

de exhalaciones registradas en la última semana del mes fue de 237 el día 28, la mayoría consistieron en vapor de agua y muy poca ceniza fue arrojada. Sin embargo, el día 30 fue cuando se registraron en un lapso más prolongado de tiempo tremores de baja intensidad aproximadamente por 472 minutos acompañados de incandescencia (figura 12).



Figura 12. Incandescencia en el cráter del volcán capturada el día 30 de octubre. Elaboración propia.

La actividad se resumía a los tremores y exhalaciones de baja intensidad para finalizar así el mes de octubre (como se muestra de manera comparativa en la figura 13) y comenzar noviembre con exhalaciones de baja intensidad e incandescencia que se apreciaba a altas horas de la noche y las madrugadas de las primeras dos semanas del mes (figura 14).

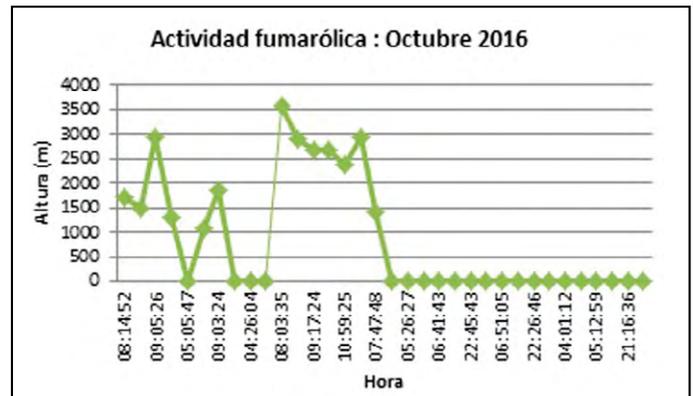


Figura 13. Tabla de dispersión de la actividad fumarólica de octubre. Elaboración propia.

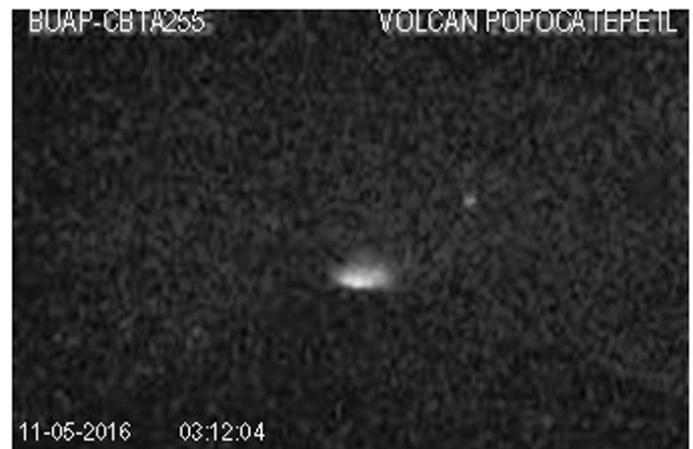


Figura 14. Incandescencia durante la primera semana de noviembre. Elaboración propia.

En la figura 15 se aprecia lo que el día 24 se registraba según el CENAPRED (2016):

16 eventos vulcano-tectónicos que fueron antecedente al pico máximo de actividad volcánica mostrado el día 25, cuando se tuvo registro de por lo menos 324 exhalaciones antes de una erupción de gases volcánicos y ceniza que se registró a las 9:45 h

La columna se levantó con una altitud máxima de 5 km, la de mayor alcance en el transcurso del año y que tomó dirección al noreste, lo que resultó en caída de ceniza y alarma por material incandescente arrojado a metros del cráter.

El Sistema MODVOLC arrojó una señal de punto caliente en el volcán como se muestra en la figura 16.

El seguimiento dado por el sistema de monitoreo durante los siguientes días concluye que la actividad



Figura 15. Exhalación de gases volcánicos y ceniza a las 9:45 h del día 25 de noviembre. Elaboración propia.



Figura 17. Columna eruptiva de ceniza y vapor de agua del día 29 de noviembre con elevación de hasta 2 km. Elaboración propia.

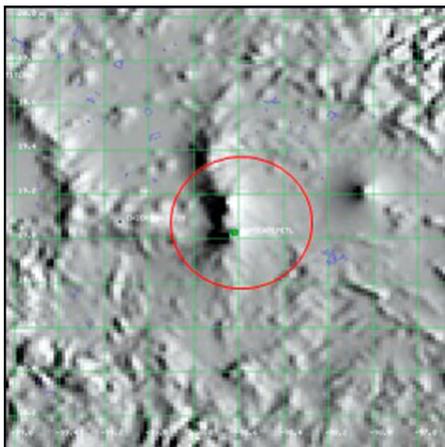


Figura 16. Punto caliente registrado por MODVOLC. Elaboración propia.

regresó a lo que se tenía registrado antes del 25, con incandescencia en el cráter y un máximo de 160 exhalaciones de baja intensidad en su mayoría vapor de agua y gas; el día 29 se volvió a registrar actividad fumarólica considerable, aunque no de la magnitud que se mostró días antes. La columna se elevó hasta los 2 km, sus características fueron vapor de agua y en su mayor parte ceniza. También arrojó material incandescente, aunque a una distancia corta del cráter (figura 17).

Cabe destacar que el punto caliente que detectó el sistema MODVOLC no ha desaparecido y se mantenía hasta el día 5 de febrero de 2017, lo que indica un flujo constante de magma acumulándose, no se deben descartar erupciones de magnitud moderada como las que se observaron el día 25 o 29.

En la siguiente gráfica se muestra una comparación de la actividad fumarólica descrita anteriormente, donde se aprecia un flujo importante en la última semana de noviembre (figura 18).

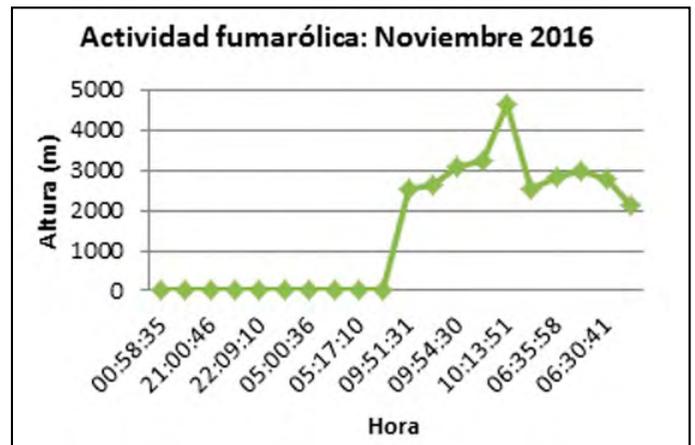


Figura 18. Tabla de dispersión de la actividad fumarólica de noviembre. Elaboración propia.

De la misma manera se presenta una gráfica para comparar la actividad entre los meses de agosto y noviembre, donde se observan los cambios en la actividad que ha experimentado el volcán Popocatepetl (figura 19).

Análisis del cráter

El análisis del cráter se llevó acabo por medio de imágenes satelitales *rapideye* y Landsat 8, obtenidas mediante las plataformas PLANET y USGS, respectivamente. Se realizó el análisis de los años 2012 hasta 2016 haciendo uso del programa

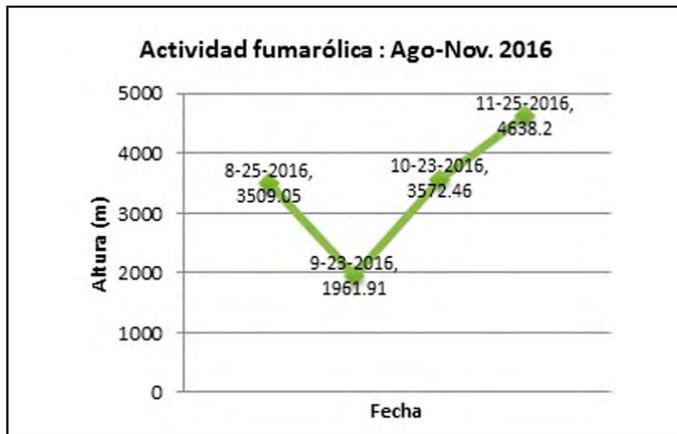


Figura 19. Tabla de dispersión de la actividad fumarólica desde agosto hasta noviembre. Elaboración propia.

ArcGis para la obtención de perímetro y área del cráter para determinar las modificaciones que han acontecido en estos años.

A pesar de que en 1994 se reinició la actividad volcánica, no fue sino hasta 1996 que el Popocatepetl empezó a sufrir modificaciones en su cráter con la creación y subsecuente destrucción de domos. El registro hasta 2003 fue de aproximadamente 27 domos emplazados en el interior del cráter; sin embargo, esta actividad se redujo para 2005, que duró cuatro años, hasta que en 2009 se volvió a detectar el crecimiento de domos.

Generalmente, a la formación de un domo le anteceden períodos de actividad sismo-volcánica, posteriormente inicia el crecimiento y existen exhalaciones de vapor de agua, gases y cenizas volcánicas. Esto se ha podido observar en el último cuatrimestre del año (2016), donde los sensores han identificado incluso puntos calientes en el volcán y la última exhalación de gran intensidad se llevó a cabo en noviembre.

Año 2012. Se delimitó el cráter para crear un polígono que permitió al programa analizar la información contenida en la imagen y así poder obtener los datos necesarios como el perímetro y área. Desplegando la opción de Identify, el SIG calculó el perímetro de 2,615 metros y el área de 457,305.66 m².

Año 2013. El resultado fue de 2,365.0 m de perímetro y de área 433,691.25 m², se encontró una disminución comparado con 2012 por la formación del domo número 48 que comenzó a formarse de julio a noviembre de ese año.

Año 2014. Para este año por la constante actividad generó una lectura en su perímetro de 2,254.38 m del cráter, mientras que su área resultó en 432,420.31 m² de acuerdo con el CENAPRED; durante los primeros meses de 2014 se registró la formación y destrucción de dos domos, el número 50 siendo destruido por una explosión que se llevó a cabo el mes de julio de ese año. Sin embargo, para agosto se tuvo la confirmación de la formación del domo número 51 y a partir de ese mes hasta diciembre el monitoreo indicaba las subsecuentes destrucciones hasta la formación del domo 54, con la que finalizó el año.

Año 2015. De acuerdo con las mediciones realizadas por el SIG fue de 2,115.10 m para el perímetro y 415,472.32 m² para el área, la actividad volcánica-tectónica aumentó considerablemente, lo que dio como consecuencia que apenas en febrero de ese año se llevara a cabo la destrucción del domo 54 y la formación del número 55; a partir de ese momento se tuvo registro de 4 domos más y entró 2016 con la formación del número 59.

Año 2016. Los resultados finales del análisis de este año proyectaron un perímetro de 2,376.948 m y un área de 410,144 m²; estos nuevos datos se deben a la emanación y acumulación de nuevo material y a que en el transcurso del año se registraron emplazamientos de 11 domos, comprendidos en los meses de enero a octubre, ya que en noviembre el CENAPRED dio a conocer la formación del domo número 71. Con el análisis de la actividad fumarólica se puede concluir que la explosión que se llevó a cabo en noviembre fue un detonante para que el cráter sufriera una disminución en su perímetro, que da como resultado lo expuesto en este documento.

DISCUSIÓN

Se ha visto que la geodinámica del volcán Popocatepetl ha sido constante desde 1994, durante el año 2016 su actividad creció en parámetros fumarólicos y sísmicos, el seguimiento técnico de la geomorfología de la estructura volcánica corroboró el tipo de desarrollo conocido como estratovolcán y su tipo de erupción moderada que tiene la capacidad de permanecer en calma por periodos largos o evolucionar hacia fases más peligrosas. Cabe mencionar que el perímetro del cráter se ve modificado por la actividad del volcán y la acumulación constante de material piroclástico alrededor del cráter, lo que produce que en ocasiones las lecturas del perímetro y cráter varíen.

El cráter del volcán se ha visto deformado desde 1994, pasando de ser un cono casi perfecto de 900 m de diámetro a 760 m, y de una profundidad que tenía en su labio inferior de 360 m a casi 155 m. Estos datos calculados hasta diciembre de 2016.

En cuanto a los riesgos por derrumbes y flujos de lodo, podrían darse si una parte del edificio volcánico se colapsara o el único glaciar existente entrara en contacto térmico con el material expulsado, lo cual causaría en un escenario caótico un gran derrumbe cuyo material se desplazaría a una velocidad de 100 km por hora hasta una distancia de aproximadamente 80 km, destruyendo todo a su paso. Durante los últimos 40,000 años se produjeron dos grandes derrumbes hacia el sur del volcán que cubrieron áreas extensas. "Una erupción grande o un derrumbe gigante estaría acompañado de flujos de lodo e inundaciones de gran alcance" (Marcial, 1996, p. 53).

CONCLUSIONES

El presente trabajo pretende contribuir al área de geomorfología volcánica en la prevención de alguna actividad mayor del volcán, la importancia de un análisis de estas características se hace relevante con la afirmación de que si la tasa de crecimiento de los domos supera la tasa de destrucción, esto podría tener como consecuencia que el nivel de los domos pudiera superar el del cráter y el resultado sería una amenaza mucho más grande: formación de flujos calientes de bloques, lava y ceniza. Un flujo de lava sería el mejor de los escenarios.

El impacto de los daños depende de la energía acumulada, pero después de todo el análisis fotogramétrico realizado durante 2016 se puede

concluir que el volcán Popocatepetl cruza por uno de sus momentos de actividad más intensa. En el último cuatrimestre del año mostró un aumento considerable en la actividad fumarólica que resultó en una de las explosiones más fuertes registradas en los últimos años, con ceniza y diversos gases volcánicos que precedieron la formación del domo número 71.

Con la ayuda de fotogrametría, software especializado e imágenes satelitales, se cumplieron los objetivos de este trabajo, fue un estudio a fondo, de donde se concluye que la fumarola más grande presenciada en el periodo agosto-noviembre fue la del día 25 del mes de noviembre, con una altura en metros de 4,638.2, de ceniza en su mayor parte y con dirección al noreste; mientras que el análisis del cráter dio como resultado una mayor transformación en el mismo durante 2016, cuando se tomó registro de un mayor número de domos con su subsecuente pero no total destrucción y que alteró en su mayoría los alrededores del cráter.

En una observación adicional, el día 15 de diciembre de 2016 a las 15:00 h, el CENAPRED anunció que el domo número 71 fue destruido por una fuerte explosión seguida de exhalaciones de ceniza y gases volcánicos; sin embargo, las autoridades pertinentes declararon que esto no significaría un cambio en el semáforo del volcán.

Como nota final cabe señalar que en el periodo comprendido desde octubre de 2016 hasta octubre de 2017 la actividad del volcán ha sido muy relevante, en 2017 ha presentado actividad constante de emanación de fragmentos de roca incandescente, ceniza y pequeñas cantidades de lava durante la mayor parte del tiempo.

REFERENCIAS

- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2001). *Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria* [Reporte]. Recuperado de <http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/parte1.pdf>
- _____ (2012). *Resumen de la actividad del volcán Popocatepetl de diciembre de 1994 a mayo de 2001* [Informe]. Recuperado de <http://www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/Resumen/>
- _____ (2016). *Monitoreo Volcánico Popocatepetl* [Página informativa]. Recuperada de <http://www.cenapred.gob.mx:8080/monitoreoPopocatepetl/>
- De la Cruz, S. (1997). *Historia eruptiva del volcán Popocatepetl* (pp. 20-22). [Ponencia]. CENAPRED.
- Demant, A. (1978). Características del eje neovolcánico transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México*, 2(2), 172-187.

- Espinasa-Pereña, R. (2014). *Historia de la actividad del volcán Popocatepetl. 17 años de erupciones* (65 pp.). México: CENAPRED. Recuperado de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/225-HISTORIADELAActividadDELVOLCANPOPOCATPETL-17AOSDEERUPCIONES.PDF>
- Espinasa-Pereña, R., & Martín-Del Pozzo, A. L. (2006). Morphostratigraphic evolution of Popocatepetl volcano, México. En C. Siebe, J. L. Macías, & G. J. Aguirre Díaz (Eds.), *Neogene-Quaternary continental margin volcanism: A perspective from Mexico: Geological Society of America Special Paper 402* (pp. 101-123). US: Geological Society of America. doi: 10.1130/2006.2402(05)
- Hawaii Institute of Geophysics & Planetology. (s. f.). *MODVOLC, Near- real- time thermal monitoring of global hot-spots* [Portal electrónico de consulta]. Recuperado el 23 de octubre de 2017, de <http://modis.higp.hawaii.edu/cgi-bin/modisnew.cgi>
- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 379-424.
- Marcial, J. (1996). Popocatepetl. Vivir en riesgo. *Ciencias*, 41(enero-marzo), 50-55. [En línea]. Recuperado de <http://www.revistaciencias.unam.mx/pt/148-revistas/revistaciencias-41/1225-popocat%C3%A9petl-vivir-en-riesgo.html>
- Planet. (s. f.). Welcome to the insights economy [Portal electrónico con imágenes en movimiento]. Recuperado de <https://www.planet.com/>
- United States Geological Survey. (s. f.). *EarthExplorer* [Portal electrónico de consulta]. Recuperado el 23 de octubre de 2017, de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Campbell, J. B. (2002). *Introduction to remote sensing* (pp. 20-59). US: CRC Press.
- Cortés-Ramos, J., & Delgado-Granados, H. (2012). The recent retreat of mexican glaciers on Citlaltépetl Volcano detected using ASTER data. *The Cryosphere Discussions*, 6, 3149-3176.
- Dóniz, F. J. (2002). El volcanismo basáltico de la dorsal de Pedro Gil en la isla de Tenerife. *Papeles de Geografía*, 35, 101-114.
- García, F., Ramos, E., & Domínguez, R. (1996). Posible flujo de lodo en el costado oriente del volcán Popocatepetl. En *Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995* (pp. 109-119). México: Sistema Nacional de Protección Civil-Centro Nacional de Prevención de Desastres-Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ontiveros, G., Delgado, H., & Cortés, J. (sometido a dictamen para publicación). The surface energy balance of Glaciar Norte on Citlaltépetl volcano, Mexico during 2006-2009. *Geofísica Internacional*.
- Palacios, D., & Vázquez-Selem, L. (1996). Geomorphic effects of the retreat of Jamapa glacier, Pico de Orizaba volcano (Mexico). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 78, 19-34.
- Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., González-Castelán, Y. J., & Montiel-Peralta, B. A. (2005). Monitoreo y vigilancia del volcán Citlaltépetl o Pico de Orizaba (análisis geomorfológico). *Revista Geofísica*, 61, 33-45.
- Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Montiel-Peralta, B. A., González-Castelán, Y. J., & Rodríguez-Marcos, A. (2008). Análisis fotogramétrico del volcán Citlaltépetl. *Revista Cartográfica*, 84, 105-116.
- Ramos-Aguilar, R., Máximo-Romero, P., Soto-Cruz, B. S., Alcántara-Iniesta, S., & Vázquez-García, M. C. (2014). Análisis geostatístico de las barrancas Colorada y Quimichule del volcán Popocatepetl (México) como aporte a la prevención de desastres naturales. *Investigaciones Geográficas*, 47, 67-82.
- Schenk, T. (2002). *Fotogrametría digital (Geomática Vol. I)*. España: Marcombo-ICC.

OTRAS FUENTES

Bibliografía

- Bolla, G. L., Cassano, A. M., & Franco, J. M. (2009). *Estabilidad de barrancas sobre el río Paraná-Modelado por Métodos Numéricos* (119 pp.). Paraná: Universidad Tecnológica Nacional.

Recuperación de la función de Green mediante ruido sísmico

Recovering the Green function by means of seismic noise

Francisco José Sánchez-Sesma*, Manuel Carbajal-Romero**; José Efraín Rodríguez-Sánchez***, Rafael Ávila-Carrera***, Alejandro Rodríguez-Castellanos***✉

Sánchez-Sesma, F. J., Carbajal-Romero, M., Rodríguez-Sánchez, J. E., Ávila-Carrera, R., & Rodríguez-Castellanos, A. (2018). Recuperación de la función de Green mediante ruido sísmico. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 49-57.

RESUMEN

Recientemente se ha demostrado que la recuperación de la función de Green puede realizarse a partir de ruido sísmico. Esta función es la característica fundamental del medio donde se propagan las ondas sísmicas. En este trabajo se plantea una formulación –para el caso 2D– que permite la recuperación de la función de Green a partir de ruido sísmico. Se estudian varios tipos de medios homogéneos caracterizados por sus velocidades de propagación y relación de Poisson. Adicionalmente, para el caso bidimensional, donde se propagan solamente las ondas P y SV, se discuten y comprueban las contribuciones de energía de correspondiente a cada tipo de onda sísmica. Para grandes relaciones de Poisson (e.g. $\nu = 0.50$) las ondas P tienden a desaparecer y las ondas SV contribuyen con casi 100% de la energía. Para una relación de

Poisson de $\nu = 0.25$ la onda P contribuye con 25% a la energía total y la onda SV con 75%.

ABSTRACT

It has recently been shown that the recovery of the Green function can be performed from seismic noise. This function is the fundamental characteristic of the medium where seismic waves propagate. In this work a 2D formulation is proposed which allows the recovery of the Green function from seismic noise. Several homogenous media characterized by their propagation velocities and Poisson ratio are studied. In addition, for the two-dimensional case, where only P and SV waves are propagated, the energy contributions corresponding to each type of seismic wave are discussed and verified. For high Poisson ratios (e.g. $\nu = 0.50$) P waves tend to disappear and SV waves contribute almost with 100% of the energy. For a Poisson ratio of $\nu = 0.25$ P wave contributes with 25% to the total energy and SV wave with 75%.

Palabras clave: relación de Poisson; ondas sísmicas; correlaciones de movimientos; sismogramas sintéticos; sismogramas recuperados; energía sísmica.

Keywords: poisson ratio; seismic waves; correlations of movements; synthetic seismograms; recovered seismograms; seismic energy.

Recibido: 27 de febrero de 2017, aceptado: 17 de octubre de 2017

* Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Escolar s/n, C. P. 04510, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Ciudad de México, México. Correo electrónico: sesma@unam.mx

** Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional Unidad Profesional Azcapotzalco. Av. de las Granjas 682, C. P. 02250, Col. Santa Catarina, Del. Azcapotzalco, Ciudad de México, México. Correo electrónico: manuel_carbajal@hotmail.com

*** Instituto Mexicano del Petróleo. Eje Central Lázaro Cárdenas 152, C. P. 07730, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México. Correo electrónico: ersanche@imp.mx; rcarre@imp.mx; arcastel@imp.mx

✉ Autor para correspondencia

INTRODUCCIÓN

La función de Green representa la característica fundamental de los medios donde se propagan las ondas sísmicas. Tal función representa la respuesta ante acciones que se ejercen de manera dinámica sobre el propio medio. Recientemente se han realizado experimentos enfocados en la recuperación de la función de Green a partir de ruido sísmico. Por hacer mención, Garus y Wegler (2011) emplearon una red de 10 estaciones pertenecientes a una red sísmológica en Alemania. Los autores concluyeron que a partir de su análisis de ruido sísmico no les fue posible recuperar la función de Green, aún para el tratamiento de 17 años de datos registrados. Sin

embargo, Ma y Beroza (2012) reportaron que sí fue posible la recuperación de la función de Green con registros recopilados con una duración incluso de seis meses, aun empleando datos que no fueron registrados de manera simultánea.

Los orígenes en el uso del ruido sísmico para estudiar la estructura de la Tierra se remontan a los trabajos pioneros de Aki (1957). Por otro lado, Sato y Fehler (1998) y Aki y Richards (2002) demostraron que el ruido sísmico posee valiosa información del medio de propagación debido a que realiza diversos muestreos recolectando características importantes tanto de su conformación como de sus propiedades. Por otra parte, Ryzhik, Papanicolau y Keller (1996) demostraron que la energía propagada en el ruido sísmico tiende a estabilizarse a valores constantes independientemente de los detalles en que la difracción se lleva a cabo.

En estudios posteriores, Campillo y Paul (2003) y Shapiro y Campillo (2004) establecieron que es posible realizar la recuperación de la función de Green mediante la correlación cruzada de movimientos sísmicos. Así también, estos autores expresaron que la precisión en la recuperación de la función de Green dependerá si el medio donde se propagan las ondas es equiparticionado y existe isotropía en las fuentes sísmicas.

Van Manen, Curtis y Robertsson (2006), Wapenaar (2004), y Weaver y Lobkis (2004) desarrollaron importantes identidades asociadas a la función de Green y a la correlación de movimientos sísmicos para medios homogéneos y heterogéneos. Estos estudios resaltaron que la función de Green que emerge a partir de las correlaciones es completa, simétrica en tiempo e incluye todas las difracciones referentes al medio de propagación.

El objetivo del presente trabajo es exponer un enfoque para el caso bidimensional (2D) para la recuperación de la función de Green a partir de simulaciones de ruido sísmico en medios homogéneos. Además, se muestra mediante la generación de sismogramas sintéticos exactos y recuperados la tendencia a valores constantes de la energía asociada a las ondas P y SV.

MATERIALES Y MÉTODOS

Asumiendo un campo de desplazamientos armónicos $u_i(x, \omega)$ –en un medio homogéneo– producido por una distribución de fuerzas de cuerpo $f_i(x, \omega)$ en un

medio elástico de volumen V , los desplazamientos deberán satisfacer la ecuación de onda elástica expresada en términos de la frecuencia como:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(c_{ijkl} \frac{\partial u_l(x, \omega)}{\partial x_k} \right) + \omega^2 \rho u_i(x, \omega) = -f_i(x, \omega) \quad (1)$$

donde ω es la frecuencia angular, c_{ijkl} es el tensor de constantes elásticas y ρ es la densidad de masa.

Si una fuerza unitaria es aplicada en un punto x_A , en dirección m , dicha fuerza se puede interpretar como $f_i(x, \omega) \equiv \delta(x - x_A) \delta_{im} e^{i\omega t}$. Donde el índice m es usado para especificar la dirección de la fuerza y, por tanto, los desplazamientos resultantes son dependientes de la función de Green, y adquieren la forma:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(c_{ijkl} \frac{\partial G_{im}(x, x_A, \omega)}{\partial x_k} \right) + \omega^2 \rho G_{im}(x, x_A, \omega) = -\delta(x - x_A) \delta_{im} \quad (2)$$

La función de Green $G_{im}(x, x_A, \omega)$ significa el desplazamiento en x en la dirección i producido por una fuerza puntual aplicada en x_A en la dirección m . Como puede verse en la ecuación (2), la función de Green es la respuesta del medio cuando es aplicada una fuerza unitaria en un punto. c_{ijkl} es el tensor de constantes elásticas y representa la relación entre las tensiones y las deformaciones de medios elásticos, principalmente depende de las propiedades de los materiales y δ_{im} es la delta de Kronecker. Si multiplicamos la ecuación (1) por $G_{im}(x, x_A, \omega)$, la ecuación (2) por $u_i(x, \omega)$ y realizamos la diferencia de ellas, resulta:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(c_{ijkl} \frac{\partial G_{im}(x, x_A)}{\partial x_k} \right) u_i(x, \omega) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(c_{ijkl} \frac{\partial u_l(x)}{\partial x_k} \right) G_{im}(x, x_A) = -\delta(|x - x_A|) u_m(x) + f_i(x) G_{im}(x, x_A) \quad (3)$$

Haciendo la integración sobre el volumen V delimitado por Γ y usando la fórmula de Gauss y las relaciones de reciprocidad, la ecuación (3) puede reescribirse como:

$$\int_{\Gamma} \left\{ n_j(x) \left(c_{ijkl} \frac{\partial G_{im}(x, x_A)}{\partial x_k} \right) u_i(x) - n_j(x) \left(c_{ijkl} \frac{\partial u_l(x)}{\partial x_k} \right) G_{im}(x, x_A) \right\} d\Gamma_x = -u_m(x_A) + \int_V f_i(x) G_{im}(x, x_A) dV_x \quad (4)$$

Note que ω ha sido omitida de aquí en adelante, debido a que su dependencia es entendida.

Debido a que x_A está localizado dentro de V , entonces podemos expresar a $t_i(x) = n_j(x) \left(c_{ijkl} \frac{\partial u_l(x)}{\partial x_k} \right)$

la tracción en el punto x , con normal asociada $n_j(x)$ en dirección i relacionada con los desplazamientos $u_l(x)$, lo que significa la tracción normal a la superficie o frontera del medio. Además, podemos definir a $T_{im}(x, x_A) = n_j(x) \left(c_{ijkl} \frac{\partial G_{lm}(x, x_A)}{\partial x_k} \right)$ como la tracción en un punto x , con normal $n_j(x)$ en dirección i , generada por una fuerza unitaria que es aplicada en el punto x_A en dirección m . Entonces ahora obtenemos:

$$u_m(x_A) = \int_{\Gamma} \{G_{im}(x, x_A)t_i(x) - T_{im}(x, x_A)u_i(x)\}d\Gamma_x + \int_V f_i(x) G_{mi}(x_A, x)dV_x \quad (5)$$

Esta ecuación es conocida como la identidad Betti-Rayleigh y como el teorema de la representación de Somigliana, y expresa la relación existente entre los desplazamientos internos con los desplazamientos y tracciones a lo largo de la frontera.

Si se considera que los desplazamientos y las tracciones son reversibles en el tiempo y se aplica una fuerza $f_i(x) \equiv \delta(x - x_B)\delta_{in}$ en un punto interno x_B en dirección n , entonces, la ecuación (5) es simétrica en tiempo y acepta soluciones que también lo son, conduciendo valores complejos conjugados en el dominio de la frecuencia de la forma $u_i(x) \equiv G_{in}^*(x, x_B)$ y $t_i(x) \equiv T_{in}^*(x, x_B)$. De tal forma, la ecuación (5) adquiere la forma:

$$\int_{\Gamma} \{T_{im}(x, x_A)G_{in}^*(x, x_B) - T_{in}^*(x, x_B)G_{im}(x, x_A)\}d\Gamma_x = -G_{mn}^*(x_A, x_B) + G_{mn}(x_A, x_B) \quad (6)$$

Si se intercambia x por ξ en la última ecuación para mostrar los puntos localizados en la frontera a lo largo de Γ , entonces podemos ahora expresarla como:

$$Im[G_{mn}(x_A, x_B)] = \frac{-\int_{\Gamma} \{G_{mi}(x_A, \xi)T_{in}^*(\xi, x_B) - G_{ni}^*(x_B, \xi)T_{im}(\xi, x_A)\}d\Gamma_{\xi}}{2i} \quad (7)$$

donde Im es la parte imaginaria del tensor de Green e i es la unidad imaginaria ($i = \sqrt{-1}$).

Por otra parte, si se considera que $u_m(x) = \int G_{mi}(x, \xi)\phi_i(\xi)d\Gamma_{\xi}$ es una representación integral (Sánchez-Sesma & Campillo, 1991), con densidades de fuerzas $\phi_i(\xi)$ a lo largo de Γ , si se asume que $\phi_i(\xi)$ y $\phi_j(\xi)$ son recíprocamente no correlacionadas, también que las funciones de Green de desplazamientos y tracciones son expresadas en términos de funciones asintóticas, es posible arribar a la siguiente ecuación:

$$\langle u_i(x_A)u_j^*(x_B) \rangle = -4E_S k^{-2} Im[G_{ij}(x_A, x_B)] \quad (8)$$

donde para el caso bidimensional (2D), $E_S = \rho\omega^2 S^2$ es el promedio de densidad de energía y S^2 es el promedio de densidad espectral de ondas asociadas a las ondas de corte. k representa el número de onda (para mayor detalle acerca de la obtención de la ecuación 8 a partir de la 7 favor de consultar Sánchez-Sesma, Pérez-Ruiz, Luzón, Campillo, & Rodríguez-Castellanos, 2008).

La última ecuación muestra la relación entre la correlación cruzada de los campos de desplazamiento y la parte imaginaria de la función de Green. Es importante notar que la ecuación (8) implica que la función de Green puede ser recuperada mediante la correlación de movimientos sísmicos; es decir, mediante registros de campo.

Adicionalmente, Sánchez-Sesma et al. (2008) demostró que en un medio infinito bidimensional se tiene una distribución fija de energía entre dos puntos (x_A y x_B) y que dicha energía se distribuye entre los dos tipos de onda que pueden propagarse en el medio (i.e. ondas P y SV). Para el caso de que se tengan los puntos A y B en la misma localización (i.e. $x_A = x_B$), la energía en ese punto puede expresarse como:

$$Im[G_{ij}(x_A, x_A)] = -\frac{1}{8\rho} \left(\frac{1}{\alpha^2} + \frac{1}{\beta^2} \right) \delta_{ij} = E_P^T + E_{SV}^T \quad (9)$$

Aquí se puede resaltar que la parte imaginaria del tensor de Green en un mismo punto (fuente-receptor) tiene un valor fijo y puede entenderse que la energía en cualquier dirección será siempre la misma y podrá representarse como la suma de E_P^T y E_{SV}^T (el superíndice T significa "valor teórico"). Esta ecuación (9) sugiere que la distribución teórica de la energía elástica tiene dependencia solamente de las velocidades de propagación α y β (i.e. velocidades de propagación de ondas P y SV, respectivamente). La relación entre las expresiones (8) y (9) es muy valiosa debido a que las correlaciones de movimiento sísmico están relacionadas con la función de Green (ecuación 8) y la función de Green está relacionada con la energía (ecuación 9). Por tanto, es posible expresar el contenido de energía con relación a las correlaciones de movimientos sísmicos.

Por otro lado, las contribuciones de energía asociadas a las ondas P y SV pueden extraerse

de los sismogramas teóricos y de los sismogramas recuperados resultantes de las correlaciones de movimiento, en términos de la siguiente ecuación:

$$E^T = E_P^T + E_{SV}^T \cong E_P^R + E_{SV}^R = \frac{\rho}{2} \left[\int G_{ij}^P dt + \int G_{ij}^{SV} dt \right]^2 \quad (10)$$

En la ecuación (10) los superíndices T y R representan la contribución a la energía teórica y recuperada relacionadas con las ondas P y SV, respectivamente.

Las ondas P son conocidas también como ondas primarias y son las más rápidas de las ondas sísmicas, generan movimientos de extensión y contracción en los sólidos y viajan en su interior; mientras que las ondas SV son conocidas como ondas secundarias y viajan a una velocidad menor que las ondas P. Estas ondas SV generan movimiento de corte, los cuales son perpendiculares a la dirección de propagación. Las ondas SV propagan mayor cantidad de energía que las ondas P. Otros tipos de ondas sísmicas son las superficiales, conocidas como de Rayleigh y de Love, las cuales viajan a velocidades aún menores que las ondas SV, pero que sus efectos –debidos a su energía– pueden ser catastróficos durante eventos sísmicos. El estudio de la energía asociada a las ondas superficiales no se encuentra dentro del alcance del presente trabajo. Sin embargo, serán el objeto de investigaciones futuras asociadas con las correlaciones de ruido sísmico.

Funciones de Green exactas para un medio bidimensional (2D)

En un medio homogéneo, isotrópico, elástico y sin fronteras, la función de Green bidimensional representa los desplazamientos y tracciones en un punto \mathcal{X} cuando una carga unitaria es aplicada en un punto ξ .

Si se asume la dependencia temporal-armónica: $e^{i\omega t}$, donde $\hat{i} = \sqrt{-1}$, ω , es la frecuencia circular y t es el tiempo, el desplazamiento en la dirección i cuando la carga es aplicada en la dirección j puede ser expresada como:

$$G_{ij}(x, \xi) = A\delta_{ij} - B(2\gamma_i\gamma_j - \delta_{ij}). \quad (11)$$

Además, las tracciones en x en la dirección de i para cierto vector unitario n_i normal a Γ , cuando la carga unitaria es aplicada a ξ en la dirección j puede ser expresada como:

$$T_{ij} = \frac{\mu}{r} \left\{ \left[-4AB + \lambda \frac{D(\omega r/\alpha)}{2\mu\alpha^2} \right] \gamma_j n_i + \left[-4B + \frac{D(\omega r/\beta)}{2\beta^2} \right] \times [\gamma_i n_j + \gamma_k n_k \delta_{ij}] \right\} + \frac{\mu}{r} \{ (C + 16B) \gamma_i \gamma_j \gamma_k n_k \}. \quad (12)$$

Para las ecuaciones anteriores definiremos:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{i8\rho} \left[\frac{H_0^{(2)}(\omega r/\alpha)}{\alpha^2} + \frac{H_0^{(2)}(\omega r/\beta)}{\beta^2} \right], \\ B &= \frac{1}{i8\rho} \left[\frac{H_2^{(2)}(\omega r/\alpha)}{\alpha^2} + \frac{H_2^{(2)}(\omega r/\beta)}{\beta^2} \right], \\ C &= \frac{D(\omega r/\alpha)}{2\alpha^2} - \frac{D(\omega r/\beta)}{2\beta^2}, \\ D(p) &= \frac{i}{2p} p H_1^{(2)}(p). \end{aligned} \quad (13)$$

donde λ y μ son las constantes de Lamé, ρ es la densidad, $\alpha = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ y $\beta = \sqrt{\mu/\rho}$ son las velocidades de las ondas P y SV respectivamente, $r = \sqrt{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_3 - \xi_3)^2}$, $\gamma_j = (x_j - \xi_j)/r$, δ_{ij} es la delta de Kronecker ($= 1$ si $i = j$, $= 0$ si $i \neq j$) y $H_m^{(2)}(\cdot)$ y es la función de Hankel de segundo tipo de orden m .

Los campos de desplazamiento $u_i(x_A)$ y $u_j^*(x_B)$ de la ecuación (8) se generan mediante la aplicación de fuentes aleatorias. Cada fuente aleatoria se obtiene mediante números aleatorios usando una distribución uniforme y asumiendo el mismo espectro de potencia para cada fuente. En nuestros cálculos, se consideran fuentes independientes (NS) y sus contribuciones son así apiladas. La secuencia de los cálculos para obtener los sismogramas teóricos y recuperados se detalla en la figura 1.

Es de resaltar que el ruido puede ser generado de forma natural por el paso de vehículos, uso de maquinaria o cualquier otra forma de generación de movimientos. Los desplazamientos resultantes medidos en dos puntos (receptores) pueden ser sometidos a un procedimiento de correlación (aplicando la ecuación 8 y la figura 1) y obtener una de las principales propiedades del medio, que es la función de Green. Esta función significa la respuesta del medio ante cargas o impulsos dinámicos.

La formulación mostrada en este trabajo puede verificarse en todo momento con la información proporcionada. Por ejemplo, el cálculo exacto de las funciones de Green puede realizarse con las formulas (11) a (13); mientras que el cálculo de las funciones de Green recuperadas puede realizarse con la ecuación (8). Es de resaltar que el presente artículo muestra en varias figuras (figura 3, 4,

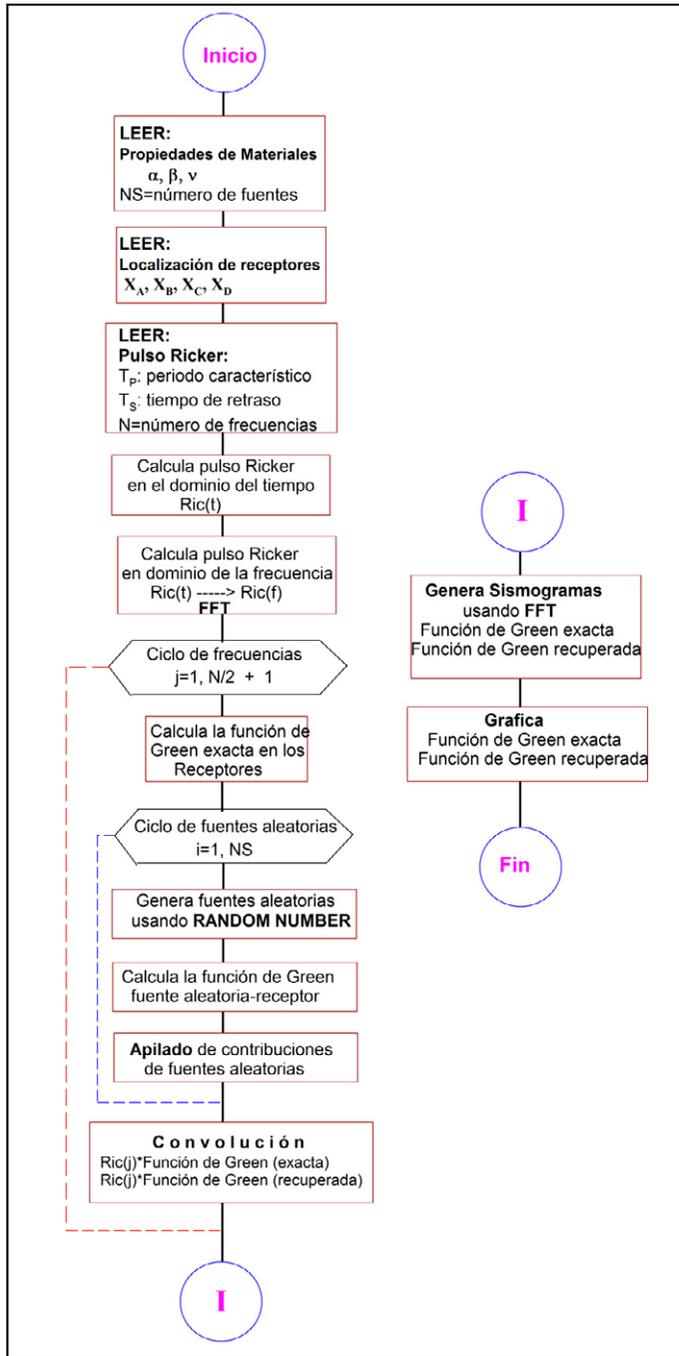


Figura 1. Diagrama de flujo que ilustra el procedimiento para calcular los sismogramas teóricos (exactos) y recuperados usando correlaciones de ruido sísmico. Elaboración propia.

7 y 8) validaciones de las fórmulas propuestas en este trabajo y sus contrapartes teóricas. Demostrando la validez de la formulación de este trabajo y su buena precisión. Es de destacar que para el cálculo de las funciones de Green recuperadas fue necesario desarrollar un programa de cómputo en lenguaje de

programación FORTRAN empleando el diagrama de flujo mostrado en la figura 1.

RESULTADOS

Como objetivo se tiene la recuperación de la función de Green a partir de correlaciones de ruido sísmico aplicadas a problemas bidimensionales (2D) de medios homogéneos. En el esquema de la figura 2a se muestra una representación esquemática de ruido sísmico registrado por receptores (Weaver, 2005), mientras que la figura 2b ilustra la localización de los receptores A y B, C y D, así como la utilización de NS=20000 fuentes sísmicas, las cuales fueron generadas numéricamente. Mediante el uso de la ecuación (8) es posible efectuar la correlación de movimientos sísmicos (ruido sísmico) entre los puntos A y B, C y D. La distribución de fuentes en la figura 2b es isotrópica.

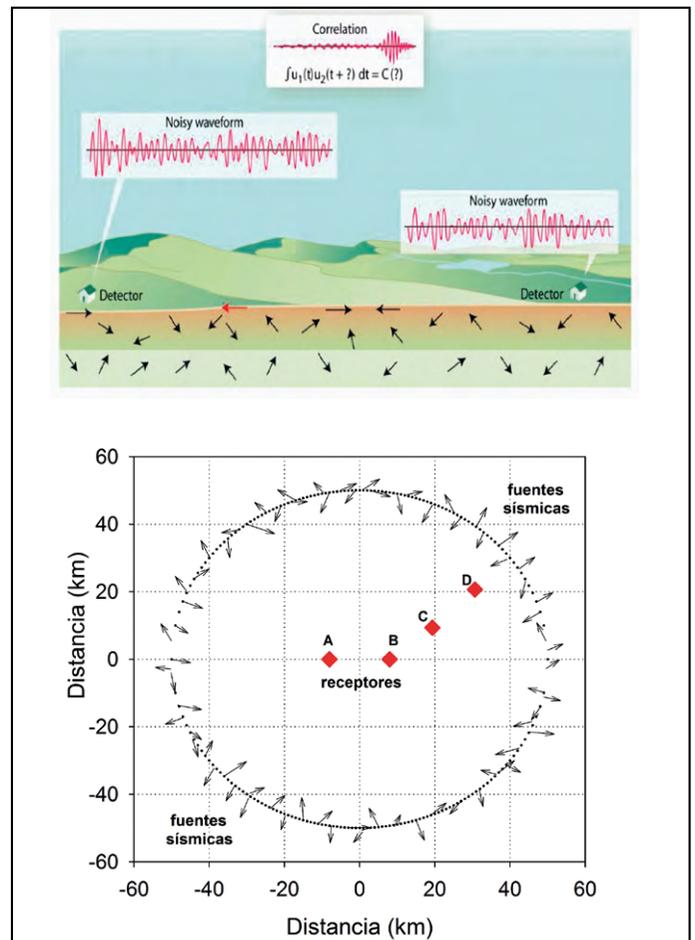


Figura 2. a) Representación esquemática de ruido sísmico registrado por receptores (fuente: Weaver, 2005); b) distribución de fuentes aleatorias de manera isotrópica aplicando NS=20000. Colocación de los receptores A y B, C y D.

Mediante receptores mostrados en la figura anterior y haciendo uso de la ecuación (8), en la figura 3, se muestra la recuperación de la función de Green correlacionando ruido sísmico (círculos) y las funciones de Green exactas (línea continua) obtenidas mediante la aplicación de las funciones de Green exactas, las cuales se muestran en las ecuaciones (11) a (13). Se hace el uso de G_{xx} , G_{xz} , G_{zx} y G_{zz} a manera de identificar las componentes del tensor de Green. Se utiliza una relación de Poisson $\nu = 0.25$ para la caracterización del medio y una aplicación de 20,000 fuentes aleatorias. En la siguiente figura es posible observar que la ecuación (8) tiene una correcta aplicación y que se obtiene la recuperación de la función de Green con buena aproximación.

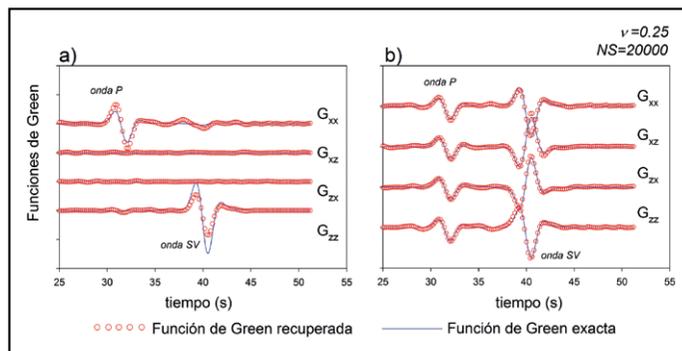


Figura 3. Recuperación de las funciones de Green mediante correlación de movimiento sísmico y la utilización de las funciones de Green exactas. a) Receptores A y B; b) receptores C y D. Elaboración propia.

En la figura 4, para una distribución no isotrópica de fuentes, se expone la recuperación de la función de Green. Esta distribución, llamada Uniforme, se ha tomado de Liu y Zhang (2001) (figura 4a). Para esta distribución es posible apreciar que es determinante la orientación de las fuentes o receptores en la recuperación de la función de Green. Para $\gamma = 0^\circ$ y $\gamma = 90^\circ$ tal recuperación es imprecisa; sin embargo, si se observa bien, con una orientación de $\gamma = 45^\circ$ la función de Green es recuperada adecuadamente. Es evidente que incluso para una distribución de fuentes no isotrópica es posible recuperar de manera muy precisa la función de Green, y se tiene una adecuada orientación de los receptores.

Se mostrará ahora la función de Green en un medio cuya relación de Poisson es $\nu = 0.25$ para los puntos A y B, C y D, cuya orientación es mostrada en la figura 5.

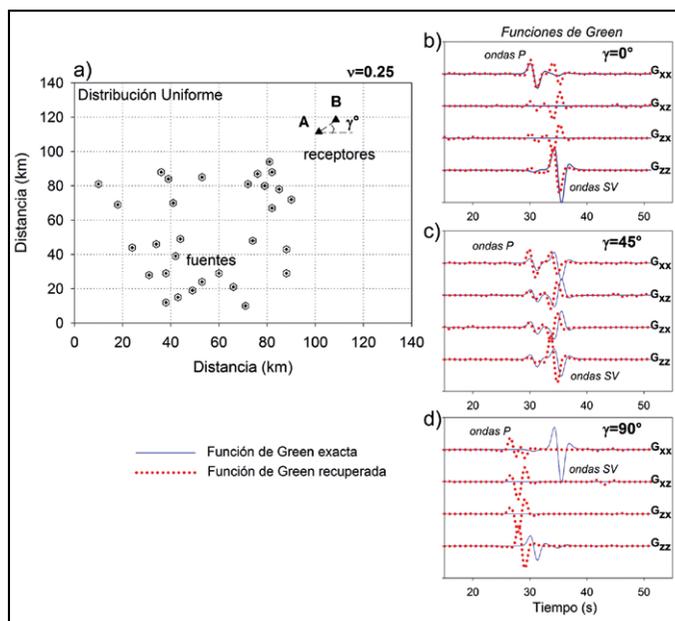


Figura 4. a) Distribución Uniforme de fuentes aleatorias y colocación de receptores A y B. Sismogramas teóricos y recuperados para: b) $\gamma = 0^\circ$; c) $\gamma = 45^\circ$; d) $\gamma = 90^\circ$. Elaboración propia.

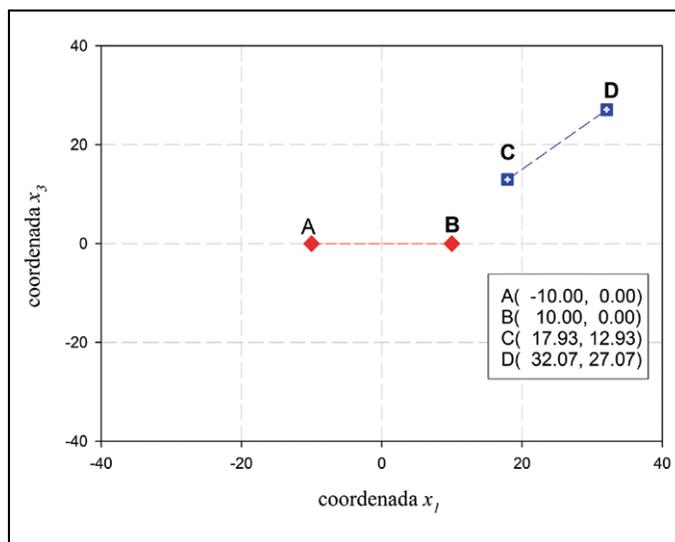


Figura 5. Orientación de receptores en un medio con una relación de Poisson $\nu = 0.25$. Elaboración propia.

En la figura 6a se muestra la función de Green entre los puntos A y B, mientras que para los puntos C y D se tiene la figura 6b. Se observa también el claro arribo de las ondas P y SV ilustrando también la diferencia en magnitud de las ondas P con respecto a las ondas SV.

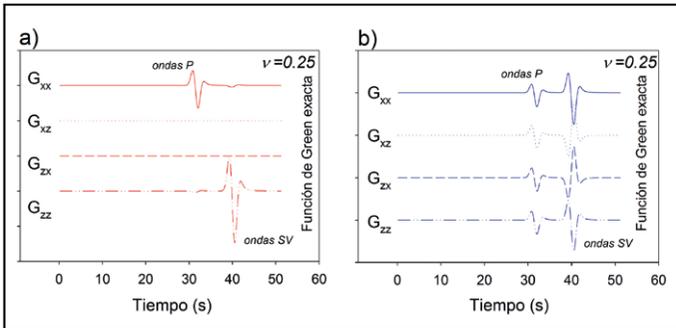


Figura 6. Funciones de Green exactas mediante sismogramas sintéticos. a) Receptores A y B; b) receptores C y D. Elaboración propia.

Si se realiza la integración de energía de la figura 6a (haciendo uso de la ecuación 10), tal integración resulta en que la energía asociada a las ondas P y SV es de $E_P^T = 18.75\%$ y $E_{SV}^T = 81.25\%$, respectivamente. Este mismo resultado es encontrado para ambos pares de receptores (A y B, C y D). Como puede apreciarse en la figura 7a, las contribuciones de energía obtenidas mediante la ecuación (9) (línea continua) y las obtenidas mediante la integración de los sismogramas de la figura 6, empleando la ecuación (10) (círculos) muestran excelente concordancia.

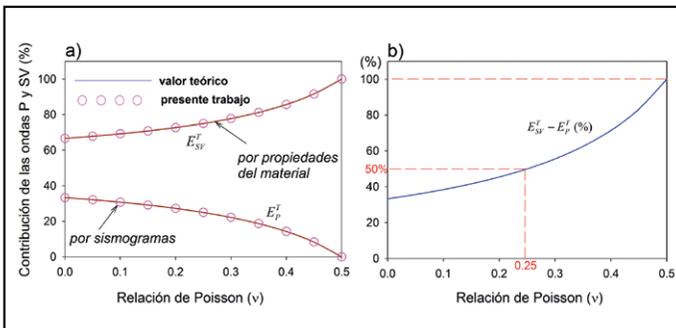


Figura 7. a) Contribución teórica de las ondas P y SV a la energía total; b) diferencia de $E_{SV}^T - E_P^T$ en función de la relación de Poisson. Elaboración propia.

La relación de Poisson depende del cociente de velocidades de propagación (α/β) y teóricamente el contenido de energía puede expresarse en función de la relación de velocidades (o de la relación de Poisson) de acuerdo con la ecuación (9). La figura 7 muestra la relación de Poisson en función de E_{SV}^T y E_P^T . Por otro lado, y de acuerdo con la ecuación (9), es posible observar que la energía total puede repartirse en los tipos de onda P y SV; los cuales son propagados en un medio bidimensional. Esta ecuación muestra que la energía que se asocia a P está en función de $1/\alpha^2$ y que la asociada a SV en función de $1/\beta^2$.

Sabiendo que la relación de velocidades está estrechamente vinculada con la relación de Poisson, es posible expresar la energía en función de ésta, encontrando entonces las curvas con línea continua de la figura 7a. Teóricamente, la energía asociada con las ondas P disminuye cuando la relación de Poisson aumenta; por otro lado, la que corresponde a las ondas SV aumenta cuando la relación de Poisson se incrementa. Por ejemplo, para valores de relación de Poisson altas (e.g. $\nu = 0.5$) la energía de las ondas SV (E_{SV}^T) que se propaga lleva 100% de la energía total, mientras que la contribución de las ondas P a la energía total es nula. Es evidente de acuerdo a la ecuación (9) y a la figura 7a que las contribuciones a la energía de las ondas P y SV son fijas para cada tipo de material. Los círculos en estas figuras corresponden a la energía calculada mediante la ecuación (10), donde se integran los sismogramas teóricos y recuperados mediante ruido.

Finalmente, en la figura 8 se presenta el comportamiento de $E^R = E_P^R + E_{SV}^R$ cuando se incrementa el número de fuentes aleatorias desde $NS=100$ hasta $NS=10,000$. Es indudable que a mayor número de fuentes (e.g. 10,000) se observa una mejor tendencia a la energía exacta y, por tanto, la función de recuperada tiende al valor exacto. En esta figura se dibuja con línea-punto-línea, para un medio con propiedades de $\nu = 0.25$, los valores exactos de energía. Los valores recuperados para la energía total se dibujan con línea continua. Puede observarse en la figura 8 que para una relación de Poisson de $\nu = 0.25$ la onda P contribuye con 25% a la energía total y la onda SV con 75%. Se observa que la energía recuperada total converge cuando se aplican cerca de $NS= 6,500$ fuentes aleatorias (ver *1 en la figura), la convergencia de la energía de las ondas P y SV se resalta con *2 y *3. Se puede entonces concluir que para acercarse a una recuperación aceptable de la energía y de la función de Green es necesario un gran número de fuentes incluso teniendo una distribución isotrópica (como la ilustrada en la figura 2b).

DISCUSIÓN

Se ha desarrollado una formulación en 2D que permite estudiar tanto la función de Green como la energía contenida en medios homogéneos donde la propagación de ondas sísmicas tiene lugar. Se ha expuesto la estrecha relación que existe entre las correlaciones de movimientos sísmicos, la función de Green y los contenidos de energía en el medio.

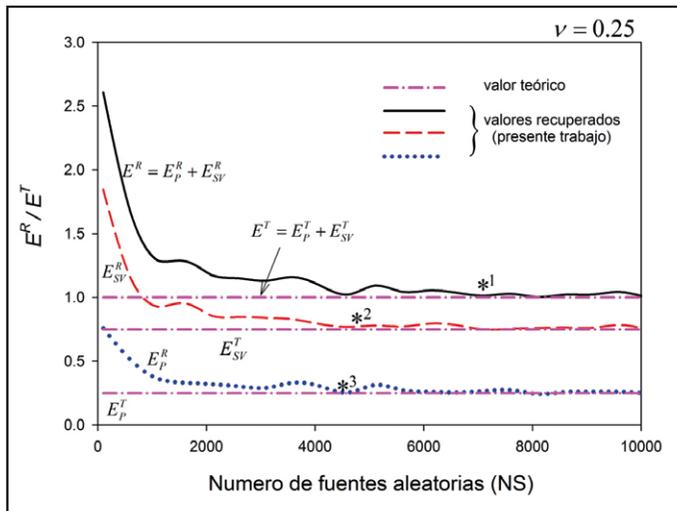


Figura 8. Comportamiento de energía recuperada mediante correlaciones de movimientos sísmicos y de la energía teórica en un medio con una relación de Poisson de $\nu = 0.25$. Elaboración propia.

De manera teórica se ha mostrado que para un medio la energía correspondiente a las ondas P y SV poseen cantidades fijas, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura. Además, un resultado importante es que para grandes relaciones de Poisson (e.g. $\nu = 0.50$) las ondas P tienden a desaparecer y las ondas SV contribuyen con casi 100% de la energía y para una relación de Poisson de $\nu = 0.25$ la onda P contribuye con 25% a la energía total y la onda SV con 75%.

En la naturaleza es bien sabido que la energía se propaga mediante ondas. Particularmente, los eventos sísmicos y la propagación de ondas sísmicas conllevan una cantidad enorme de energía, la cual puede ocasionar severos daños a las ciudades. En la ingeniería civil-estructural, geofísica, y sismología, es bien conocido que las ondas de contante (SV) poseen más energía y arriban al sitio después de las ondas primarias (P). El contenido de energía de las ondas SV es mayor con respecto a las P y este contenido de energía depende básicamente de las características del medio donde se propagan las ondas sísmicas (velocidades de propagación, densidad, relación de Poisson, entre otras). Una relación de Poisson alta implica que se está en presencia de

un sólido incompresible y que de acuerdo con lo mostrado en la figura 7 la mayor parte de la energía es conducida por las ondas SV, llegando al caso de que para relaciones de Poisson de 0.5, las ondas SV conducen 100% de la energía total.

Durante el desarrollo de este trabajo se ha evidenciado la importancia de una distribución isotrópica de fuentes sísmicas, lo cual conduce a la recuperación de la función de Green con buena aproximación. Se ha mostrado que es posible recuperar la función de Green mediante correlaciones de ruido sísmico y que la energía asociada a la propagación es también factible extraerla de sismogramas sintéticos obtenidos de las funciones de Green exactas y sismogramas recuperados mediante un proceso de correlación. También se determinó que el número de fuentes aleatorias es un factor importante para recuperar adecuadamente la función de Green y además puede acercarse a valores precisos de la contribución de energía del medio en cuestión.

Con los resultados mostrados en este trabajo ahora es posible estimar si un sismograma recuperado mediante ruido sísmico es preciso o no. Esto se debe a que la tendencia, en relación con la energía debe ser tal que se aproxime a los valores teóricos. Finalmente, se empleó una distribución no isotrópica de fuentes aleatorias, llamada distribución Uniforme. Mediante esta distribución se nos permite comentar que aun para una distribución no isotrópica de fuentes, la orientación de los receptores es importante para una adecuada recuperación de la función de Green mediante correlaciones de ruido sísmico.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados mostrados en el presente trabajo se puede concluir que:

- La formulación propuesta en este artículo permite obtener la recuperación de la función de Green con buena aproximación.
- En una distribución de fuentes no isotrópica es posible recuperar la función de Green, si se tiene una adecuada orientación de los receptores.

- Las contribuciones de energía obtenidas mediante la presente formulación muestran excelente concordancia con respecto a los valores teóricos.
- La energía asociada a las ondas P disminuye cuando la relación de Poisson aumenta; por otro lado, la que corresponde a las ondas SV

aumenta cuando la relación de Poisson se incrementa también.

Para una recuperación aceptable de la energía y de la función de Green es necesario un gran número de fuentes incluso teniendo una distribución isotrópica.

REFERENCIAS

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415-456.
- _____, & Richards, P. G. (2002). *Quantitative Seismology* (2^a ed.). US: University Science Books.
- Campillo, M., & Paul, A. (2003). Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*, 299(5606), 547-549.
- Garus, D., & Wegler, U. (2011). The Green's functions constructed from 17 years of ambient seismic noise recorded at ten stations of the German Regional Seismic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(6), 2833-2842.
- Liu, E., & Zhang, Z. (2001). Numerical study of elastic wave scattering by distributed cracks or cavities using the boundary integral method. *Journal of Computational Acoustics*, 9, 1039-1054.
- Ma, S., & Beroza, G. (2012). Ambient-field Green's functions from asynchronous seismic observations. *Geophysical Research Letters*, 39(6), L06301. doi: 10.1029/2011GL050755
- Ryzhik, L. V., Papanicolau, G. C., & Keller, J. B. (1996). Transport equations for elastic and other waves in random media. *Wave Motion*, 24(4), 327-370.
- Sánchez-Sesma, F. J., & Campillo, M. (1991). Diffraction of P, SV and Rayleigh waves by topographic features: A boundary integral formulation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(6), 2234-2253.
- Sánchez-Sesma, F. J., Pérez-Ruiz, J. A., Luzón, F., Campillo, M., & Rodríguez-Castellanos, A. (2008). Diffuse fields in dynamic elasticity. *Wave Motion*, 45(5), 641-654.
- Sato, H., & Fehler, M. C. (1998). *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous Earth*. US: Springer-Verlag.
- Shapiro, N. M., & Campillo, M. (2004). Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 31(7), L07614. doi: 10.1029/2004GL019491
- Van Manen, D. J., Curtis, A., & Robertsson, J. O. (2006). Interferometric modeling of wave propagation in inhomogeneous elastic media using time-reversal and reciprocity. *Geophysics*, 71(4), SI47-SI60.
- Wapenaar, K. (2004). Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation. *Physical Review Letters*, 93, 254301-1-254301-4.
- Weaver, R. L. (2005). Geophysics. Information from seismic noise. *Science*, 307(5715), 1568-1569.
- _____, & Lobkis, O. I. (2004). Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116, 2731-2734. doi: 10.1121/1.1810232

Funciones compatibles de ahusamiento-volumen para tres especies de *Pinus* en la Unidad de Manejo Forestal 0808 del estado de Chihuahua

Taper-volume compatible functions for three *Pinus* species at Management Forest Unit 0808 from Chihuahua state

Edgar Silva-González*, Marco Antonio Nava-Moreno*, Francisco Javier Hernández**✉, José Guadalupe Colín**

Silva-González, E., Nava-Moreno, M. A., Hernández, F. J., & Colín, J. G. (2018). Funciones compatibles de ahusamiento-volumen para tres especies de *Pinus* en la Unidad de Manejo Forestal 0808 del estado de Chihuahua. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 58-67.

RESUMEN

El propósito del presente estudio fue ajustar nueve modelos compatibles de ahusamiento-volumen para las especies de *Pinus arizonica*, *P. durangensis* y *P. engelmannii* del estado de Chihuahua. Para realizar este estudio se seleccionaron 111 árboles para la primera especie, 108 para la segunda y 91 para la tercera. El análisis implicó la incorporación del modelo de volumen de Schumacher & Hall a cada uno de los nueve modelos de ahusamiento para ajustarlos de manera simultánea y seleccionar la mejor función compatible de ahusamiento-volumen. Los resultados indicaron que los modelos de ahusamiento-volumen con mejor ajuste fueron el de Fang y el de Cruz-Cobos para las tres especies.

ABSTRACT

The purpose of the present study was to fit nine taper-volume compatible models to *Pinus arizonica*, *P. durangensis* and *P. engelmannii* species from Chihuahua State, Mexico. To realize this study, 111,

Palabras clave: ahusamiento-volumen; Schumacher; *Pinus arizonica*; *Pinus durangensis*; *Pinus engelmannii*.
Keywords: taper-volumen; Schumacher; *Pinus arizonica*; *Pinus durangensis*; *Pinus engelmannii*.

Recibido: 4 de abril de 2017, aceptado: 31 de octubre de 2017

* Proceso Tesis Instituto Tecnológico de El Salto. Mesa del Tecnológico s/n, C. P. 34942, El Salto, Durango, México. Correo electrónico: edgar_silva7@hotmail.com; navamm_91@hotmail.com

** División de Estudios de Posgrado, Instituto Tecnológico de El Salto. Mesa del Tecnológico s/n, C. P. 34942, El Salto, Durango, México. Correo electrónico: fcojhernan@yahoo.com.mx; jose_colin8@hotmail.com

✉ Autor para correspondencia

108 and 91 trees of each species were selected, respectively. The analysis required linking the Schumacher & Hall volume model to each one of nine taper models to fit them simultaneously and select the most compatible taper-volume model. The best results for the three pine species were obtained with the compatible taper-volume models proposed by Fang and Cruz-Cobos.

INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos realizados para lograr una producción constante y balanceada de los recursos forestales maderables inducen a que el administrador forestal cuente con herramientas matemáticas que estimen a un buen nivel de precisión tanto el volumen total a extraer como los volúmenes destinados a la elaboración de productos primarios, secundarios y leñas (Valdez-Lazalde & Lynch, 2000). La cuantificación precisa de las existencias reales volumétricas totales y del volumen comercial es un respaldo importante en la toma de decisiones sobre las prescripciones silvícolas. El volumen total y parcial del fuste se puede estimar directamente a través de ecuaciones independientes de volumen total y comercial (Clutter, 1980; Demaerschalk, 1972; Lynch, Chang, & Chandler, 1992), ecuaciones de razón (Teshome, 2005), mediante la integración matemática del volumen acumulado a las diversas dimensiones comerciales del fuste aplicando las ecuaciones de ahusamiento previamente ajustadas o a través de la inclusión de ecuaciones de volumen a las de ahusamiento para ajustarlas de manera simultánea y generar funciones compatibles de ahusamiento-volumen (Fang, Borders, & Bailey, 2000).

Aunque a través del tiempo se han desarrollado una serie de ecuaciones matemáticas y de regresión para estimar el volumen total y comercial del bosque aplicadas a las especies de la región forestal donde se desarrolló este estudio (Pompa-García, Corral-Rivas, Díaz-Vázquez, & Martínez-Salvador, 2009), se especula que muchas de ellas no se han aplicado de manera compatible y otras han perdido precisión debido a los cambios estructurales de la vegetación arbórea. Esas ecuaciones fueron diseñadas para aplicarse a bosques naturales originales con características dimensionales muy superiores a las que actualmente tienen los bosques de segundo y tercer crecimiento. Al considerar lo anterior y con el propósito de actualizar y contribuir a la estimación precisa de las existencias totales y comerciales del volumen total y comercial de las especies forestales que se desarrollan en el estado de Chihuahua y así garantizar una producción sostenible, el presente trabajo se dirigió a ajustar diversos modelos de volumen y ahusamiento y definir el mejor para determinar, a partir de ecuaciones simultáneas, una ecuación compatible de ahusamiento-volumen que permita estimar el volumen total y comercial de *Pinus arizonica*, *P. durangensis* y *P. engelmannii* de la Unidad de Manejo Forestal 0808 (UMAFOR 0808) del estado de Chihuahua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo dentro del municipio de Guadalupe y Calvo, el cual se encuentra ubicado en la parte sur del estado de Chihuahua dentro de la Sierra Madre Occidental, específicamente en la zona denominada Sierra Tarahumara. Este municipio limita al noroeste con los municipios de Morelos y Balleza, al norte con el municipio de Guachochi. Al sur y al sureste colinda con el estado de Durango, en particular con los municipios de Guanacevi, Tepehuanes y Tamazula. Al suroeste con el municipio de Badiraguato del estado de Sinaloa (figura 1). El municipio comprende ocho comunidades, 26 ejidos y 126 predios particulares que se encuentran bajo manejo forestal, cubriendo una superficie total de 904,780 ha. Los principales climas que caracterizan a la región pertenecen a los grupos Cw, Acw y Bs que corresponden a los templados subhúmedos, semicálidos y semisecos, respectivamente. Las precipitaciones promedio en la región del bosque templado varían de 500 a 1050 mm, mientras que las temperaturas medias van de los 16 a los 20 °C. La mínima y máxima extrema en la región es de -15 y 37 °C.

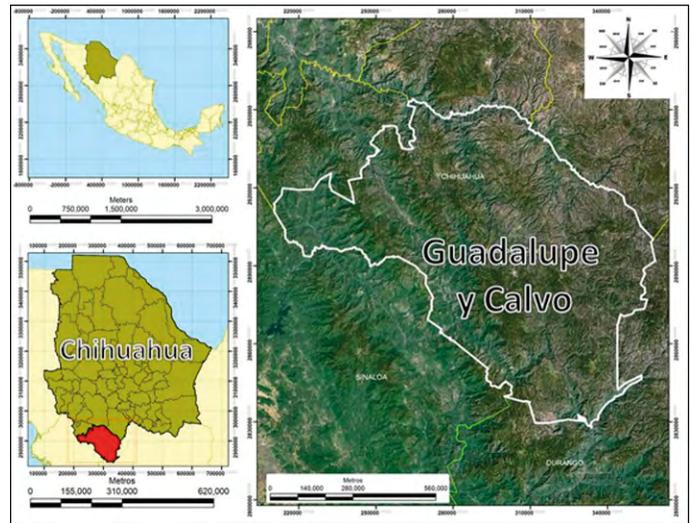


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Elaboración propia.

Muestreo

Para el presente estudio se seleccionaron 111 árboles de *Pinus arizonica*, 108 de *P. durangensis* y 91 de *P. engelmannii* considerando su conformación morfológica y estado de salud. La muestra representó a todas las categorías diamétricas presentes en el área de estudio. Los árboles seleccionados fueron identificados por especie para ser derribados, desramados y seccionados en trozas de diferentes dimensiones (figuras 2 y 3). De cada árbol se midió y registro la siguiente información: diámetro y altura del tocón, diámetro a 0.30 m y 0.60 m después de la altura del tocón, así como diámetro a una altura de 1.30 m a partir del suelo. Posteriormente se registraron los diámetros a cada 2.60 m hasta llegar a la parte de la punta del árbol.



Figura 2. Medición de los árboles derribados. Fotografía proporcionada por Francisco Javier Hernández.



Figura 3. Rodajas que representan el perfil del fuste del arbolado. Fotografía proporcionada por Francisco Javier Hernández.

Cubicación del arbolado

Con la información de campo, se estimó en cada árbol el volumen del tocón, trozas del fuste y troza de la punta utilizando las fórmulas de cilindro, Smalian y del cono, respectivamente (tabla 1).

Tabla 1
Fórmulas para cubicación de trozas

Nombre	Ecuación
Cilindro	$V = \frac{\pi}{4} (Dt^2 H)$
Smalian	$V = \frac{(S_1 + S_2)}{2} H$
Cono	$V = \frac{\pi D b^2}{12} H$

Nota: Elaboración propia.

donde:

- V= volumen de la troza (m³)
- H= longitud de la troza (m)
- S₁= área basal mayor de cada troza (m²)
- S₂= área basal menor de cada troza (m²)
- D_t= diámetro del tocón (m)
- Db= diámetro de la base de la punta (m)

El volumen total del árbol se definió como la suma de los volúmenes de cada una de las secciones del árbol.

$$v_t = \sum_{i=1}^k (V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)$$

donde:

- V_t= volumen total del fuste limpio
- V_i= volumen de cada troza

Modelos Ajustados

Primero se ajustaron de manera independiente, el modelo de volumen total de Schumacher & Hall, cuya expresión exponencial es:

$$V = \alpha_0 D_n^{\alpha_1} H^{\alpha_2}$$

donde:

- V = volumen total
- D_n = diámetro normal
- H = altura total
- α_i = parámetros

y los de ahusamiento a cada una de las tres especies evaluadas para determinar y justificar la bondad de ajuste de sus parámetros y su aplicabilidad a las especies estudiadas. Posteriormente, se ajustaron de manera simultánea cada uno de los modelos de ahusamiento con el de volumen para generar las funciones compatibles ahusamiento-volumen (tabla 2) y así poder determinar el volumen total o comercial a cualquier altura o diámetro fijado.

El ajuste de los modelos se realizó utilizando el software SAS Institute 9.0 mediante una estimación simultánea a través de máxima verosimilitud con información completa (FIML). Borders (1989) y Fang et al. (2000), señalan que el ajuste con FIML homogeniza y minimiza el error estándar de los parámetros en el sistema y además permite la compatibilidad completa del sistema de ahusamiento y volumen. Durante el ajuste de los modelos compatibles ahusamiento-volumen, se realizó la prueba de autocorrelación de Dublin Watson y la corrección del efecto a través del modelo autorregresivo de segundo orden (CAR2). Para evitar problemas en la estimación de los parámetros debido a que el diámetro de la punta del fuste es igual a cero, se aplicó un valor pequeño en este punto.

Tabla 2
Modelos compatibles de ahusamiento volumen aplicados

Nombre	Función de ahusamiento	Función de volumen
1) Kozak et al. (1969)	$d = D\sqrt{\beta_0(q-1) + \beta_1(q^2-1)}$	$V_c = \frac{1}{3}kD^2\left(\frac{\beta_1}{H^2}\right)h^3 + \frac{1}{2}kD^2\left(\frac{\beta_0}{Hh^2}\right) + kD^2(-\beta_0 - \beta_1)$
2) Lenhart y Clutter (1971)	$d = \left[D\left(\frac{H-h}{H-1.3}\right)\right]^{\frac{1}{\beta_1-2}}$	$V_c = e^{\alpha_0}D^{\alpha_1}H^{\alpha_2} - \beta_0 \frac{d^{\beta_1}}{D^{\beta_1-2}}(H-1.3)$
3) Demaerschalk (1972)	$d = \sqrt{\beta_0 D^2 X^{\beta_1}}$	$V_c = \frac{kD^2\beta_0}{\beta_1+1} \left[H - \frac{(H-h)^{\beta_1+1}}{h^{\beta_1}} \right]$
4) Clutter (1980)	$d = \left[\frac{k(H-h)}{\beta_0\alpha_0 D^{\alpha_1-\beta_2} H^{\alpha_2}} \left(1 - \frac{2}{\beta_1}\right) \right]^{\frac{1}{\beta_1-2}}$	$V_c = e^{\alpha_0}D^{\alpha_1}H^{\alpha_2}(1 - \beta_0 d^{\beta_1} D^{\beta_2})$
5) Fang y Bailey (1999) caso I-a	$d = \sqrt{\frac{\alpha_0}{\beta_0} D^{\alpha_1} H^{\alpha_2-k/\beta_0} h_t^{(k-\beta_0)/\beta_0}}$	$V_c = e^{\alpha_0}D^{\alpha_1}H^{\alpha_2} - \beta_0 d^2 h_t$
6) Fang y Bailey (1999) caso II-a	$d = \left[\frac{k(\beta_2-1)}{\beta_2\beta_0} \ln h_t + \left(\frac{\alpha_0 D^{\alpha_1} H^{\alpha_2}}{\beta_0}\right)^{1-1/\beta_2} - \frac{k(\beta_2-1)}{\beta_2\beta_0} \ln H \right]^{\frac{1}{(2\beta_2-2)}} h_t^{-0.5}$	$V_c = e^{\alpha_0}D^{\alpha_1}H^{\alpha_2} - \beta_0 d^{\beta_1} h_t^{\frac{\beta_1}{2}}$
7) Fang y Bailey (1999) caso II-b	$d = \left[\frac{k(\beta_1-2)}{(\beta_1-2\beta_2)\beta_0} h_t^{-\frac{2\beta_2}{\beta_1}} - H^{-1-\frac{2\beta_2}{\beta_1}} + \left(\frac{\alpha_0 D^{\alpha_1} H^{\alpha_2}}{\beta_0}\right)^{1-2/\beta_1} \right]^{\frac{1}{(\beta_1-2)}} h_t^{-\beta_2/\beta_1}$	$V_c = e^{\alpha_0}D^{\alpha_1}H^{\alpha_2} - \beta_0 d^{\beta_1} h_t^{\beta_2}$
8) Cruz-Cobos et al. (2008)	$d = \sqrt{D^\delta(\beta_0 X + \beta_1 X^2 + \beta_2 X^3)}$	$V_c = kD^\delta H^{-1} \left\{ \beta_0 \left[\left(Hh - \frac{h_m^2}{2} \right) - \left(Hh_b - \frac{h_b^2}{2} \right) \right] \frac{\beta_1}{3H} [(H-h)^3 - (H-h_b)^3] \right.$
9) Fang et al. (2000)	$d = c_1 \sqrt{H^{\frac{k-\beta_1}{\beta_1}} (1-q)^{\frac{k-\beta_2}{\beta_2}} \alpha_1^{I_1+I_2} \alpha_2^{I_2}}$ donde $\begin{cases} I_1 = 1 \text{ si } p_1 \leq q \leq p_2; \text{ de lo contrario } 0 \\ I_2 = 1 \text{ si } p_2 \leq q \leq 1; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$ $\beta = \beta_1^{1-(I_1+I_2)} \beta_2^{I_1} \beta_3^{I_2}$ $\alpha_1 = (1-p_1)^{\frac{(\beta_2-\beta_1)k}{\beta_1\beta_2}}$ $\alpha_2 = (1-p_2)^{\frac{(\beta_3-\beta_2)k}{\beta_2\beta_3}}$	$r_0 = (1-h_b/H)^{\frac{k}{\beta_1}}$ $r_1 = (1-p_1)^{\frac{k}{\beta_1}}$ $r_2 = (1-p_2)^{\frac{k}{\beta_2}}$ $c_1 = \sqrt{\frac{e^{\alpha_0} D^{\alpha_1} H^{\alpha_2-k/\beta_1}}{\beta_1(r_0-r_1) + \beta_2(r_1-\alpha_1 r_2) + \beta_3 \alpha_1 r_2}}$ $V_c = c_1^2 H^{\frac{k}{\beta_1}} \left[\beta_1 r_0 + (I_1 + I_2) + (\beta_2 - \beta_1)r_1 + I_2(\beta_3 - \beta_2)\alpha_1 r_2 - \beta(1-q)^{\frac{k}{\beta}} \alpha_1^{I_1+I_2} \alpha_2^{I_2} \right]$

Nota: Donde D= diámetro normal (m); d= diámetro (cm) a la altura h (m) desde el nivel del tocón; H= altura total de los arboles (m); h_b= altura del tocón (m); V_c= volumen comercial variable en (m³); k= π/40000; α, β, δ, p₁, p₂= coeficientes a determinar mediante el ajuste; X= (H-h)/H; z₁= h_b/H; z₀= (H-h_b)/H. Elaboración propia.

La calificación de la bondad de ajuste de los modelos se realizó utilizando los estadísticos coeficiente de determinación ajustado (R²adj) y raíz del cuadrado medio del error (REMC):

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \quad REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-p}}$$

donde:

\hat{Y}_i, \bar{Y}_i y Y_i =valor predicho, media y valor observado de la variable dependiente
n= número de observaciones
p= número de parámetros del modelo.

RESULTADOS

Para corroborar que la tendencia de los datos sea la que presenta el ahusamiento del fuste de los árboles y detectar valores atípicos en la base de datos que se utilizó, se graficaron los diámetros y los volúmenes acumulados contra las alturas del fuste. En las figuras 4, 5, y 6 se observa la inexistencia de datos atípicos y la tendencia del perfil del fuste y el volumen de los árboles en relación con la altura de cada una de las especies estudiadas.

En la tabla 3 se presentan los estimadores descriptivos número de árboles, valor promedio y

valores mínimo y máximo de las variables diámetro normal, altura total y volumen fustal de *Pinus arizonica*, *P. durangensis*, y *P. engelmannii*.

Aunque todos los modelos compatibles ahusamiento-volumen para estimar volumen comercial fueron significativos, los que mejor se ajustaron a las tres especies fueron los de Fang et al. (2000) y los de Cruz-Cobos, De los Santos-Posadas y Valdez-Lazalde (2008). Los coeficientes de determinación estimados para *P. arizonica* ($R^2=0.97$) y *P. durangensis* ($R^2=0.99$) fueron similares en ambos modelos. En relación con *P. engelmannii*, el modelo de Fang et al. (2000) estima un R^2 igual a 0.98 y el de Cruz-Cobos et al. (2008) un valor de 0.97. La evaluación de la REMC para estos mismos modelos señala que en *P. durangensis* y *P. engelmannii* la función de volumen comercial de Fang et al. (2000) fue ligeramente mejor a la de Cruz-Cobos et al. (2008) (tabla 4).

Al igual que con los modelos de ahusamiento-volumen para estimar volumen comercial, todos los modelos para estimar el ahusamiento presentaron buen ajuste, enfatizando que, nuevamente, los mejores modelos de ahusamiento fueron los de Fang et al. (2000) y Cruz-Cobos et al. (2008) (tabla 4). Estos modelos se aplican a la estimación del diámetro a cualquier altura o la altura a cualquier diámetro del arbolado en las tres especies.

El análisis de significancia de los estimadores de los parámetros relacionados con el ahusamiento indica que en el modelo compatible de Fang et al. (2000), ajustado a *P. arizonica*, B1 careció de significancia (tabla 5). De manera similar, en el modelo caso II-b de Fang y Bailey (1999), Bo y B1 no fueron significativos en *Pinus durangensis* y *P. engelmannii*, respectivamente. En el modelo de Cruz-Cobos et al. (2008), B1 no fue significativo para *P. engelmannii* (tablas 6 y 7).

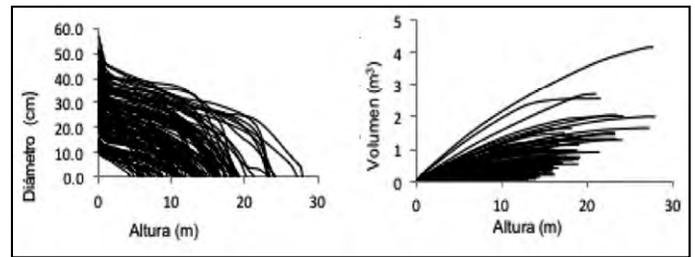


Figura 4. Diámetros y volúmenes acumulados en función de la altura para *Pinus arizonica*.
Elaboración propia.

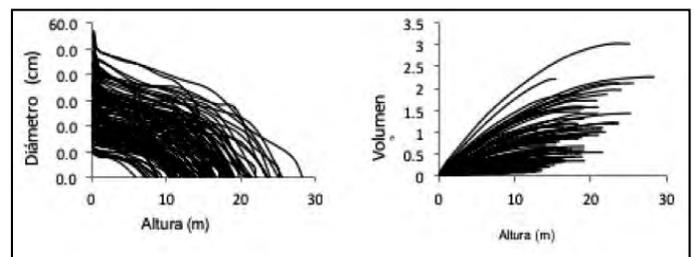


Figura 5. Diámetros y volúmenes acumulados en función de la altura para *Pinus durangensis*.
Elaboración propia.

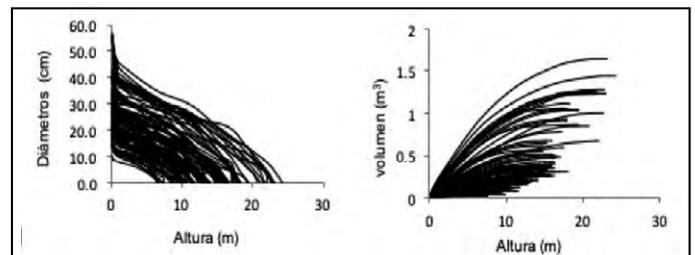


Figura 6. Diámetros y volúmenes acumulados en función de la altura para *Pinus engelmannii*.
Elaboración propia.

Tabla 3
Valores estadísticos descriptivos de los datos utilizados

Variable	Especie	N	Media	Mínimo	Máximo
Dn (cm)	<i>P. arizonica</i>	111	25.87	7.7	59
	<i>P. durangensis</i>	108	28.2	9.5	55
	<i>P. engelmannii</i>	91	23.94	8.1	48
H (m)	<i>P. arizonica</i>	111	14.43	4.36	28
	<i>P. durangensis</i>	108	15.7	6.05	25.9
	<i>P. engelmannii</i>	91	14.11	6.62	24.27
V (m³)	<i>P. arizonica</i>	111	0.6022	0.0048	4.1848
	<i>P. durangensis</i>	108	0.6707	0.0305	3.0248
	<i>P. engelmannii</i>	91	0.4102	0.0198	1.635

Nota: Donde Dn es el diámetro normal; H es la altura total; V es el volumen total; N es el número de árboles utilizados.
Elaboración propia.

Tabla 4
Estadísticos de ajuste de los sistemas probados ahusamiento-volumen para *Pinus arizonica*, *P. durangensis* y *P. engelmannii*

Sistema de volumen compatible	Especie	Ecuación de volumen comercial		Ahusamiento	
		REMC	R ² adj	REMC	R ² adj
Kozak et al. (1969)	<i>P. arizonica</i>	0.1135	0.95	3.1368	0.95
	<i>P. durangensis</i>	0.0710	0.98	2.8084	0.96
	<i>P. engelmannii</i>	0.0815	0.96	4.1239	0.89
Lenhart y Clutter (1971)	<i>P. arizonica</i>	0.2624	0.74	3.4674	0.94
	<i>P. durangensis</i>	0.1895	0.84	3.0097	0.95
	<i>P. engelmannii</i>	0.2048	0.72	4.9495	0.85
Demaerschalk (1972)	<i>P. arizonica</i>	0.0710	0.97	2.8501	0.96
	<i>P. durangensis</i>	0.1103	0.97	2.9311	0.96
	<i>P. engelmannii</i>	0.0815	0.97	4.1592	0.89
Clutter (1980)	<i>P. arizonica</i>	0.2477	0.76	3.4499	0.94
	<i>P. durangensis</i>	0.1800	0.86	3.1998	0.95
	<i>P. engelmannii</i>	0.1877	0.77	4.3856	0.88
Fang y Bailey (1999) caso I-a	<i>P. arizonica</i>	0.1761	0.88	3.1709	0.95
	<i>P. durangensis</i>	0.1278	0.93	2.8357	0.96
	<i>P. engelmannii</i>	0.1340	0.88	3.9439	0.90
Fang y Bailey (1999) caso II-a	<i>P. arizonica</i>	0.1713	0.89	3.1876	0.95
	<i>P. durangensis</i>	0.1090	0.94	2.7806	0.96
	<i>P. engelmannii</i>	0.1226	0.90	3.7477	0.91
Fang y Bailey (1999) caso II-b	<i>P. arizonica</i>	0.1641	0.90	3.2480	0.94
	<i>P. durangensis</i>	0.1103	0.95	2.9311	0.96
	<i>P. engelmannii</i>	0.1123	0.92	3.8970	0.91
Cruz-Cobos et al. (2008)	<i>P. arizonica</i>	0.0841	0.97	2.7568	0.96
	<i>P. durangensis</i>	0.0565	0.99	2.4080	0.97
	<i>P. engelmannii</i>	0.0460	0.97	2.3390	0.96
Fang et al. (2000)	<i>P. arizonica</i>	0.0880	0.97	2.4950	0.97
	<i>P. durangensis</i>	0.0536	0.99	1.9540	0.98
	<i>P. engelmannii</i>	0.0520	0.98	1.8230	0.98

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5
Datos descriptivos de los modelos compatibles de volumen comercial-ahusamiento para P. arizonica

Sistema de volumen		α_0	α_1	α_2	β_0	β_1	β_2	β_3	ρ_1	ρ_2	δ
1)	Ψ					-1.41105	0.246205				
	E					0.0277	0.0215				
	∞					<.0001	<.0001				
2)	Ψ	-10.1233	1.793806	1.211452	0.000026	3.568662					
	E	0.0973	0.0212	0.0287	2.016×10^{-7}	0.0139					
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001					
3)	Ψ					1.147186	1.111923				
	E					0.00518	0.0109				
	∞					<.0001	<.0001				
4)	Ψ	-9.34291	1.857118	0.921897	0.331701	3.432083	3.248107				
	E	0.0667	0.0178	0.0212	0.0246	0.0113	0.0190				
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001				
5)	Ψ	-9.75876	1.830664	1.101103	0.000036						
	E	0.0475	0.0129	0.0168	1.584×10^{-7}						
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001						
6)	Ψ	-9.65723	1.806518	1.095294	0.000043	1.961517					
	E	0.0520	0.0130	0.0163	1.075×10^{-6}	0.00463					
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001					
7)	Ψ	-9.48577	1.693734	1.174786	0.000059	1.766681	1.120859				
	E	0.0549	0.0187	0.0189	2.833×10^{-6}	0.0257	0.0194				
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001				
8)	Ψ				1.756762	-1.33616	1.213476				1.917957
	E				0.788	0.1412	0.1119				0.0111
	∞				<.0001	<.0001	<.0001				<.0001
9)	Ψ	-9.91486	1.978935	0.98201		7.882×10^{-6}	0.000039	0.133998	0.039451	0.99625	
	E	0.0520	0.0146	0.0137		7.001×10^{-7}	1.75×10^{-7}	0.0116	0.00287	0.0	
	∞	<.0001	<.0001	<.0001		<.0001	<.0001	0.1718	<.0001	<.0001	

Nota: Ψ : valor de los parámetros ϵ : error estándar de los parámetros; ∞ : nivel de significancia de los parámetros.
Elaboración propia.

Tabla 6
Datos descriptivos de los modelos compatibles de volumen comercial-ahusamiento para *P. durangensis*

Sistema de volumen		α_0	α_1	α_2	β_0	β_1	β_2	β_3	ρ_1	ρ_2	δ
1)	Ψ					-1.49276	0.358556				
	E					0.0226	0.0173				
	∞					<.0001	<.0001				
2)	Ψ	-10.2683	2.165869	0.800167	0.000027	3.528008					
	E	0.0826	0.0212	0.0156	1.344x10 ⁻⁷	0.0140					
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001					
3)	Ψ					1.111322	1.188438				
	E					0.00462	0.00995				
	∞					<.0001	<.0001				
4)	Ψ	-10.1466	2.08043	0.893011	1.040669	3.354161	3.467695				
	E	0.0747	0.0197	0.0145	0.0863	0.0104	0.0247				
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001				
5)	Ψ	-9.95119	2.145739	0.758376	0.000034						
	E	0.0505	0.0146	0.0106	1.571x10 ⁻⁷						
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001						
6)	Ψ	-7.96328	1.465437	0.717	2.48x10 ⁻⁴¹	-32.4767					
	ϵ	0.4061	0.1289	0.0430	1.22x10 ⁻³⁷	1703.3					
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	0.9998	0.9850					
7)	Ψ	-9.45435	1.937055	0.846819	0.000077	1.656325	1.149874				
	E	0.0498	0.0136	0.0102	2.368x10 ⁻⁶	0.0143	0.0114				
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001				
8)	Ψ				1.28373	-1.16511	1.125006				1.989231
	ϵ				0.0564	0.1041	0.081				0.00968
	∞				<.0001	<.0001	<.0001				<.0001
9)	Ψ	-10.0139	2.18313	0.737407		8.258x10 ⁻⁶	4.1x10 ⁻⁵	3.1x10 ⁻⁵	0.048418	0.75214	
	ϵ	0.0382	0.00911	0.00601		4.041x10 ⁻⁷	3.164x10 ⁻⁷	4.757x10 ⁻⁷	0.00202	0.0118	
	∞	<.0001	<.0001	<.0001		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	

Nota: Ψ : valor de los parámetros ϵ : error estándar de los parámetros; ∞ : nivel de significancia de los parámetros. Elaboración propia.

DISCUSIÓN

El ajuste simultáneo de los estimadores de los parámetros de los modelos de volumen y ahusamiento a través de máxima verosimilitud con información completa (FIML) es más eficiente y preciso que la estimación independiente de los parámetros de cada ecuación. Este método minimiza los errores en forma conjunta, maximizando la significancia de los coeficientes de las ecuaciones (Borders, 1989; Fang et al., 2000). En relación con los modelos compatibles de volumen comercial-ahusamiento estudiados, los modelos de Fang et al. (2000) y Cruz-Cobos et al. (2008) fueron los que presentaron el mejor ajuste.

El sistema compatible de ahusamiento y volumen desarrollado por Fang et al. (2000), por su flexibilidad de adaptación a las diversas formas del fuste de los árboles, tiene un ajuste significativo a la base de datos (Diéguez-Aranda, Castedo-Dorado, Álvarez-González, & Rojo, 2006).

Sin embargo, el modelo de ahusamiento Cruz-Cobos et al. (2008), aunque simple en su estructura, presenta un buen ajuste. Los resultados de este estudio son congruentes por los reportados para otras especies como *Pinus cooperi* (Corral-Rivas, Diéguez-Aranda, Corral-Rivas, & Castedo-Dorado, 2007; Cruz-Cobos et al., 2008), *P. engelmannii* (Corral-Rivas et al., 2007; Quiñones-Barraza, De los Santos-Posadas,

Tabla 7
Datos descriptivos de los modelos compatibles de volumen comercial-ahusamiento para *P. engelmannii*

Sistema de volumen		α_0	α_1	α_2	β_0	β_1	β_2	β_3	ρ_1	ρ_2	δ
1)	Ψ					-2.02488	0.838569				
	E					0.0427	0.0330				
	∞					<.0001	<.0001				
2)	Ψ	-11.0555	2.099025	1.072114	0.00002	2.855828					
	E	0.0978	0.0305	0.0184	2.363x10 ⁻⁷	0.00797					
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001					
3)	Ψ					1.160587	1.565545				
	E					0.0102	0.0260				
	∞					<.0001	<.0001				
4)	Ψ	-9.94775	2.044336	0.811806	0.331446	2.878275	2.688267				
	E	0.1387	0.0358	0.0117	0.0493	0.00731	0.0375				
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001				
5)	Ψ	-9.85669	1.661028	1.272564	0.000029						
	E	0.0675	0.0172	0.0142	1.667x10 ⁻⁷						
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001						
6)	Ψ	-5.95099	1.404914	1.204626	2.9x10 ⁻⁶¹	-31.2644					
	E	0.5121	0.1873	0.1828	8.56x10 ⁻⁵⁷	6556.7					
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	1.000	0.9962					
7)	Ψ	-9.30216	1.386614	1.420969	0.000081	1.445024	1.333978				
	E	0.0795	0.0178	0.0192	5.858x10 ⁻⁶	0.0228	0.0249				
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001				
8)	Ψ				1.416265	0.188865	1.464867				1.741711
	E				0.1039	0.2992	0.2184				0.00914
	∞				<.0001	0.2095	0.0136				<.0001
9)	Ψ	-9.67148	1.819323	1.025261		5.895x10 ⁻⁶	0.000033	0.018106	0.041217	0.98885	
	E	0.047	0.0123	0.0167		2.292x10 ⁻⁷	2.314x10 ⁻⁷	0.0532	0.00140	0.0	
	∞	<.0001	<.0001	<.0001		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	

Nota: Ψ : valor de los parámetros ϵ : error estándar de los parámetros; ∞ : nivel de significancia de los parámetros.
Elaboración propia.

Álvarez-González, & Velázquez-Martínez, 2014), *P. patula* (Hernández-Pérez, De los Santos-Posadas, Ángeles-Pérez, Valdez-Lazalde, & Volke- Haller, 2013), *P. oocarpa* y *P. douglasiana* (López- Martínez, Cruz-Cobos, Nájera-Luna, & Hernández, 2015).

CONCLUSIONES

Los modelos compatibles de volumen comercial ahusamiento se han convertido en una herramienta muy importante para el técnico forestal, ya que con ellos se pueden estimar tanto el volumen total como el volumen comercial; además, en ellos tenemos la

integración de ecuaciones de ahusamiento que nos permite estimar diámetros y alturas del fuste.

Aunque el modelo compatible de volumen comercial-ahusamiento de Fang et al. (2000)

presentó los mejores resultados para *Pinus arizonica*, *P. durangensis* y *P. engelmannii*, el sistema de volumen ahusamiento descrito por Cruz-Cobos et al. (2008) es recomendable por su simplicidad.

REFERENCIAS

- Borders, B. E. (1989). Systems of equations in forest stand modeling. *Forest Science*, 35(2), 548-556.
- Clutter, J. L. (1980). Notes: Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. *Forest Science*, 26(1), 117-120.
- _____, Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., & Bailey, R. L. (1983). *Timber management: A quantitative approach* (333 pp.). NY: Wiley & Sons.
- Corral-Rivas, J. J., Diéguez-Aranda, U., Corral-Rivas, S., & Castedo-Dorado, F. (2007). A merchantable volume system for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forest Ecology and Management*, 238(1-3), 118-129.
- Cruz-Cobos, F., De los Santos-Posadas, H. M., & Valdez-Lazalde, J. R. (2008). Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia*, 42(4), 473-485.
- Demaerschalk, J. P. (1972). Converting volume equations to compatible taper equations. *Forest Science*, 18(3), 241-245.
- Diéguez-Aranda, U., Castedo-Dorado, F., Álvarez-González J. G., & Rojo, A. (2006). Compatible taper function for Scots pine plantations in northwestern Spain. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(5), 1190-1205.
- Fang, Z., & Bailey, R. L. (1999). Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in southern China. *Forest Science*, 45(1), 85-100.
- Fang, Z., Borders, B. E., & Bailey, R. L. (2000). Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. *Forest Science*, 46(1), 1-12.
- Hernández-Pérez, D., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., & Volke-Haller, V. H. (2013). Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(16), 35-45.
- Kozak, A., Munro, D. D., & Smith, J. H. G. (1969). Taper functions and their application in forest inventory. *The Forestry Chronicle*, 45(4), 278-283.
- Lenhart, J. D., & Clutter, J. L. (1971). Cubic-foot yield tables for old-field loblolly pine plantations in the Georgia Piedmont (Report 22, Georgia Forest Research Council [12 pp.]). Georgia: Georgia Forest Research Council.
- López-Martínez, J. C., Cruz-Cobos, F., Nájera-Luna, J. A., & Hernández, F. J. (2015). Modelos de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus oocarpa* y *Pinus douglasiana* en la región de Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 23(64), 47-53.
- Lynch, T. B., Chang, S. T., & Chandler, J. P. (1992). Estimation of individual tree volume by importance sampling and antithetic variates from the cylindrical shells integral. *Canadian Journal of Forest Research*, 22(3), 326-335.
- Pompa-García, M., Corral-Rivas, J. J., Díaz-Vázquez, M. A., & Martínez-Salvador, M. (2009). Función de ahusamiento y volumen compatible para *Pinus arizonica* Engelm. en el suroeste de Chihuahua. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(105), 119-136.
- Quiñones-Barraza, G., De los Santos-Posadas, H. M., Álvarez-González, J. G., & Velázquez-Martínez, A. (2014). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia*, 48(5), 553-567.
- Teshome, T. (2005). A ratio method for predicting stem merchantable volume and associated taper equations for *Cupressus lusitanica*, Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 204(2-3), 171-179.
- Valdez-Lazalde, R., & Lynch, T. B. (2000). Ecuaciones para estimar volumen comercial y total en rodales aclareados en *Pinus patula* en Puebla, México. *Agrociencia*, 34(6), 747-758.

Efectos del té de yerba mate, reflejado en el tiempo obtenido en el trabajo del día (WOD) en deportistas que practican CrossFit

Mate tea effects reflected in time performed in the work of the day (WOD) in athletes who practice CrossFit

Alejandra Ortega-Bueno*, Margarita Isabel Ruiz-Esparza*,
Ricardo Ernesto Ramírez-Orozco**✉

Ortega-Bueno, A., Ruiz-Esparza, M. I., & Ramírez-Orozco, R. E. (2018). Efectos del té de yerba mate, reflejado en el tiempo obtenido en el trabajo del día (WOD) en deportistas que practican CrossFit. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 68-73.

RESUMEN

Actualmente el consumo de suplementos para mejorar el rendimiento ha aumentado sin considerar las consecuencias que ocasionan si no se toman apropiadamente. La yerba mate ha sido considerada una candidata contra enfermedades como la obesidad por sus múltiples efectos como: disminución en la diferenciación de adipocitos y triglicéridos, incremento de la tasa metabólica, función antioxidante y antiinflamatoria. Los beneficios en el deporte no han sido esclarecidos, por lo cual se consideró el estudio de los efectos del té de yerba mate en el rendimiento de deportistas que practican CrossFit habitualmente ($n=30$). Treinta minutos antes de la prueba consumieron 300 ml de té de yerba mate, el rendimiento fue evaluado en términos de tiempo total de ejecución de rutina. Se observó un efecto positivo en el tiempo de rutina

cuando el té de yerba mate fue ingerido (4:46 minutos vs. 4:12 minutos) $p=0.001$. Los aportes de este estudio resultan útiles para nuevas investigaciones en nutrición deportiva y rendimiento en atletas.

ABSTRACT

Nowadays, the use of nutritional supplements among athletes to improve performance has increased without considering the consequences that may result if not taken properly. However, the natural beverage mate tea is considered as candidate against diseases like obesity because of its multiple benefits, such as: a lower differentiation of adipocytes and triglycerides, an increase in the metabolic rate in addition to its antioxidant and anti-inflammatory function. Benefits in sport performance have not been elucidated yet, which led us to study yerba mate effects in sport performance of CrossFit athletes. Thirty athletes who usually practice CrossFit were evaluated. Mate tea (300 ml) was consumed 30 minutes before the test; performance was evaluated in terms of the total time taken to complete a routine. A positive effect was noted on athletic performance when mate tea was consumed (4:46 minutes vs. 4:13 minutes) $p=0.001$. The contributions of this study are useful for new research into sports nutrition and athlete performance.

Palabras clave: té de yerba mate; rendimiento; CrossFit; ergogénico; suplemento; resistencia.

Keywords: mate tea; performance; CrossFit; ergogenic; supplement; resistance.

Recibido: 15 de marzo de 2017, aceptado: 13 de noviembre de 2017

* Centro de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Av. Universidad 940, Ciudad Universitaria, C. P. 20131, Aguascalientes, Aguascalientes, México. Correo electrónico: ale.ortegab@hotmail.com; isabelruizem@gmail.com

** Departamento de Nutrición y Cultura Física, Centro de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Av. Universidad 940, Ciudad Universitaria, C. P. 20131, Aguascalientes, Aguascalientes, México. Correo electrónico: licrero@hotmail.com

✉ Autor para correspondencia

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen componentes de alimentos naturales como el té de yerba mate (*Ilex paragua-*

riensis), que es consumido como una bebida de infusión, actualmente la yerba mate es considerada una de las más consumidas en el mundo, es distribuida en bolsas individuales como té o concentrado para suplemento en industrias de alimentos (Filip, López, Giberti, Coussio, & Ferraro, 2001; Myung-Sook, Hyo Jin, Sang Ryong, Do Yeon, & Un Ju, 2017). El té de yerba mate lleva un proceso de secado lento por medio del uso de humo de leña, denotando en la variedad de características reflejadas en el sabor, aroma y cambios en la composición química del té, de los cuales diversos componentes tales como polifenoles (ácido clorogénico), cafeína, flavonoides (quercetina, rutina y kaempferol) teobromina y alcaloides purínicos forman parte (Bastos, De Oliveira, Matsumoto, Carvalho, & Ribeiro, 2007; Gómez-Juaristi, Martínez-López, Sarria, Bravo, & Mateos, 2017; Heck & de Mejía, 2007).

Algunos de los múltiples beneficios documentados en la literatura incluyen función antioxidante, mejora en la respuesta antiinflamatoria, además de una disminución en la diferenciación de adipocitos y triglicéridos; todo esto observado en diversos estudios animales (Gambero & Ribeiro, 2015). Por otro lado, incluso se ha descrito una mejoría en modelos murinos de obesidad en el restablecimiento de niveles normales de glucosa, aminorando los efectos de la resistencia a la insulina (Kang et al., 2012).

La yerba mate es utilizada como droga vegetal o extractos en fármacos fitoterápicos para tratamientos contra el sobrepeso y la obesidad, además de como componente en suplementos dietéticos por su contenido de micronutrientes y su acción energizante; sin embargo, sólo se ha reportado el efecto de aumentar la tasa metabólica basal y reducir el coeficiente respiratorio en periodos de descanso prolongados de 1-4 h) (Martinet, Hostettmann, & Schutz, 1999).

Por otro lado, el CrossFit es un régimen de actividad física basado en la realización de movimientos funcionales en intervalos de alta intensidad, está constituido principalmente por componentes de estilo olímpico de levantamiento de pesas, pliometría y calistenia (Poston et al., 2016). Algunos de los ejercicios más comunes de esta disciplina son carrera a pie, gimnasia, rueda y levantamiento de pesas; la combinación de frecuencia y alta intensidad entre estos implica poco tiempo de recuperación, lo que reporta una mejoría importante en la con-

dición física (Ledon & Tosti, 2017). Las sesiones de CrossFit normalmente están compuestas por cuatro partes: calentamiento, ejercicios de técnica y fuerza, el trabajo del día (WOD) y se finaliza con series de estiramientos (Smith, Sommer, Starkoff, & Devor, 2015). En este contexto, la obtención de un mejor rendimiento conlleva a los deportistas a la búsqueda de alternativas, como lo es la suplementación nutricional (Sánchez-Oliver, Miranda León, & Guerra Hernández, 2008).

Burke & Deakin (2006) definen un suplemento nutricional como un producto que es ingerido por vía oral que contiene un ingrediente de la dieta para suplementar la alimentación o para mejorar el rendimiento con base en una marca impuesta ya sea por tiempo, velocidad, fuerza, coordinación, etc., por mencionar algunas características. Existe una variedad importante de suplementos, como vitaminas, minerales, proteínas, aminoácidos, preparaciones de medicina tradicional, extractos de hierbas, ácidos grasos esenciales, prebióticos, enzimas, entre otros compuestos y metabolitos (Burke & Deakin, 2006).

El uso de suplementos en personas que realizan deporte ha ido en aumento de acuerdo con estudios que denotan que 48% aproximadamente de atletas universitarios consumen este tipo de ayudas ergogénicas (Woolsey, Waigandt, & Beck, 2010). El deportista los ingiere con el fin de obtener un efecto ergogénico, es decir, una ayuda externa para mejorar el rendimiento físico de acuerdo con la disciplina llevada a cabo (figura 1).



Figura 1. Una dieta deficiente y la falta de suplementación adecuada se ven reflejados en el rendimiento deportivo. Imagen de CrossfitBath (2017).

Hoy día, la imagen corporal se ha vuelto una determinante en la sociedad, es una de las causas en el aumento de ayudas ergogénicas, lo que causa un abuso entre los asistentes a gimnasios y deportistas (Santesteban Moriones & Ibáñez Santos, 2017). Debido a la problemática que existe por el abuso de suplementos se optó por buscar una mejor opción, orgánica y menos dañina que pueda aportar beneficios similares a los de las ayudas ergogénicas. La falta de evidencia de las propiedades del té de yerba mate con respecto a la mejoría en el desempeño deportivo permite plantear el objetivo de comprobar los efectos que causa el té de yerba mate en el rendimiento de deportistas reflejado en el tiempo de ejecución de la rutina del día en deportistas que practican CrossFit.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en 30 deportistas que practican CrossFit en el gimnasio Infinity Fitness Center de la ciudad de Aguascalientes. Se tomaron en consideración los siguientes criterios: atletas que practican CrossFit con edades de 18 a 35 años de ambos sexos, sin limitación por alguna lesión, con un estado de salud óptimo, con y sin dominio de los ejercicios a realizar para la investigación. Se utilizaron remadoras Xebex® y pelotas medicinales GetRxd® de 16 lb para los hombres y de 14 lb para las mujeres. El WOD aplicado constó de tres ejercicios diferentes realizados a un máximo esfuerzo.

Ejercicios del WOD

- Remo en un tramo de 250 metros: ejercicio que consiste en colocarse en la máquina de remo, sentarse en la misma, y posicionar los pies en los pedales, se toma el manillar con los brazos extendidos realizando el gesto de remo hasta llegar hacia el pecho y después devolver el manillar hacia enfrente haciendo una flexión de piernas.
- 20 Burpees: consiste en bajar a sentadilla hasta tocar el suelo con las manos y sin despegarlas del mismo para después impulsar ambas piernas a la vez hacia atrás, hasta quedar en posición para realizar una lagartija y una vez realizado, se regresan ambas piernas acercando las rodillas al pecho para subir por completo y finalizar con un salto subiéndolo las manos y dando un aplauso por encima de la cabeza.
- 20 disparos de pelota: consisten en tomar una pelota medicinal con ambas manos frente al pecho, bajar en sentadilla rompiendo

ligeramente el ángulo de 90° para después subir e inmediatamente lanzar la pelota hacia arriba tocando la pared a una altura de 9 pies (2.74 m) y finalmente interceptar la pelota y repetir el ejercicio de manera continua.

Suplementación de té de yerba mate

Se administró una toma de 300 ml de agua con un contenido de 30 g de yerba mate Rosamonte® dejando reposar el té por 15 min con agua purificada a 70 °C. Este fue tomando 30 minutos antes de realizar la prueba.

Dieta, descanso y realización del WOD

Se consideraron factores como la dieta, horas de descanso y rutinas anteriores, por lo que con tres semanas de anticipación se estructuró un plan de alimentación de acuerdo con sus necesidades de actividad física de tipo isocalórico que no modificara su peso, el plan fue estructurado de acuerdo a menús establecidos y estandarizados para disminuir la presencia de sesgos; además de continuar con la misma rutina se asesoró a los participantes sobre la ingesta diaria de alimentos en el mismo horario, así como las horas de descanso y sueño. Con respecto a la realización del WOD, todo fue cronometrado y verificado por el responsable y entrenador asegurando la correcta realización del ejercicio. Durante la primera sesión, se realizó de manera rutinaria el WOD sin tomar el té, después de una semana se volvió a realizar la sesión en esta ocasión con la toma del té. Las pruebas se realizaron en el mismo horario, esto se hizo por triplicado para validar la confiabilidad de los datos recabados.

Análisis estadístico

Los datos fueron representados como: media, desviación estándar, rango y porcentajes. Se verificó la distribución de variables mediante la prueba de Shapiro-Wilk, se utilizaron pruebas como: *t* de Student para muestras independientes para observar diferencias entre género y *t* de Student Pareada, se consideró un nivel de significancia de $p < 0.05$. El análisis de los datos se llevó a cabo mediante el programa SPSS versión 20.

RESULTADOS

Se estudió a 30 deportistas que practican CrossFit del gimnasio Infinity Fitness Center de la ciudad de Aguascalientes, México; con un rango de edad de 18 a 35 años, la media de edad de la población estudiada fue de 26.23 ± 5.0 años, cabe mencionar

Tabla 1
Tiempo cronometrado: mínimo y máximo

Variable	Media ± DE	Mínimo	Máximo
Sin té de yerba mate (min:seg)	4:46 ± 0.86	2:58	6:10
Con té de yerba mate (min:seg)	4:12 ± 0.78	3:06	6:09

Nota: Datos representados en rangos, media y desviación estándar. n= 30.
Elaboración propia.

Tabla 2
Suplementación de té de yerba mate y tiempo para completar entrenamiento (n= 30)

	Sin ingestión de té de yerba mate (min:seg)	Con ingestión de té de yerba mate (min:seg)	p
Género masculino	4:41 ± 1.0	4:01 ± 0.80	0.015
Género femenino	4:49 ± 0.72	4:24 ± 0.78	0.035
Población total	4:46 ± 0.86	4:12 ± 0.78	0.001

Nota: Los datos del tiempo cronometrado fue representado en: media y desviación estándar. Prueba utilizada: t-Student pareada.
Elaboración propia.

que 50% de la muestra representa cada género (15 hombres y 15 mujeres). Los datos antropométricos fueron los siguientes: peso: 71.6 ± 11.1 kg, talla: 1.69 ± 0.06 m, IMC: 24.8 ± 3.6 m/kg², cabe mencionar que de acuerdo con su índice de masa corporal fueron clasificados de la siguiente manera: normopeso: 56.7% (n= 17), sobrepeso: 36.7% (n= 11) y obesidad: (n= 2). Los resultados con base en el rendimiento por tiempo cronometrado indicaron una mejora en la eficiencia para realizar el WOD con una media de 32.7 segundos menos en comparación con la primer sesión realizada (4:46 vs. 4:13 minutos) p= 0.001 (tabla 1).

En cuanto al rendimiento deportivo con base en el tiempo cronometrado de acuerdo al

género después de consumir el té de yerba mate se encontró que las mujeres obtuvieron menor tiempo en comparación con el género masculino de 23 segundos de diferencia (4:24 vs. 4:01 min) p= 0.385; no obstante, no representa diferencias estadísticas entre géneros; sin embargo, cabe mencionar que esta mejora en el tiempo de ejecución de rutina es notoria al momento de estratificar por género, como muestran la tabla 2 y la figura 2.

DISCUSIÓN

Actualmente existe una gran variedad de suplementos deportivos, entre ellos las bebidas ergogénicas, de las cuales muchas son utilizadas de manera excesiva sin medir las consecuencias negativas que

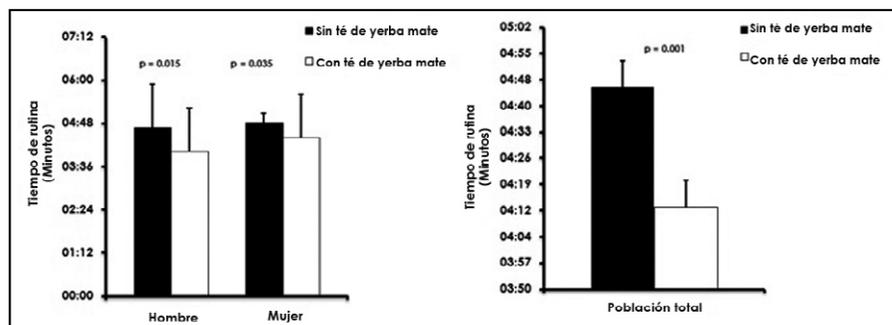


Figura 2. Tiempo cronometrado de rutina de acuerdo con género y población total. (Izquierda) Medición del rendimiento deportivo con base en el tiempo antes y después de la suplementación con té de yerba mate por género (n= 15). (Derecha) Medición del rendimiento deportivo con base en el tiempo antes y después de la suplementación con té de yerba mate en población total (n= 30).

Elaboración propia.

pueden ocasionar en la salud, ya que no se conocen por completo sus componentes o el proceso por el que fueron sometidas (Sánchez Oliver et al., 2008). Se buscó comprobar las propiedades de este té como bebida ergogénica. Estudios de Schubert, Astorino, & Leal Azevedo (2013) apoyan la idea de considerar el té de la sustancia estudiada como parte de una suplementación nutricional por su acción energizante debido a la cafeína natural que contiene, lo cual ha incrementado el consumo de productos que contienen yerba mate (Schubert et al., 2013).

La yerba en estudio es una planta rica en compuestos orgánicos y vitaminas, sus propiedades antioxidantes y energizantes han sugerido una mejora en la optimización de la absorción nutricional de esta manera mejorando el rendimiento de los deportistas (Maiocchi et al., 2016); al consumir esta bebida, los resultados de este trabajo reflejan un efecto positivo en el rendimiento en términos de menor tiempo en la realización del WOD. Ello pudiera deberse al efecto agudo de la cafeína contenida en la yerba mate, la medición en situación de ayuno puede esclarecer mejor el efecto inmediato en el ejercicio evitando sesgos de factores como la dieta, descanso, entre otros; sin embargo, debido al tipo de disciplina, esto puede comprometer al deportista debido a la alta demanda energética requerida en este tipo de actividad física, lo que afecta su salud.

Alkhatib describe el efecto en el aumento de la tasa oxidativa de grasas durante la actividad física y, por ende, la energía proveniente de ácidos grasos, lo que puede ser una explicación en la mejora del rendimiento, esto se ha propuesto como parte del tratamiento de las estrategias focalizadas a la pérdida de peso (Alkhatib, 2014). Por otro lado, Schubert et al. (2013) estudiaron el efecto en el rendimiento al administrar tres bebidas "energizantes" (Placebo, Guayakí Yerba Maté Organic Energy Shot™, Red Bull Energy Shot™) en atletas corredores, y no encontraron diferencias en el rendimiento en los que tomaban estas bebidas (Schubert et al., 2013), a diferencia de nuestros resultados hubo una disminución en el tiempo de la realización del WOD de los deportistas de CrossFit, lo que puede deberse al efecto agudo de la cafeína y del aumento en la tasa metabólica anteriormente mencionado, al optimizar el uso de energía durante la actividad física; sin embargo, es necesario comprobar este efecto en otro tipo de deportes de corta y larga duración y evaluar de mejor manera este beneficio.

Al analizar la problemática que existe sobre el consumo excesivo de suplementos en deportistas y los problemas de dopaje, conocer a fondo los efectos de la yerba mate y de sus componentes puede ser considerado una opción viable de bebida para deportista sin sanción por dopaje. Alfredo Cabañes & Salinero (2013) estudian el consumo de cafeína durante el entrenamiento y competición basados en la normativa antidopaje; en ello se ha observado un efecto positivo reflejado en fuerza y resistencia en el deportista sin miedo a resultar positivo en la prueba de dopaje (Alfredo Cabañes & Salinero, 2013). Hoy en día, a causa de los beneficios aportados por esta sustancia, 3 de cada 4 deportistas consumen cafeína antes o durante una competición; esto ha sido observado principalmente en deportes de resistencia (Del Coso, Muñoz, & Muñoz-Guerra, 2011).

La realización de futuras investigaciones con un mayor control en variables que puedan sesgar los resultados en el desempeño de los atletas, como consumo de medicamentos, tabaco y alcohol, ayudas ergogénicas, horas de sueño, puede contribuir a un mejor entendimiento sobre los efectos reales de la yerba mate, además de poner a prueba otros posibles beneficios potenciales, entre ellos la disminución de lípidos en sangre por ejemplo. La realización de este primer estudio piloto nos da pauta para lograr un mejor control sobre aspectos como interacción de nutrimentos, suplementación de manera individual o conjunta entre otros, lo cual puede permitir en un futuro el desarrollo de estrategias que permitan mejorar el rendimiento en el deportista.

CONCLUSIONES

Tanto en la disciplina de CrossFit como en cualquier otro deporte, es importante el desempeño y mejora constante en los principales componentes del rendimiento deportivo como velocidad, fuerza y coordinación, ya que permitirá tener un mejor posicionamiento y/o resultado en el entrenamiento y competencias. Nuestros datos sugieren el continuo estudio de la ingestión de té de yerba mate antes del ejercicio que permitirá esclarecer los beneficios y efectos secundarios; sin embargo, con base en los resultados positivos obtenidos, el té de yerba mate puede llegar a ser considerado una opción de suplementación nutricional una vez elucidados a fondo sus efectos en el deportista, la interacción con la dieta, descanso y el tipo de actividad física.

Perspectivas del estudio

Al ser un primer estudio piloto, se ha considerado para estudios posteriores variables como pruebas de esfuerzo, variabilidad de la frecuencia cardiaca, pruebas que permitan la medición de resistencia,

fuerza, potencia y velocidad; de manera individual y conjunta, esto permitirá elucidar de una manera más adecuada los beneficios aportados por la yerba mate como parte de la suplementación deportiva.

REFERENCIAS

- Alfredo Cabañes, J. J., & Salinero, J. C. (2013). La ingestión de una bebida energética con cafeína mejora la fuerza-resistencia y el rendimiento en escalada deportiva. *Archivos de Medicina del Deporte*, 30(4), 215-220.
- Alkhatib, A. (2014). Yerba Maté (*Ilex Paraguariensis*) ingestion augments fat oxidation and energy expenditure during exercise at various submaximal intensities. *Nutrition & Metabolism*, 11, 42.
- Bastos, D. H. M., De Oliveira, D. M., Matsumoto, R. L. T., Carvalho, P. O., & Ribeiro, M. L. (2007). Yerba maté: Pharmacological properties, research and biotechnology. *Medicinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology*, 1(1), 37-46.
- Burke, L., & Deakin, V. (2006). *Clinical Sports Nutrition* (3rd. ed., pp. 485-580). Sydney-NY: McGraw-Hill.
- Crossfitbath. (2017). Blog: WOD19-01-2018 [Fotografía]. Recuperado de <http://crossfitbath.com/wod-19-18/#lightbox/gallery10604/0>
- Del Coso, J., Muñoz, G., & Muñoz-Guerra, J. (2011). Prevalence of caffeine use in elite athletes following its removal from the World Anti-Doping Agency list of banned substances. *Applied Physiology Nutrition, and Metabolism*, 36(4), 555-561.
- Filip, R., López, P., Giberti, G., Coussio, J., & Ferraro, G. (2001). Phenolic compounds in seven South American *Ilex* species. *Fitoquímica*, 72(7), 774-778.
- Gambero, A., & Ribeiro, M. L. (2015). The positive effects of yerba maté (*Ilex paraguariensis*) in obesity. *Nutrients*, 7(2), 730-750.
- Gómez-Juaristi, M., Martínez-López, S., Sarria, B., Bravo, L., & Mateos, R. (2017). Absorption and metabolism of yerba mate phenolic compounds in humans. *Food Chemistry*, 240, 1028-1038. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.08.003
- González-Gallego, J., Garrido Pastor, J., Mataix Verdú, J., & Villegas García, J. (1988). *Nutrición y ayudas ergogénicas en el deporte*. Arch. Medicina del Deporte.
- Heck, C. I., & De Mejia, E. G. (2007). Yerba Mate Tea (*Ilex paraguariensis*): A comprehensive review on chemistry, health implications, and technological considerations. *Journal of Food Science*, 72(9), R138-R151.
- Kang, Y. R., Lee, H. Y., Kim, J. H., Moon, D. I., Seo, M. Y., Park, S. H.,...Oh, H. G. (2012). Anti-obesity and anti-diabetic effects of Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) in C57BL/6J mice fed a high-fat diet. *Laboratory Animal Research*, 28(1), 23-29.
- Ledon, J. A., & Tosti, A. (2017). CrossFit-associated allergic contact dermatitis. *Dermatitis*, 28(6), 368. doi: 10.1097/DER.0000000000000321
- Maiocchi, M. G., Del Vitto, L. A., Petenatti, M. E., Marchevsky, E. J., Avanza, M. V., Pellerano, R. G., & Petenatti, E. M. (2016). Composición multielemental y valor nutricional de "dumosa" (*Ilex dumosa*), "yerba mate" (*I. paraguariensis*) y su mezcla comercial en diferentes formas de uso. *FCA UNCUYO*, 48(1), 145-159.
- Martinet, A., Hostettmann, K., & Schutz, Y. (1999). Thermogenic effects of commercially available plant preparations aimed at treating human obesity. *Phytomedicine*, 6(4), 231-238.
- Myung-Sook, C., Hyo Jin, P., Sang Ryong, K., Do Yeon, K., & Un Ju, J. (2017). Long-term dietary supplementation with yerba mate ameliorates obesity and metabolic disorders in mice by regulating energy expenditure and lipid metabolism. *Journal of Medicinal Food*, 20(12), 1168-1175.
- Poston, W. S., Haddock, C. K., Heinrich, K. M., Jahnke, S. A., Jitnarin, N., & Batchelor, D. B. (2016). Is high-intensity functional training (HIFT)/crossfit safe for military fitness training? *Mil Med*, 181(7), 627-637.
- Sánchez Oliver, A. J., Miranda León, M. T., & Guerra Hernández, E. (septiembre de 2008). Estudio estadístico del consumo de suplementos nutricionales y dietéticos en gimnasios. *ALAN Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 58(3), 221-227.
- Santesteban Moriones, V., & Ibáñez Santos, J. (2017). Ayudas ergogénicas en el deporte. *Nutrición Hospitalaria*, 34(1), 204-215.
- Schubert, M. M., Astorino, T. A., & Leal Azevedo, J. (2013). The effects of caffeinated "energy shots" on time trial performance. *Nutrients*, 5(6), 2062-2075.
- Smith, M. M., Sommer, A. J., Starkoff, B. E., & Devor, S. T. (2015). Crossfit-based high-intensity power training improves maximal aerobic fitness and body composition. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(10): e1. doi: 10.1519/JSC.0b013e318289e59f
- Woolsey, C., Waigandt, A., & Beck, N. C. (2010). Athletes and energy drinks: Reported risk-taking and consequences from the combined use of alcohol and energy drinks. *Journal of Applied Sport Psychology*, 22(1), 65-71.

La estrategia ambiental en pequeños negocios de artesanía, un ejemplo de medición

Environmental strategy in handcraft small businesses, an example of measurement

Patricia S. Sánchez-Medina*✉

Sánchez-Medina, P. S. (2018). La estrategia ambiental en pequeños negocios de artesanía, un ejemplo de medición. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 74-83.

RESUMEN

En este trabajo se detalla un procedimiento específico para conceptualizar y medir la estrategia ambiental en negocios de artesanía en tres estados de la República Mexicana (Oaxaca, Puebla y Tlaxcala). Se realiza la conceptualización y operacionalización desde la percepción del artesano hasta el procedimiento operativo de una variable. Como resultado del proceso se presenta la validez estadística utilizando un análisis factorial exploratorio, la variable estrategia ambiental se explica a partir de cuatro factores con una confiabilidad de la escala de .88, medida a través del alfa de Cronbach.

ABSTRACT

This paper details a specific procedure to conceptualize and measure environmental strategy of handcraft businesses. The conceptualization and operationalization is studied from the perception of

Palabras clave: estrategia ambiental; pequeños negocios; artesanía; México.

Keywords: environmental strategy; small business; handcrafts; Mexico.

Recibido: 10 de marzo de 2017, aceptado: 30 de octubre de 2017

* Instituto Politécnico Nacional-CIIDIR Unidad Oaxaca. Hornos No. 1003, C. P. 71230, Col. Noche Buena, Municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. Correo electrónico: psanchez@ipn.mx, ms_287506@yahoo.com.mx

✉ Autor para correspondencia

the artisan to the operating procedure of a variable. As a result of the process, the statistical validity of the study is presented using an exploratory factorial analysis, and the environmental strategy variable is explained with four factors with a reliability on the scale of .88 according to Cronbach's alpha.

INTRODUCCIÓN

En este documento se estudió la fabricación de alfarería, actividad común entre la población de artesanos de México. El uso de utensilios de barro, así como la elaboración de artesanías, conllevan a la existencia de numerosos talleres alfareros. Esta actividad se practica en muchos estados de la República Mexicana, destacan estados como Puebla, Tlaxcala y Oaxaca. El uso de trastos de barro vidriado es tradicional entre la población, cerca de 30% de los hogares tienen aún la costumbre de preparar, consumir o guardar alimentos en utensilios de barro vidriado a baja temperatura (Instituto Nacional de Salud [INS], 2000).

El 98% de las empresas artesanales en México son catalogadas como pequeñas y medianas, en su mayoría cuentan con infraestructura de tipo familiar (Sales Heredia, 2013) y, aun cuando contribuyen de manera importante en el desarrollo regional de diversas entidades del país, se enfrentan a diversos problemas como la baja calidad de sus productos, pérdida de identidad de los mismos, escasa comercialización, disminución en los precios de la artesanía y bajas ventas, debido principalmente a la competencia con productos chinos y a los

nuevos requerimientos impositivos establecidos por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (Aguilar, 2015; Posada García, 2004; Velásquez, 2015).

Otro aspecto reciente que involucra a las empresas artesanales y resulta de interés en el desarrollo de este documento es el uso de una gran variedad de materiales de origen natural, mineral y animal (Sales Heredia, 2013), además de emplear sustancias tóxicas en productos de alfarería, lo cual ha colocado a esta actividad ante el cuestionamiento de sus efectos sobre el medio ambiente.

Araya (2003) y Sánchez-Medina (2012) señalan la necesidad de realizar más investigación que muestre el impacto real de las artesanías sobre el ambiente, especialmente cuando se tienen zonas en donde especies nativas han desaparecido, como el encino utilizado para el horneado de artesanías de alfarería en San Bartolo Coyotepec, Oaxaca, el copal utilizado en la elaboración de alebrijes en Arrazola, Oaxaca, y la palma utilizada para la elaboración de diferentes artesanías de este material en distintas comunidades de la región Mixteca de Oaxaca. Además, es importante resaltar las ventajas comerciales que se derivarían de lograr un buen comportamiento ambiental, como se demuestra en investigaciones realizadas por Sánchez-Medina, Díaz-Pichardo, Bautista-Cruz y Toledo-López (2015) y Sánchez-Medina, Toledo-López, Bautista-Cruz y Regino-Maldonado (2014).

El presente trabajo detalla el procedimiento para conceptualizar y medir la estrategia ambiental en negocios de artesanías de Oaxaca, Puebla y Tlaxcala, México, con la finalidad de mostrar las acciones en pro del ambiente que estos negocios se encuentran realizando, además de proporcionar una escala que permita medir aspectos ambientales en el sector artesanal, en donde la investigación es todavía escasa.

Dentro de la literatura sobre administración ambiental, resulta claro que la estrategia ambiental se visualiza como una competencia organizacional; no obstante, existen diversas maneras en que el concepto ha sido definido y estudiado. Acotando el mismo a nivel de la empresa, los conceptos sobre estrategia pueden resumirse de la siguiente manera:

Hart (1995) afirma que la estrategia ambiental se refiere a las acciones realizadas por las compañías encaminadas a la prevención de la contaminación,

manejo del producto y desarrollo sustentable, para lo cual la empresa requiere de ciertos recursos como activos fijos, habilidades de los empleados y procesos organizacionales.

Según Sharma (2001), la estrategia ambiental son acciones que emplea la empresa para reducir el daño ambiental que sus actividades pueden ocasionar. Entre las acciones que realizan se encuentran la protección de hábitats naturales, compra o uso de materiales renovables, manejo de desechos, mejora de sus instalaciones y procedimientos, capacitación a empleados, inversión en cuidado ambiental, investigación para la mejora de sus procedimientos, alianzas, auditoría ambiental y divulgación al público.

Aragón-Correa, Hurtado-Torres, Sharma y García-Morales (2008) se refieren a la estrategia ambiental como prácticas de prevención y eco-eficientes que se realizan con la finalidad de proteger o conservar el medio ambiente natural.

Para Čater, Prašnikar y Čater (2009, p. 58), la estrategia ambiental se refiere a la "medida en que la empresa integra los problemas ambientales a sus decisiones en relación a elección de tecnología, ubicación de plantas e inversiones en investigación y desarrollo".

Para Darnall, Henriques y Sadorsky (2010) la estrategia ambiental son las acciones que las organizaciones realizan al adoptar prácticas ambientales. Como ejemplo de estrategia ambiental se encuentran la aplicación de una regulación ambiental, establecimiento de metas de desempeño ambiental y realización de auditorías internas y externas.

Walls, Phan y Berrone (2011, p. 78) definen la estrategia ambiental como un "conjunto de iniciativas que mitigan el impacto de la empresa sobre el ambiente natural".

De acuerdo con Chen, Tang, Jin, Li y Paille (2015, p. 488), la estrategia ambiental se refiere al "grado en que la empresa integra los problemas ambientales dentro de su proceso de planeación estratégica".

Journeault, De Rongé y Henri (2016) argumentan que la estrategia ambiental se refiere a las eco-prácticas en las organizaciones, relacionadas con eco-producción y eco-marketing; así, la estrate-

gia ambiental es la integración de aspectos ambientales dentro de las actividades de la empresa motivada por los intereses de eco-eficiencia y eco-etiquetado.

Los conceptos descritos con anterioridad han sido aplicados en contextos de grandes empresas en países desarrollados y en el sector manufacturero y de servicios, estos conceptos coinciden en medir la estrategia ambiental como acciones encaminadas a reducir el daño ambiental. Se muestra, entonces, en esta literatura, el interés de realizar acciones encaminadas a la prevención, eco-eficiencia, manejo del producto y desarrollo sustentable para reducir el daño ambiental con ciertos recursos como activos fijos, procesos organizacionales y proactividad ambiental.

La investigación realizada en pequeñas empresas, y más específicamente en negocios de artesanías, aún sigue siendo limitada; si bien es cierto, hay estudios que abordan la temática ambiental en este sector, tales como Sánchez-Medina (2012), Sánchez-Medina y Díaz-Pichardo (2017), Sánchez-Medina et al. (2014) y Sánchez-Medina et al. (2015), quienes hacen ver la carencia de modelos aplicables al sector artesanal de países en desarrollo y hacen aproximaciones interesantes de modelos occidentales aplicadas al contexto artesanal para explicar el comportamiento medioambiental en estos sectores, se carece todavía de investigación que explique suficientemente su estrategia ambiental. Este artículo es una aproximación a la medición de la estrategia ambiental en negocios de artesanías en economías emergentes, que parte de la literatura que se tiene a nivel internacional, pero sobre todo de autores que han explicado los aspectos ambientales en el sector artesanal; para ello, en esta investigación estrategia ambiental se define como el conjunto de acciones realizadas por el artesano con la intención de mitigar el daño ambiental de sus actividades.

Contexto de los pequeños negocios de artesanías en tres ciudades del centro y sur de México

Los negocios de artesanías tienen en su mayoría características centradas en unidades de producción familiar, basadas en valores y creencias muy arraigados a ideas tradicionalistas, se encuentran dispersos, su participación en el mercado es limitada, por lo general están ubicados en áreas rurales y sus características están relacionadas con la capacidad emprendedora de sus dueños (Hernández Girón & Domínguez Hernández, 2003).

“El nivel de producción de estos negocios es bajo, lo cual limita su capacidad para cumplir con plazos y formas de pago, tienen pocas habilidades en mercadeo, tecnología ineficiente y muchas veces inapropiada, combinada con la baja capacidad técnica de los artesanos” (Durham & Littrel, 2000, p. 262; Fillis, 2002, p. 41). Cada negocio de artesanías tiene características diferentes lo que dificulta aún más establecer estrategias competitivas.

“La distancia social entre aquellos artesanos que recibieron una preparación universitaria y aquellos que no estudiaron o tienen un nivel básico de escolaridad puede observarse de manera gráfica en la forma en la cual cada uno hace y vende sus piezas. Los artesanos universitarios o profesionales utilizan diseños y técnicas más sofisticadas” (Hernández-Girón, Domínguez-Hernández, & Caballero-Caballero, 2007, p. 374), venden su trabajo a precios altos en tiendas de diseño o galerías elegantes, estos artesanos han alcanzado un mejor nivel de vida, mientras que los artesanos con un nivel básico de escolaridad utilizan métodos indígenas y venden sus piezas a precios bajos en tiendas de artesanías o a través de intermediarios, muchos de estos artesanos pertenecen a grupos étnicos y tienen una decreciente disponibilidad de recursos naturales; con necesidades económicas urgentes, con poco o nulo acceso a recursos financieros, lo que dificulta aún más su actividad comercial (Durham & Littrel, 2000). Estos artesanos están muy arraigados a sus costumbres culturales y principios religiosos.



Figura 1. Artesano de la ciudad de Puebla moldeando artesanías de talavera.

Fotografía tomada por Patricia S. Sánchez-Medina.

Efectos negativos en la salud de artesanos y usuarios de artesanías de alfarería

Como se ha mencionado con anterioridad, el uso de utensilios de barro vidriado es tradicional entre la población de diversas comunidades mexicanas. Cerca de 30% de la población en México tiene aún la costumbre de preparar, consumir o guardar alimentos en utensilios de barro vidriado a baja temperatura (Instituto Nacional de Salud [INS], 2000).

El riesgo a la salud de la población ocupacionalmente expuesta se presenta debido a que en algunos casos en la fabricación de la alfarería, el material con el que vidrian es comúnmente óxido de plomo, el cual durante las actividades de elaboración y vidriado es manejado por los alfareros sin protección alguna; esto provoca que los alfareros inhalen el plomo durante el proceso de esmaltado y también lo absorban a través del contacto con la piel. Los artesanos depositan el plomo en la tierra, alrededor de sus viviendas y lo respiran ellos y sus familias. Otra preocupación son las emisiones contaminantes de los hornos alfareros, que históricamente han llevado a cabo su combustión con leña, lo cual también merma los recursos forestales (Chantirí, Azamar, Galván, & Lozada, 2003; Sánchez Medina, 2012).

Para eliminar el daño a la salud de los artesanos se inició en 1994 el programa estratégico para la sustitución del plomo y combustible en la alfarería vidriada, ejecutado por el Fondo Nacional para el Fomento de las Artesanías (FONART) y financiado por el Fondo Nacional de Apoyo a las Empresas de Solidaridad. Un año antes la Secretaría de Salud estableció la norma NOM-010-SSA1-1993 para el uso de plomo y cadmio en alfarería, la cual empezó a aplicarse en 1994 a partir del programa para la sustitución del plomo, la NOM-010-SSA1-1993; posteriormente, fue modificada a la NOM-231-SSA1-2002, que es la que regula actualmente los límites de sustancias tóxicas en alfarería. A pesar de la existencia de esta norma, sigue habiendo artesanos que continúan usando metales tóxicos en sus procesos sin tomar en cuenta el peligro que representan, tanto para quienes manipulan estas sustancias como para quienes se encuentran a su alrededor.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cuestionario

Con base en Sharma (2001) y en Sharma y Vredenburg (1998) se diseñó un cuestionario semiestructurado. El mismo permitió conocer de cerca la forma en



Figura 2. Artesanos vidriando sus piezas en Santa María Atzompa, Oaxaca.
Fotografía tomada por Patricia S. Sánchez-Medina.

que operan ambientalmente los negocios de alfarería, así como identificar diversas acciones de estrategia ambiental; se aplicó a 10 negocios de artesanías, y con los resultados obtenidos se realizó un análisis de contenido para redactar reactivos válidos. Posteriormente, se elaboró un cuestionario estructurado, el cual sirvió para realizar una prueba piloto con una muestra de 30 negocios. Con estos datos se determinó la validez interna y discriminante, así como la consistencia interna de la escala. Finalmente, se aplicó el cuestionario estructurado a la muestra final. La información se recopiló a través de entrevistas cara a cara. El cuestionario final estuvo integrado por 88 preguntas: 9 correspondientes a los datos generales del dueño del negocio y 79 que medían la estrategia ambiental.

Muestra

Se aplicó un cuestionario a dueños y encargados de 186 negocios de artesanías, específicamente de la rama alfarería, quedando la muestra distribuida de la siguiente manera: 102 en Oaxaca, 44 en Puebla y 40 en Tlaxcala. De los artesanos entrevistados, 106 son del género masculino y 80 femenino, predominan los artesanos sin escolaridad o escolaridad básica (95), seguidos por aquellos con escolaridad media y media superior (68) y, por último, los artesanos con escolaridad superior (23).

Debido a la inexistencia de una base de datos formal que indique el número real de negocios dedicados a la actividad alfarera, la muestra se seleccionó por conveniencia, el cuestionario se

aplicó a aquellos negocios que accedieron a proporcionar la información y se establecieron rutas específicas de artesanías en los tres estados con la finalidad de que todos los negocios tuvieran la misma probabilidad de ser seleccionados.

Medición de la estrategia ambiental

Para medir la estrategia ambiental se utilizó un conjunto de reactivos que toman en cuenta el contexto artesanal con la intención de medir la realidad observada. Así, la forma en que se midió la estrategia ambiental en los negocios de artesanías de alfarería se observa en la tabla A1 del apéndice A. La escala utilizada fue de tipo Likert con 7 puntos, donde 1= Nada y 7= Mucho.

Debido a que el análisis factorial es una técnica que parte de un modelo de investigación cuasi-experimental no se utiliza un grupo de control para juzgar sobre los hallazgos, sino que se analizan covarianzas entre el conjunto de variables observables (reactivos en el cuestionario) a fin de inferir sobre la existencia de una variable no observable (la estrategia ambiental) que se asume la causa de dichas variables observables.

RESULTADOS

Para determinar la validez de la variable estrategia ambiental, se realizó un análisis factorial exploratorio utilizando el paquete estadístico para ciencias sociales (SPSS) versión 20. Se realizó un análisis factorial exploratorio, utilizando el método de componentes principales, extrayendo los factores con valores propios mayores o iguales que 1.0. Se consideran significativos aquellos reactivos con cargas mayores que 0.5. Para evaluar la aplicabilidad del análisis factorial se utilizó la prueba KMO y esfericidad de Bartlett. Finalmente, se determinó la confiabilidad de la escala mediante el coeficiente alfa de Cronbach (tabla 1).

Como se observa en la tabla 1, el análisis factorial arrojó cuatro factores con una varianza total explicada de 80.34% y un coeficiente alfa de Cronbach de .88. El coeficiente KMO y la significancia de la esfericidad de Bartlett muestran valores aceptables por lo que es factible realizar el análisis factorial.

El primer factor quedó conformado por 6 reactivos (EA7, EA8, EA9, EA10, EA11 y EA12) que hacen referencia al uso de sustancias sin químicos

o menos tóxicas por lo que se ha nombrado "reducción de sustancias tóxicas". Con los resultados obtenidos en este factor se puede notar el interés de los artesanos por reducir el uso de sustancias tóxicas en su proceso de producción.

El segundo factor agrupa 4 ítems (EA12, EA15, EA16 y EA45) relacionados con acciones que los artesanos realizan con la intención de cuidar el medio ambiente, este factor se ha denominado "preservación ambiental". Con este resultado podemos confirmar que los artesanos están preocupados por proteger y cuidar el ambiente natural por lo que realizan acciones de preservación con la intención de mitigar el daño ambiental de sus actividades.

El tercer factor se ha nombrado "inversión y alianzas", los ítems que componen este factor son 3 (EA65, EA66 y EA78). Con este hallazgo se puede apreciar la importancia que tiene para los artesanos crear alianzas, así como invertir en temas relacionados con el cuidado ambiental. En algunos casos, el crear alianzas con otros negocios de artesanías, con centros de investigación u ONG le ha permitido al negocio ser reconocido y mejorar su competitividad con respecto a los demás. El cuarto y último factor hace énfasis en la "restauración del daño al ambiente", y está formado por 2 ítems (EA20 y EA21) que hacen ver el interés que tienen los artesanos por realizar acciones que restablezcan el daño ambiental que su actividad ha causado al ambiente natural.

Es importante aclarar que los resultados aquí obtenidos surgen de escalas subjetivas que son complejas de medir y verificar, y más tratándose de aspectos ambientales que pueden ser sujetos a escasa o nula credibilidad; sin embargo, la escala utilizada en esta investigación ha sido desarrollada a partir de un trabajo de campo que duró aproximadamente cuatro meses, en el que se realizaban entrevistas con los artesanos que duraban de una a dos horas, a través de las cuales se ganaba la confianza del entrevistado, lo cual era vital para observar espacios poco visibles en los lugares de trabajo. También es importante mencionar que, durante las entrevistas, los artesanos se mostraban conocedores de los problemas ambientales que les afectaban, por lo que muchos de ellos eran conscientes y sensibles a la problemática ambiental, y realizaban acciones con conocimiento de causa, por voluntad propia y no por alguna situación regulatoria.

Otro dato importante de mencionar es que el número de factores obtenidos en la tabla 1, así como su nombre, no obedecen a una estructura

preconcebida, sino que emergen como resultado de aplicar por primera vez la escala de estrategia ambiental y realizar sobre los datos obtenidos un análisis

Tabla 1
Análisis factorial de la variable estrategia ambiental

	FACTORES				
	Reducción de sustancias tóxicas (RST)	Preservación ambiental (PA)	Inversión y alianzas (IYA)	Restauración del daño al ambiente (RDA)	Comunidad
Utilización de esmaltes sin plomo (EA7)	.961	.124	.083	.057	.949
Utilización de esmaltes sin estaño (EA8)	.965	.133	.079	.069	.960
Utilización de esmaltes sin cadmio (EA9)	.964	.135	.080	.070	.959
Utilización de esmaltes con bajo contenido de plomo (EA10)	.971	.040	.108	-.049	.958
Utilización de esmaltes con bajo contenido de estaño (EA11)	.966	.050	.116	-.052	.953
Utilización de esmaltes con bajo contenido de cadmio (EA12)	.962	.053	.124	-.055	.946
Separación de desechos orgánicos y no orgánicos (EA15)	.222	.564	.287	.234	.505
Reutilización del barro (EA16)	.058	.592	.132	.304	.463
Mejor administración de la energía eléctrica en el negocio (EA45)	.055	.918	.019	-.074	.852
Mejor administración de la energía eléctrica en el hogar (EA46)	.092	.937	.028	.050	.890
Alianzas con otros negocios de artesanía para el manejo y procesamiento de desechos (EA65)	.033	.156	.786	.041	.645
Alianzas con otros negocios de artesanías para establecer normas ambientales que regulen la artesanía (EA66)	.191	.114	.827	.122	.748
Inversión en investigación con asociaciones industriales para la preservación ambiental (EA78)	.095	.007	.698	.000	.497
Devolución del juguete (pedazos de piezas artesanales con la primera cocción) a los yacimientos de donde fue extraído (EA20)	.006	.132	.077	.912	.856
Devolución de otros desechos naturales a los lugares donde fueron extraídos (EA21)	-.025	.115	.051	.925	.872
Varianza explicada	41.15	18.70	10.63	9.86	80.34
Alfa de Cronbach	.98	.80	.67	.88	.88
KMO					.719
				Chi cuadrada	5116.589
				Grados de libertad	105
				Significancia	0.000
Esfericidad de Bartlett					

Nota: Método de rotación: Varimax con normalización de Kaiser. La rotación ha convergido en 5 iteraciones. Método de extracción: Análisis de componentes principales. Los factores de carga aceptados fueron mayores a 0.5. Elaboración propia.

factorial exploratorio. La forma en que se distribuyen los factores de carga entre los cuatro factores resultantes es evidencia de validez discriminante: puede observarse que cada reactivo carga en uno y sólo un factor.

A partir de los resultados anteriores se pueden definir las operaciones para determinar el valor de la estrategia ambiental a partir de los reactivos del cuestionario (tabla 2).

La tabla 3 muestra las estadísticas descriptivas para cada indicador de la variable estrategia ambiental, para el indicador reducción de sustancias tóxicas, el promedio fue de 3.21, en la escala de 1 a 7, que se interpreta como medio bajo, la desviación fue de 2.22 y un coeficiente de variación de 69.15% indica una dispersión media de los puntajes. Asimismo, para el indicador preservación ambiental, el promedio fue de 3.61 que se interpreta como medio bajo, la desviación de 0.93 con un coeficiente de variación de 25.76%, lo que indica una dispersión baja de los puntajes. En relación con el indicador inversión y alianzas, el promedio fue de 2.96, ubicado en el nivel bajo, la desviación fue de 0.30 y un coeficiente de variación de 10.13%, lo que señala una dispersión baja de los

puntajes y, por último, el indicador restauración del daño al ambiente muestra un promedio de 1.53, ubicado en el nivel bajo con una desviación de 1.00 y con un coeficiente de variación de 65.35%, indica una dispersión media de los puntajes. Por último, la estrategia ambiental muestra un promedio de 2.83, la desviación fue de 0.72 y un coeficiente de variación de 25.44%, que es una dispersión baja de los puntajes. Con estos resultados se muestra que si bien es cierto que los artesanos empiezan a realizar acciones encaminadas a la protección del ambiente natural, estas acciones aún son incipientes, ya que los valores obtenidos se encuentran en el rango bajo-medio.

DISCUSIÓN

A pesar de que gran parte de la investigación en gestión ambiental se ha enfocado en el impacto de grandes empresas hacia el ambiente (McKeiver & Gadenne, 2005), autores como Hillary (2000) han sugerido que el impacto colectivo de las pequeñas empresas es sustancial y, de hecho, podría ser mayor que el impacto ambiental de las grandes empresas.

Hillary (1999) sugiere que muchas empresas son respetuosas con el medio ambiente sin comprometerse

Tabla 2
Operatividad para medir la variable estrategia ambiental

Si: RST= Reducción de sustancias tóxicas PA= Preservación ambiental IYA= Inversión y alianzas RDA= Restauración del daño al ambiente	Entonces: RST= (EA7 + EA8 + ... + EA12)/6 PA= (EA15 + EA16 + EA44 + EA45)/4 IYA= (EA63 + EA64 + EA71)/3 RDA= (EA20 + EA21)/2
--	--

$$(Estrategia ambiental) EA= (RST + PA + IYA + RDA)/4$$

Nota: Elaboración propia.

Tabla 3
Estadísticas descriptivas para la variable estrategia ambiental

	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo	Categoría
Reducción de sustancias tóxicas	3.21	2.22	69.15	1.00	7.00	Medio bajo
Preservación ambiental	3.61	0.93	25.76	1.00	5.75	Medio bajo
Inversión y alianzas	2.96	0.30	10.13	1.33	4.33	Bajo
Restauración del daño al ambiente	1.53	1.00	65.35	1.00	6.00	Bajo
Estrategia ambiental	2.83	0.72	25.44	1.50	4.50	Bajo

Nota: Elaboración propia.

en procesos formales de certificación. Por su parte, Dasgupta, Hettige y Wheeler (2000) argumentan que las pequeñas empresas tienden a cuidar el ambiente natural por la regulación informal que la comunidad ejerce sobre ellas.

En el caso de los negocios de artesanías, existen comunidades enteras dedicadas a esta actividad, cuyo impacto negativo hacia el ambiente debe ser considerado y analizado. El objetivo de este trabajo fue diseñar una escala que permitiera medir acciones encaminadas hacia el cuidado ambiental en pequeños negocios de artesanías, al ser un sector de subsistencia con pocas o nulas oportunidades de crecimiento, por lo que se tiene la idea de que en un sector así es difícil implementar prácticas de cuidado al medio ambiente.

Sin embargo, la investigación también ha demostrado que el interés y cuidado del aspecto ambiental no se limita únicamente a las grandes empresas, los pequeños negocios también son conscientes del deterioro ambiental actual y se muestran comprometidos en su cuidado y conservación (Sánchez-Medina & Díaz-Pichardo, 2017; Sánchez-Medina et al., 2015).

En el presente artículo se muestra evidencia de la conciencia de los artesanos hacia la protección del ambiente natural. A través de una escala con cuatro factores validados (reducción de sustancias tóxicas, preservación ambiental, inversión y alianzas y restauración del daño al ambiente) se demuestra que los artesanos empiezan a tomar conciencia de la problemática ambiental que atañe a su actividad. De acuerdo con la literatura (Pirela de Faría, 2010), dentro de los elementos considerados para evaluar una escala se tiene el cálculo del alfa de Cronbach, que sustenta la consistencia interna de los datos; en esta investigación se obtuvo un alfa de 0.88, la cual indica que el cuestionario tiene alta confiabilidad. Por otra parte, un elemento a considerar dentro del análisis factorial es el porcentaje de la varianza explicada, que en esta investigación resultó ser de 80.34% de la varianza total en los datos de la muestra, si se consideran los cuatro factores resultantes.

CONCLUSIONES

Como una aportación a los estudios empíricos existentes, en este artículo se diseñó una escala para medir la estrategia ambiental en pequeños negocios de artesanías, con la finalidad de aportar evidencias sobre un sector que ha recibido poca atención en estudios sobre administración ambiental. Con esta investigación se muestra que el desarrollo y preocupación por acciones encaminadas a la gestión ambiental no es exclusivo de las grandes empresas. Los negocios de artesanías, caracterizados, entre otras cosas, por su tamaño pequeño y poca experiencia en la aplicación de prácticas ambientales, pueden también generar ventajas competitivas en relación con aspectos ambientales, como el caso de la estrategia ambiental que, como se ha comprobado en este artículo, puede medirse a partir de la reducción de sustancias tóxicas, preservación ambiental, inversión y alianzas, y restauración del daño al ambiente.

El aportar una escala de medición de la estrategia ambiental en un sector poco estudiado puede contribuir a la sustentabilidad de este sector y por tanto facilitar su supervivencia, si se considera que hay comunidades en México en donde la artesanía se ha visto desvalorizada y con alto riesgo de que tradiciones ancestrales desaparezcan.

Finalmente, se señalan algunas limitaciones y futuras líneas de investigación. Debido a que en este trabajo se midieron las acciones ambientales a partir de la percepción de los artesanos; es decir, a partir de una medición subjetiva, se recomienda para investigaciones futuras hacer una medición objetiva de dichas acciones con la finalidad de tener una mayor credibilidad en la información. También resulta importante realizar investigaciones con respecto a temas ambientales en más ramas artesanales, no solo en alfarería, y en diversas regiones, ya que los problemas ambientales atañen a muchas ramas artesanales que se encuentran en condiciones de subsistencia debido al cada vez más difícil acceso a su materia prima.

Agradecimientos

La autora desea agradecer al Instituto Politécnico Nacional por el proyecto financiado SIP 20160594, del cual es derivado el artículo.

REFERENCIAS

- Aguilar, L. (13 de marzo de 2015). En peligro de extinción, artesanías de palma. *Noticias Voz e Imagen* [Portal oficial]. Recuperado de <http://old.nvnoticias.com/oaxaca/general/laboral/267917-peligro-extincion-artesantias-palma>
- Aragón-Correa, J. A., Hurtado-Torres, N., Sharma, S., & García-Morales, V. J. (2008). Environmental strategy and performance in small firms: A resource-based perspective. *Journal of Environmental Management*, 86(1), 88-103.
- Araya, U. (2003). Análisis comparativo de las necesidades ambientales de las PyME en Chile, Colombia y México. En CEPAL-ONU (Ed. de la serie), *Serie Medio ambiente: 74*. Santiago de Chile: CEPAL-ONU. Recuperado de <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/5775>
- Čater, T., Prašnikar, J., & Čater, B. (2009). Environmental strategies and their motives and results in Slovenian business practice. *Economic and Business Review*, 11(1), 55-74.
- Chantiri, P. J. N., Azamar, A. R. A., Galván, R. R., & Lozada, H. M. A. (2003). Niveles de plomo en mujeres y niños alfareros. *Revista Médica de la Universidad Veracruzana*, 3(1), 16-22.
- Chen, Y., Tang, G., Jin, J., Li, J., & Paille, P. (2015). Linking market orientation and environmental performance: The influence of environmental strategy, employee's environmental involvement, and environmental product quality. *Journal of Business Ethics*, 127(2), 479-500.
- Darnall, N., Henriques, I., & Sadorsky, P. (2010). Adopting proactive environmental strategy: The influence of stakeholders and firm size. *Journal of Management Studies*, 47(6), 1072-1094.
- Dasgupta, S., Hettige, H., & Wheeler, D. (2000). What improves environmental performance? Evidence from Mexican Industry. *Journal of Environmental Economics and Management*, 39(1), 39-66.
- Durham, D. E., & Littrell, M. A. (2000). Performance factors of Peace Corps handicraft enterprises as indicators of income generation and sustainability. *Clothing and Textiles Research Journal*, 18(4), 260-272.
- Fillis, I. (2002). Nurturing creative behaviour in the craft sector. *Irish Marketing Review*, 15(1), 38-48.
- Hart, S. L. (1995). A natural-resource-based view of the firm. *The Academy of Management Review*, 20(4), 986-1014.
- Hernández-Girón, J. P., & Domínguez-Hernández, M. L. (2003). Estrategias de mercadotecnia y los negocios de mezcal. *Convergencia*, 10(31), 187-203.
- Hernández-Girón, J. P., Domínguez-Hernández, M. L., & Caballero-Caballero, M. (2007). Factores de innovación en negocios de artesanía de México. *Gestión y Política Pública*, 16(2), 353-379.
- Hillary, R. (1999). *Evaluation of study reports on the barriers, opportunities and drivers for small and medium size enterprises in the adoption of environmental management systems*. Great Britain: Department of Trade and Industry, Environment Directorate.
- Hillary, R. (2000). *Small and medium-sized enterprises and the environment: Business imperatives*. Sheffield, UK: Greenleaf Publishing.
- Instituto Nacional de Salud. (2000). *Encuesta Nacional de Salud*. Recuperado de <https://www.insp.mx/>
- Journeault, M., De Rongé, Y., & Henri, J. F. (2016). Level of eco-control and competitive environmental strategy. *The British Accounting Review*, 48(1), 316-340.
- McKeiver, C., & Gadenne, D. (2005). Environmental management systems in small and medium businesses. *International Small Business Journal*, 23(5), 513-537.
- Pirela de Faría, L. C. (2010). Liderazgo y cultura organizacional en instituciones de Educación Básica. *Revista Venezolana de Gerencia*, 15(51), 486-503.
- Posada García, M. (20 de diciembre de 2004). La piratería ayuda a la gente a sentirse menos pobre. *La Jornada*. Recuperado de <http://www.jornada.unam.mx/2004/12/20/016n1eco.php>
- Sales Heredia, F. J. (Comp.). (2013). *Las artesanías en México. Situación actual y retos*. México: Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública.
- Sánchez-Medina, P. S. (2012). *La administración ambiental en México: Importancia, reflexiones, y prácticas desde el sector artesanal*. Alemania: Editorial Académica Española.
- _____, & Díaz-Pichardo, R. (2017). Environmental pressure and quality practices in artisanal family businesses: The mediator role of environmental values. *Journal of Cleaner Production*, 143, 145-158.
- Sánchez-Medina, P. S., Díaz-Pichardo, R., Bautista-Cruz, A., & Toledo-López, A. (2015). Environmental compliance and economic and environmental performance: Evidence from handicrafts small businesses in Mexico. *Journal of Business Ethics*, 126(3), 381-393.
- Sánchez-Medina, P. S., Toledo-López, A., Bautista-Cruz, A., & Regino-Maldonado, J. (2014). Valores ambientales y su efecto mediador entre características demográficas y resultados empresariales. *Revista Venezolana de Gerencia*, 19(67), 435-455.

- Sharma, S. (2001). Different strokes: Regulatory styles and environmental strategy in the North-American oil and gas industry. *Business Strategy and the Environment*, 10(6), 344-364.
- _____, & Vredenburg, H. (1998). Proactive corporate environmental strategy and the development of competitively valuable organizational capabilities. *Strategic Management Journal*, 19, 729-753.
- Velásquez, L. I. (2 de octubre de 2015). Arte Oaxaqueño, el más antiguo. *Noticias Voz e Imagen* [Portal oficial]. Recuperado de <http://old.nvnoticias.com/oaxaca/general/tradiciones/261962-arte-oaxaqueño-más-antiguo>
- Walls, J. L., Phan, P. H., & Berrone, P. (2011). Measuring environmental strategy: Construct, development, reliability, and validity. *Business & Society*, 50(1), 71-115.

Apéndice A

Tabla A1

Reactivos utilizados para medir la estrategia ambiental en negocios de artesanías

REACTIVOS	
¿Con qué frecuencia ha realizado las siguientes acciones	
EA1. Exploración de nuevos yacimientos	EA2. Recolección de leña en diferentes lugares al acostumbrado
EA3. Limpieza de sitios abandonados cercanos al negocio	EA4. Limpieza de los yacimientos de arcilla
EA5. Limpieza de los yacimientos de minerales	EA6. Reforestación de zonas dañadas
EA7. Utilización de esmaltes sin plomo	EA8. Utilización de esmalte sin estaño
EA9. Utilización de esmalte sin cadmio	EA10. Utilización de esmaltes con bajo contenido de plomo
EA11. Utilización de esmaltes con bajo contenido de estaño	EA12. Utilización de esmaltes con bajo contenido de cadmio
EA13. Eliminación segura o tratamiento de sustancias peligrosas	EA14. Compensación por algún accidente, daño a terceros
EA15. Separación de desechos orgánicos y no orgánicos	EA16. Reutilización del barro
EA17. Reutilización de minerales empleados en el proceso de producción	EA18. Reutilización de agua empleado en el proceso de producción
EA19. Entrenamiento y capacitación en temas ambientales	EA20. Devolución del juguete
EA21. Devolución de otros desechos naturales	EA22. Eliminación segura de desechos sólidos
EA23. Eliminación segura de la greta	EA24. Eliminación segura de la alarca
EA25. Eliminación segura del cadmio	EA26. Inversión en equipo para el control de la contaminación
EA27. Participación en programas de reciclaje	EA28. Participación con grupos ambientales
EA29. Mejor uso de los desechos dentro del negocio	EA30. Mejor uso de desechos con otros negocios de artesanías
EA31. Modificaciones al proceso de producción para reducir desperdicios	EA32. Cambios en las especificaciones materiales de los insumos
EA33. Modificaciones a las especificaciones de la artesanía	EA34. Implementación de tecnología para reducir desperdicios
EA35. Cumplimiento con el Consejo Regulador de Talavera	EA36. Cumplimiento con la norma 132 de talavera
EA37. Cumplimiento con la norma 011	EA38. Disminución en el total de materiales utilizados
EA39. Disminución en el uso de materiales durante la producción	EA40. Sustitución por materiales renovables
EA41. Uso de materiales reciclables o de desecho	EA42. Utilización de materiales químicos
EA43. Uso de energía solar	EA44. Mejor administración de la energía en el hogar
EA45. Mejor administración de la energía en el negocio	EA46. Mejores procedimientos de mantenimiento eléctrico
EA47. Mejores instalaciones eléctricas	EA48. Cambios en herramientas o equipo que funcionan con energía
EA49. Reemplazo de equipo que consume mucha energía	EA50. Procedimientos rigurosos en respuesta a emergencias
EA51. Inversión en equipo y sistemas de control	EA52. Cambios fundamentales en el diseño de procesos
EA53. Capacitación a empleados en respuesta a emergencias	EA54. Reducción en el almacenamiento de sustancias tóxicas
EA55. Cambios fundamentales en el diseño de productos	EA56. Reducción en el empaque
EA57. Cambios hechos en el empaque de la artesanía	EA58. Eliminación de empaque que daña la capa de ozono
EA59. Uso de empaque hecho de materiales reciclables o biodegradables	EA60. Certificación ecológica de la artesanía
EA61. Reducción en la producción de artesanías dañinas	EA62. Cambios en las especificaciones de la artesanía
EA63. Alianzas con otros negocios de artesanías para el manejo y procesamiento de desechos	EA64. Alianzas con otros negocios de artesanías para establecer normas ambientales que regulen la artesanía
EA65. Alianzas con grupos ambientales para establecer normas ambientales que regulen la artesanía	EA66. Evaluación detallada y periódica del impacto ambiental
EA67. Alianzas con otros países para la preservación ambiental	EA68. Divulgación periódica de las actividades del negocios
EA69. Informa oportunamente cuando sus empleados podrían ser afectados	EA70. Proveer protección y apoyo a empleados
EA71. Invierte en investigar sobre la preservación ambiental	EA72. Seguir prácticas ambientales de acuerdo con normas o regulaciones de otros países
EA73. Invierte en investigar sobre la preservación ambiental con universidades	EA74. Invierte en investigar sobre la preservación ambiental con asociaciones industriales

Arquitectura de indicadores estratégicos para elevar la calidad de los servicios médicos de los hospitales de alta especialidad

Architecture of strategic indicators to improve the quality of medical services of high specialty hospitals

Martha Katty Torres Salgado*✉, Carlos Arturo Vega Lebrún**

Torres Salgado, M. K., & Vega Lebrún, C. A. (2018). Arquitectura de indicadores estratégicos para elevar la calidad de los servicios médicos de los hospitales de alta especialidad. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 84-94.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo proponer la construcción de un modelo de indicadores prioritarios de gestión de procesos médicos a través del análisis de las actividades para mejorar la atención médica de calidad y seguridad al paciente en hospitales de alta especialidad (HAE). Estudio de enfoque cuantitativo en una investigación estructurada de manera secuencial y con razonamiento deductivo (Hernández de Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2015). La conclusión de esta investigación afirma que el modelo de indicadores prioritarios de gestión de procesos médicos a través del análisis de las actividades mejora la atención médica de calidad y seguridad al paciente en (HAE), resultado de las premisas investigadas.

El valor agregado es generalizar los datos de una muestra a una población representativa del servicio cirugía y perioperatorio en hospitales

Palabras clave: modelo de indicadores; arquitectura de procesos; servicio de medicina perioperatoria; hospitales de alta especialidad; medidor de desempeño (KPI).

Keywords: indicator model; process architecture; perioperative medicine service; high specialty hospitals; key performance indicator (KPI).

Recibido: 3 de abril de 2017, aceptado: 13 de noviembre de 2017

* Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM. Cto bicipuma 3000, C. P. 04360, C. U., Ciudad de México, México. Correo electrónico: katty_torres_salgado@hotmail.com

** Calidad de Posgrado, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. 21 Sur 1103, C. P. 72410, Barrio Santiago, Puebla, México. Correo electrónico: carlosarturo.vega@upaep.mx

✉ Autor para correspondencia

privados de alta especialidad de la Ciudad de México, muestra por conveniencia inducida, en tiempo y por accesibilidad a tres nosocomios. Es una investigación de alcance correlacional para evaluar el grado de asociación entre variables, para establecer y definir los medidores de desempeño (KPI, en inglés) variables que puedan relacionar su nivel de prioridad y comportamiento en la construcción propuesta en razón de mayor importancia de las actividades (críticas) en los distintos servicios de atención médica.

ABSTRACT

The objective of this work is to propose the construction of a model of priority indicators for the management of medical processes through the analysis of activities to improve quality medical care and patient safety in high specialty hospitals (HAE, in Spanish). The study adopts a quantitative approach in a structured research to sequential manner, with deductive reasoning (Hernández de Sampieri et al., 2015). The conclusion of this research affirms that the model of priority indicators of medical process management through the analysis of activities improves quality medical care and patient safety in (HAE), as a result of the premises investigated.

The added value is to generalize the data from a sample population, representative of the surgery and perioperative service in high specialty private hospitals of Mexico City, a sample chosen on the basis of convenience of time and accessibility to three hospitals. The study can be used to make a correlation that will evaluate the degree of association between variables, to establish and define the (KPI) variables that can relate their level of priority and behavior

in the proposed construction due to the greater importance of the (critical) activities in the different services of medical attention.

INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud establece que el sistema sanitario está constituido por todas las organizaciones, instituciones, personas y acciones cuya primera finalidad es promover, mantener o restaurar la salud cuyo resultado se ve reflejado en la productividad y calidad de vida de un país (Meena & Thakkar, 2014). En las últimas décadas se promueve atención de alta calidad y seguridad al paciente centrada en el usuario o cliente cuando se realizan diferentes actividades encaminadas a garantizar los servicios de salud (Berenguer Gouarnaluses, Mediacaja Álvarez, & Montoya Medina, 2014).

Un número considerable de organizaciones manifiestan dificultades con la estrategia de ejecución, la falta de estructura y la transparencia en la gestión estratégica para lograr una descripción estructurada de la organización (Simon, Fischbach, & Schoder, 2014). Los mayores éxitos de los estudios de casos en la gestión de rendimiento hablan de medidas que giran en torno a un aumento de la capacidad para gestionar la estrategia, comprender la organización o evaluar el desempeño (Grey, Perkins, & Remmers, 2014). La innovación en la gestión hospitalaria es una necesidad actual para garantizar que los procesos de mejora continua tengan un impacto en la seguridad, calidad y atención al paciente. Los programas de excelencia operacional e implementación en hospitales han mostrado ser útiles para gestionar un cambio de cultura orientado a la estandarización, la disminución de desperdicio y el reconocimiento de las aportaciones de los empleados de la institución (Velázquez Hernández & Yacamán Handal, 2014).

Afirma Artaza Barrios (2011) que en la práctica los modelos de atención no están centrados en los usuarios, se enfocan en la recuperación de la enfermedad y mayor consumo de tecnología. Se observa el interés de que se realicen trabajos de investigación, menciona Rojas González (2014) que se ha realizado una revisión de publicaciones del tema, cuyos resultados justifican la necesidad de implantar modelos de gestión por procesos que normalicen las actuaciones y disminuyan la variabilidad con el fin de brindar a los pacientes la mayor calidad y seguridad.

Artaza Barrios (2011) menciona la necesidad de conducir procesos de cambio, cuyo enfoque radique en generar condiciones institucionales para integrar los procesos asistenciales como una cadena de pasos interdependientes y cooperativos capaces de sostener eficientemente procesos asistenciales de calidad y seguridad al paciente, alineados con las políticas de carácter nacional. Vinot (2014) comenta que la gestión clínica en los hospitales implica una reestructuración de profesionalidad tradicional, mediante la coordinación, la cooperación del trabajo conjunto. En México, el Centro Médico ABC a través de Díaz (2014) señala que los hospitales funcionan de manera fraccionada, cada departamento constituye un silo autónomo que opera de manera desintegrada con seguimiento exhaustivo de indicadores financieros, operativos o clínicos.

A pesar de esfuerzos dirigidos presentados por los autores se han hecho propuestas de forma aislada para algunos servicios médicos y no de forma integral; Meena & Thakkar (2014) aplicaron cuadro de indicadores balanceados (BSC) con el enfoque integrado de las técnicas de modelado estructural para identificar los indicadores de desempeño y sus relaciones en un sistema de salud de la India. Berenguer Gouarnaluses et al. (2014) realizaron estudio descriptivo y transversal durante 2013 para evaluar el grado de satisfacción de cinco proveedores de salud bucal pertenecientes al Policlínico Universitario "Josué País García" de Santiago de Cuba, mediante criterios, indicadores y estándares. Díaz (2014) implementó la Línea de Servicio de Neurología y el impacto en indicadores de gestión en el Centro Médico ABC, para demostrar que un hospital con una estructura de líneas de servicio y médicos organizados tipo «práctica médica grupal» registra un mejor desempeño operativo y clínico que los estructurados por departamentos y práctica médica individual.

Groene, Kringos y Sunol (2014) contribuyen con una metodología propia, para guiar en los hospitales y apoyar el análisis de los procesos de medición cuantitativa. Las siete maneras de mejorar la calidad de seguridad son:

1. Alinear los procesos de organización con la presión o entidades externas.
2. Poner la calidad en la agenda (planes y programas de trabajo).

3. Implementar sistemas de toda la organización de apoyo para mejorar la calidad.
4. Asegurar responsabilidades y experiencia por equipos a nivel departamental.
5. Organizar las vías de atención basada en la evidencia de intervenciones de calidad y seguridad.
6. Implementar sistemas de información.
7. Realizar una evaluación regular y proporcionar información.

Es importante citar el análisis en recientes cambios en la administración de los hospitales públicos de Francia, y en el mundo, según la reforma promulgada en 2009, dirigida a reforzar el rol administrativo de los doctores. A menudo se argumenta que el liderazgo clínico de alta calidad es un factor clave para el éxito de la organización (Vinot, 2014). Para concluir en este apartado, se puede observar que se han hecho propuestas interesantes y si hay soluciones de forma aislada a través de intentos de medición pero no de forma integral. La aplicación el BSC es lo más utilizado y, por otro lado, liderazgo y herramientas de calidad para mejora de resultados en estos estudios. Meena y Thakkar, que también hacen aplicación de BSC con la innovación de 14 indicadores y mapa de estrategia en el análisis de los procesos hospitalarios, no se analizan en su detalle, solamente como parte de las perspectivas que incluye esta aplicación.

A pesar de esfuerzos bien dirigidos presentados por los autores, se han hecho propuestas interesantes de forma aislada para algunos servicios médicos y no de forma integral en el proceso; por lo cual existe el problema de una carencia de análisis en los procesos de las actividades a detalle, garantizando los resultados y, por ende, la priorización de los indicadores en la arquitectura integral de los procesos (AP) de los servicios médicos y de apoyo, haciendo extensivo no sólo a servicios médicos sino mediante la integración y alineación de la estructura orgánica para establecer sus indicadores de forma paulatina, de importancia por niveles de mando y de operación en los hospitales de alta especialidad (HAE).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo tiene como objetivo proponer un modelo de indicadores prioritarios de gestión de procesos médicos a través del análisis de las actividades para mejorar la atención médica de calidad y seguridad al paciente en HAE. Es una investigación de alcance

correlacional, para evaluar el grado de asociación entre variables, establecer y definir las variables (KPI) que puedan relacionar su nivel de prioridad y comportamiento en la construcción propuesta en razón de mayor importancia de las actividades críticas en los distintos servicios de atención médica.

En cada hospital visitado se hizo una sensibilización e involucramiento, para lograr cierto compromiso y responsabilidad social de participación de los cuerpos directivos de hospitales y expertos académicos en especialidades médicas de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).

Los objetivos específicos fueron:

- Identificar las actividades prioritarias o concretas en el mapeo de procesos, mediante el prediagnóstico de entidades externas al proceso y alineamiento estratégico para cumplir sus objetivos en el marco de la gestión del sector salud.
- Determinar los mecanismos de articulación de actividades externas que inciden en la satisfacción de los clientes y/o usuarios internos y externos en beneficio del paciente y población demandante del servicio médico de calidad y seguridad al paciente.
- Identificar KPI para el diseño de modelo de indicadores categorizados de calidad y seguridad al paciente.
- Ponderar y priorizar indicadores estratégicos de la alta dirección y de desempeño de acuerdo con los procesos y actividades críticas para evaluación de resultados esperados.
- Desarrollar mejores prácticas de los procesos médicos con calidad y seguridad al paciente, a través del establecimiento de indicadores de desempeño en el servicio de calidad.
- Validar mejores prácticas de los procesos médicos con calidad y seguridad al paciente.

La hipótesis (H1) se refiere a:

Los indicadores en actividades prioritarias o concretas de los procesos médicos y clínicos tienen correlación con la calidad y seguridad ofrecida al paciente en los servicios en la atención hospitalaria de alta especialidad.

Diseño del instrumento de medición

En la AP se utilizaron y se hicieron diagramas interdisciplinarios para establecer la secuencia de

Tabla 1
Definición conceptual y operacional de variables

Objetivo	Variables cuantitativas	Definición conceptual y teórica	Operatividad de variables	Instrumento	Fuente de información
<p>Diseñar modelo de calidad y seguridad al paciente de indicadores de gestión de procesos médicos y de apoyo médico a través del análisis de las actividades prioritarias en la atención médica y de apoyo para el establecimiento de indicadores de desempeño en el servicio de calidad y seguridad al paciente en hospitales de alta especialidad.</p>	<p>Variables Independientes: Indicadores en actividades prioritarias en modelo por servicio en convergencia o interdependencia con KPI, que afectan en su conjunto a las Variables Dependientes o resultados en la Calidad y seguridad al paciente en los servicios y atención hospitalaria de alta especialidad.</p>	<p>Desarrollar un marco de medición propio (Groene et al., 2014) en el rendimiento para el sistema de atención de la salud (Meena & Thakkar, 2014).</p>	<p>Nivel de asociación o correlación e influencia de indicadores en la calidad de los servicios y atención hospitalaria de alta especialidad.</p>	<p>Análisis de arquitectura en mapeos, encuestas y entrevistas a los actores y reportes en los servicios hospitalarios de evaluación en sitio.</p>	<p>Servicios médicos y de apoyo en HAE. Servicio de medicina perioperatoria, cirugía o atención quirúrgica (Qx), enfermería quirúrgica (QX) y urgencias.</p>

Nota: Elaboración propia.

actividades, con el objetivo de que oriente a la comprensión del proceso e identificación de las actividades. Para ello se describe el movimiento o flujo (que se efectúa en un tiempo continuo) a través de esquemas hechos en una hoja de papel o página electrónica de pantalla (Information, 2013). Se optó por la opción de *Visita en Sitio*, que consistió en ir a las áreas de trabajo y entrevistar a los diversos actores desde el inicio hasta concluir proceso.

Se tienen variables independientes (supuesto o causa a manipular) Entradas. Son los indicadores establecidos en su conjunto, 18 indicadores médicos (Gironés Muriel et al., 2013) para el proceso de cirugía y perioperatorio, que afectan los resultados de calidad en el servicio médico que fueron utilizados para apoyar el análisis con procesos de medición cuantitativa. Y variables dependientes (observado) Salida o resultado (influye y/o mejora). La calidad y seguridad al paciente y seguridad en el servicio y atención hospitalaria de alta especialidad (tabla 1).

Diseño Modelo de indicadores y arquitectura de procesos (AP) en hospitales de alta especialidad (HAE)

Los modelos son, al fin y al cabo, hipótesis de trabajo, un intento de interpretar y describir de forma esquemática la realidad (Heredia Álvaro, 2001). El modelo explicado a continuación se desarrolla con la AP bajo el concepto de una secuencia de actividades para ofrecer la atención médica en

diferentes productos o servicios médicos con valor único al paciente o usuario, a través de la AP y con el uso de mapas e indicadores categóricos que permite integrar paulatinamente a las diversas áreas médicas o de apoyo de la estructura organizacional.

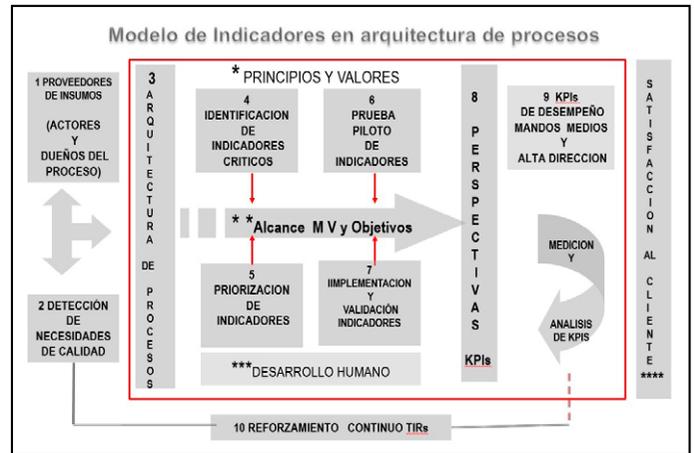


Figura 1. Modelo de indicadores y arquitectura de procesos en hospitales de alta especialidad. Elaboración propia.

1. Proveedores de insumos (actores y dueños del proceso). Se sigue dependiendo en gran medida de las universidades y escuelas o institutos de nivel medio y superior, lo que se produce en los procesos de enseñanza, que ingresa principalmente en los hospitales, clínicas, sanatorios y consultorios; médicos generales, especialistas y personal de apoyo médico.

2. Detección de necesidades de calidad. Se realizó diagnóstico estratégico, el cual amplía el contenido y profundiza en temas aplicables a todo sector de salud mexicano, con análisis estructural (Porter, 2009) y de la cadena de valor (Porter, 2010) que permitió analizar los esfuerzos de los actores para garantizar servicios de atención médica, en la cual convergen servicios y recursos públicos y privados en el área de salud. En las actividades primarias (Porter, 2010) se encuentran la operación y el funcionamiento de los HAE y de su administración por procesos que se permean a través del consejo de salubridad general, que a su vez migra de una administración tradicional y reconoce a los establecimientos de atención médica que participan de manera voluntaria y cumplen los estándares necesarios para brindar servicios con buenas prácticas, calidad en la atención médica y seguridad ofrecida a los pacientes.

3. Arquitectura de procesos (AP). Para la integración de la AP, subprocesos y etapas, se define que los procesos son una secuencia de etapas lógicas, ordenadas, repetibles y medibles, en donde participan dos o más actores para la producción de un bien o servicio. La estrategia es cómo alcanzar los objetivos definidos, claros, medibles y alcanzables, partiendo de la misión y visión; es el medio, es a través de qué acciones se va a lograr, con actividades diferentes para ofrecer un bien o servicio con valor único (Porter, 2011) al cliente o usuario.

La disgregación del proceso a otros niveles de acotamiento se refiere a distinguir la afinidad de actividades y su agrupación en niveles; elaborar los

mapas de procesos interdisciplinarios y transversales con base en entrevistas a los actores del proceso sobre las actividades que realizan.

- Rediseño de actividades. Se rediseña el proceso a través del análisis de cada una de las actividades, se identifican actividades de prioridad y análisis de categorización y de valor al cliente y a la organización (Hammer & Champy, 1994).
- Modelado de AP. La arquitectura es diseño estructural. AP es el diseño de la estructura de un modelo de procesos que visualiza su configuración de cadena de valor. Este modelo permite vincular estrechamente la disgregación de los subprocesos o etapas del proceso operativo, lo que representa el nivel de estandarización e integración de los procesos de negocio y puede ser considerado como una visualización detallada y general de cómo una organización permitirá y ejecutará estrategias (Simon et al., 2014).

4. Identificación de Indicadores. La construcción de la arquitectura de indicadores (también conocidos por KPI, por sus siglas en inglés) en procesos prioritarios de actividades concretas se basa en los procesos, subprocesos y etapas en la obtención de los mapas de procesos.

La elección de actividades de prioridad concretas. Se elige la actividad de mayor importancia dentro del mismo, no necesariamente en los insumos o resultados del proceso para actividades de prioridad o concretas, lo que permite de manera preventiva garantizar el resultado esperado del bien o servicio.

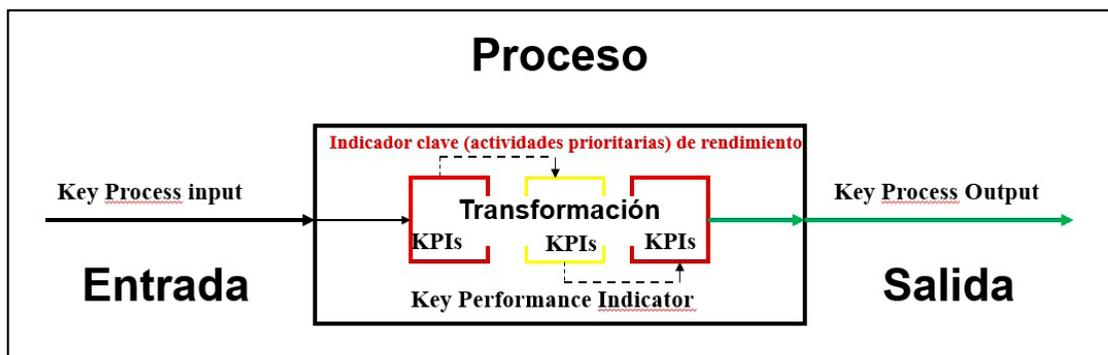


Figura 2. KPI o Indicadores de desempeño para actividades de prioridad o concretas del proceso. (key process input (indicadores de entrada del proceso) y key process output (indicadores de salida o resultados del proceso)).

Elaboración propia.

Las actividades de prioridad se identifican claramente en la cadena de valor como actividades únicas y distintivas (Porter, 2011), que entregan de forma satisfactoria el bien o servicio del proceso, o de lo contrario estas actividades se convierten en un cuello de botella que impactaría en la entrega de un bien o servicio insatisfactorio y de conflictos entre las personas. .

Definición de indicadores KPI. El identificar indicadores prioritarios y definir KPI que arrojen mediciones útiles, precisas, correctas e importantes es garantía de llevar una buena estrategia y tomar decisiones correctas y relevantes. Los KPI son indicadores clave en el desempeño y desarrollo de un proceso que permite medir que las actividades se realicen a través de acciones estratégicas. El KPI ofrece la visualización de las actividades para anticiparse a los resultados y poder tomar las decisiones desde cualquier área funcional en que se ubique la actividad.

5.Priorización de indicadores. Para realizar la categorización de indicadores se utiliza la matriz de priorización (Meena & Thakkar, 2014). A continuación se detalla: 1. Seleccionar un proceso, diseñar su AP y especificar su objetivo para analizar sus indicadores de alcance a la entrega del bien o servicio o problema a solucionar. 2. Hacer una lista de los indicadores que estén afectando la calidad a la producción o el servicio (mínimo 15). 3. Definir en forma breve en qué consiste cada uno. 4. Ubicar los indicadores detectados. El número tanto horizontal como vertical corresponderá al mismo problema que permite a través del indicador visualizar para alcanzar el objetivo del proceso. 5. Determinar el nivel de prioridad de una variable sobre otra marcando: "0" si la influencia es Nula "1" si la influencia es Potencial. 6. Hacer la sumatoria tanto por filas como por columnas. 7. El puntaje obtenido de las filas da el Índice de movilidad que indica la prioridad que tiene una variable sobre las demás. Sacar el peso porcentual tomando la sumatoria como 100%. 8. El puntaje obtenido al sumar las columnas da el Índice de dependencia de una variable con respecto a las otras. 9. Realizar cuadro de porcentajes de movilidad y dependencia para establecer una división y delimitar la zona de prioridad, se divide 100 entre el número de variables y el valor obtenido servirá para trazar una línea vertical y otra horizontal que divida la gráfica para distinguir: zona de prioridad= superior izquierda; zona de análisis de variables o conflicto= superior derecha. Zona de salida del proceso=

inferior derecha (key process outputs) y zona de indicadores aislados= inferior izquierda que pueden ser analizados en otro contexto y se hace el análisis.

6.Prueba piloto de indicadores. El propósito del indicador es medir la influencia de variables que afectan los productos o servicios y en su conjunto los resultados de calidad en el servicio o producto que se proporciona. En esta prueba de indicadores se seleccionarán aspectos de importancia y accesibilidad en las áreas o servicios médicos de cirugía, enfermería quirúrgica y en el servicio de medicina perioperatoria (SMPO) y por otro lado directores del área médica, clínica y dirección general de los HAE que tuvieron el interés de documentar controles experimentales e implantación del modelo propuesto y en su caso para hacerlo perfectible y ajustarlo.

7.Implementación de indicadores y validación. Un documento que permite estandarizar los principales elementos que integran el indicador es el diseño de ficha de indicadores tipo, que permite dar seguimiento a través del monitoreo por el actor o dueño responsable de reportar los avances. Además de evidenciar y validar si el control establecido es el idóneo y funciona para recopilar la información estadística para consolidar su ajuste e implementación e incorporarlo como parte del tablero para el grupo operativo o bien para la alta dirección.

8.Perspectivas de indicadores. La categorización se fundamenta en Simon et al. (2014), lo cual permitirá agruparlos de acuerdo con este criterio para visualizar el avance de los objetivos de cada grupo de indicadores de manera puntual.

Rentabilidad (productividad). Se refiere a recuperar la inversión y obtener beneficios financieros en costo/beneficio. Para los hospitales es común utilizar el término categórico de productividad que se refiere a resultados en los servicios de atención médica.

Actividades. Eslabón prioritario o crítico dentro de la cadena de valor para la obtención de un bien o servicio (Simon et al., 2014).

Seguridad al paciente. Clasificación utilizada para indicadores que monitorean el uso de buenas prácticas preventivas para disminución de fallas, que son causas de eventos adversos, en el otorgamiento de atención al paciente (Meena & Thakkar, 2014).

Oferta. Son las propuestas de valor que se ofrecen al cliente o usuario, en sus productos/servicios.

Calidad. Abarca la satisfacción al cliente o usuario en los bienes o servicios que recibe.

Instancias regulatorias de salud. Indicadores que designan como obligatorias entidades externas sanitarias y de seguimiento de observancia obligatoria en beneficio de la calidad y seguridad ofrecidas al paciente.

9.KPI de desempeño a mandos medios y alta dirección. Los tableros estratégicos KPI son una herramienta diseñada en una estructura matricial. Se diseñaron con los mismos elementos por niveles (SAP, 2004), tanto para alta dirección nivel 1 logro de procesos clave o de prioridad y para mandos medios nivel 2, lo único que cambia es la priorización de los indicadores en su visualización. En la parte lateral de la matriz se establecen las diversas jerarquizaciones de categorización nombradas "Perspectivas" y seleccionadas por los actores de los procesos. En la parte superior derecha se incluyen los datos relevantes del KPI que se pretende visualizar después de ser medidos. La descripción de su diseño estructural:

Perspectiva. Permite categorizar los indicadores: Rentabilidad (productividad), Actividades, Seguridad al paciente, Oferta, Calidad e Instancias regulatorias de salud.

Áreas médicas. Especifica el área de la estructura orgánica del puesto.

Objetivo. Identifica y expresa cualitativamente las finalidades hacia las cuales deben dirigir los recursos,

esfuerzos y actividades de la organización para dar cumplimiento a su misión y visión.

Estrategia. Iniciativa que establece cómo alcanzarán el objetivo y la meta que se ambiciona para obtener los resultados esperados.

Indicador KPI. Medio, vínculo o variable aleatoria para medir valores en una escala de medición derivados de serie de hechos observados en las actividades de prioridad de los procesos.

Resultados del indicador. Estos cobran sentido de acuerdo con los objetivos establecidos (resultados esperados) a partir de los cuales se organiza una serie de actividades para alcanzarlos. Incluye: 1. Meta. Es un elemento (s) cuantitativo del objetivo en tiempo. 2. Status. Es la parametrización de acuerdo con el avance de los resultados y se le asigna un color verde, rojo o amarillo dependiendo del límite máximo o mínimo permisible.

10.Reforzamiento Continuo TIR. Son las buenas prácticas entre sus colaboradores y una retroalimentación activa que mantiene motivado al personal para generar en el mismo un alto nivel de compromiso.

RESULTADOS

Se presenta a continuación el proceso de atención quirúrgica y del servicio de medicina perioperatoria (SMPO), se trabajan de manera simultánea y complementaria; este segundo proceso en periferia a cirugía para garantizar la calidad de atención al paciente desde el preoperatorio hasta su alta de hospitalización en hospitales privados y públicos con grandes retos de innovación médica. El resultado del análisis de priorización es de 18 indicadores¹ para mandos medios.

Este indicador de complicaciones quirúrgicas y de cobertura en el (SMPO) es dos KPI afectan la calidad y seguridad al paciente. En la primera categoría abarca la satisfacción al cliente o usuario en los bienes o servicios que recibe, y en la segunda se monitorean el uso de buenas prácticas preventivas para disminución de complicaciones quirúrgicas, que son causas de eventos adversos; en el otorgamiento de atención al paciente.

El indicador de Complicaciones Quirúrgicas se implementa para medir y monitorear en esta investigación, para registrar las complicaciones en función de su cobertura de atención y servicio. Previamente identificada la actividad en el mapa

¹ Indicadores de Mandos Medios Qx y SMPO: 18-DCOM Porcentaje en la disminución de complicaciones quirúrgicas; 16+2 Cirugía de más de 2h de duración; 13MOR Mortalidad dentro de Quirófano; 11CAN Porcentaje de pacientes que presentaron complicaciones de la anestesia en relación con el total de intervenciones quirúrgicas; 12REI Porcentaje de intervenciones quirúrgicas dentro de las 72h inmediata a la primera intervención en relación con el total de reintervenciones quirúrgicas; 3CC Cirugías canceladas; 17CUASI Número de errores, cuasifallas y omisiones para garantizar cirugía correcta; 9EP Porcentaje de pacientes que presentaron embolia pulmonar en relación con el total de intervenciones quirúrgicas; 10SEPS Porcentaje de pacientes que presentaron sepsis postoperatoria en relación con el total de intervenciones quirúrgicas; 2E Eficacia de cirugías en tiempo programado; 8P10 Productividad quirúrgica (10 Qx más frecuentes), distribución por edad y grupo etareo; 7DQ Porcentaje en diferimiento quirúrgico; 5CA Cirugías realizadas por aseguradora; 4CE Cirugías por especialidades Qx; 3CC Cirugías canceladas; 15LAP Porcentaje quirúrgico laparoscópicas que terminan abiertas; 14AB Porcentaje de apendicitis blancas; 6CS Número de intervenciones quirúrgicas por sala.

PROCESO PERIOPERATORIO SMPO

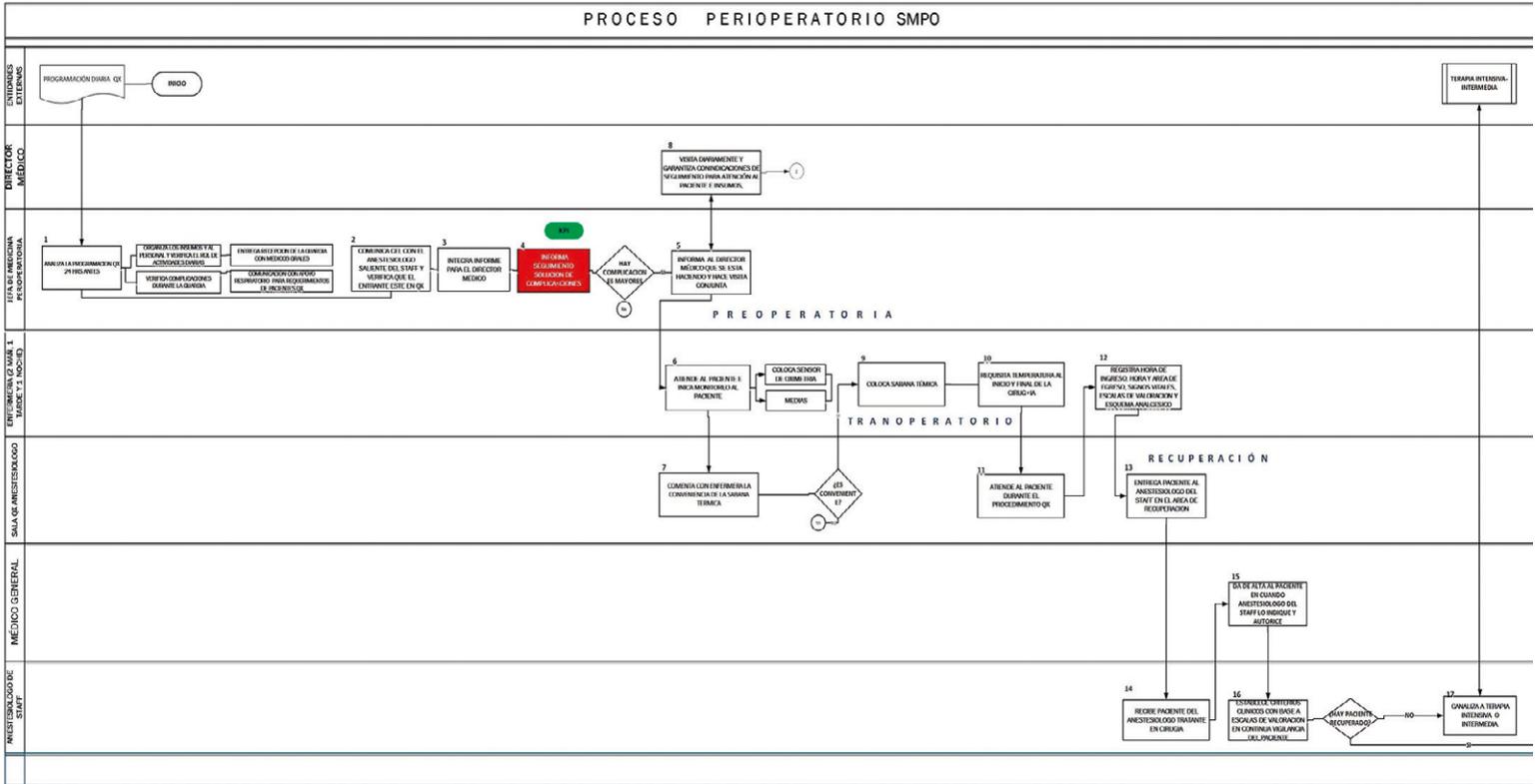


Figura 3. Arquitectura del Proceso (SMPO). Elaboración propia.

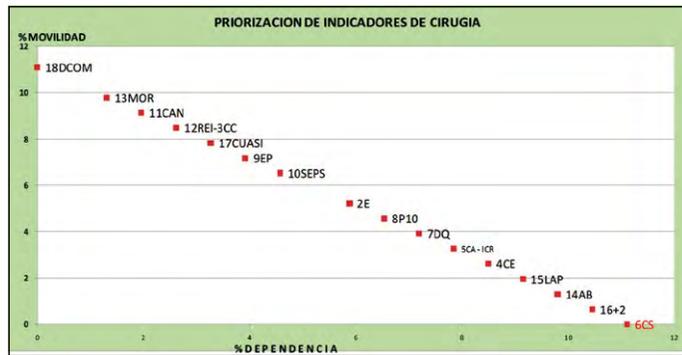


Figura 4. Priorización de Indicadores de Qx- SMPO. Elaboración propia.

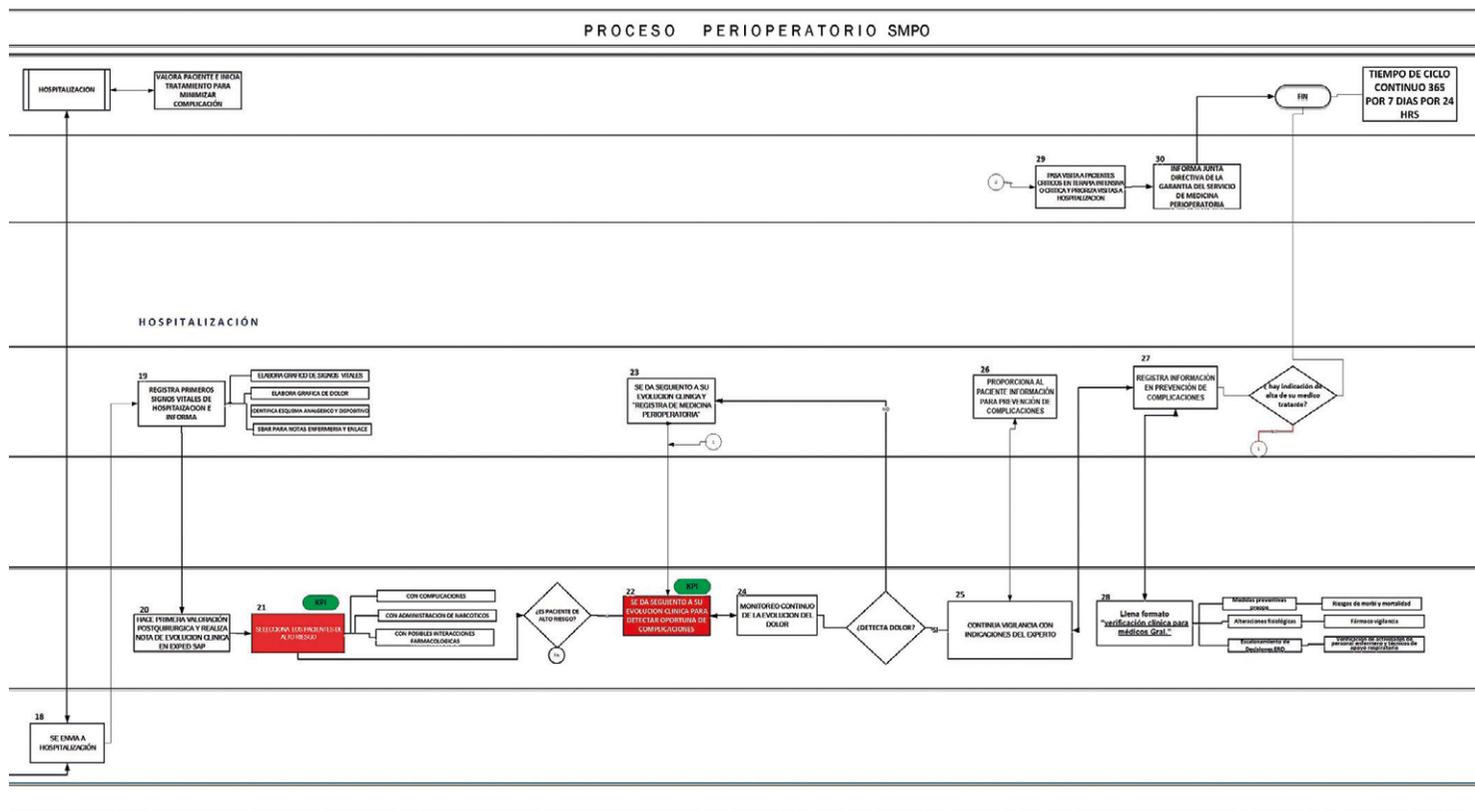
del proceso perioperatorio y de atención quirúrgica; el algoritmo es: % Complicaciones= Número de alteraciones fisiológicas detectadas y resueltas/ Número de pacientes vigilados por el servicio X 100. El % en complicaciones se obtuvo del análisis mensual del proceso SMPO como se puede ver en la tabla 2 de complicaciones quirúrgicas. El análisis permite contar con información que ayuda a los médicos a encontrar la causa raíz de porque se complica la intervención quirúrgica; por ejemplo si hay muchos pacientes con náuseas posiblemente se tendrá que revisar el medicamento que está causando un

Tabla 2 Complicaciones quirúrgicas (Qxs)

Complicaciones QXs	Dic 15	Ene 16	Feb 16	Mar 16	Total
Náuseas	9	2	5	8	24
Vómito	5	1	1	1	8
Prurito	0	0	2	3	5
Cefalea	0	0	3	3	6
Bloqueo sensitivo/ motor-residual	0	1	0	0	1
Micción	0	1	0	0	1
Fiebre	0	2	0	0	2
Dolor mayor 5	7	2	2	5	16
Saturación de oxígeno menor a 90%	0	2	1	1	4
Taquicardia	0	0	0	1	1
Bradicardia	1	0	1	1	3
Hipertensión	0	0	0	1	1
Hipotensión	1	0	1	1	3
Sangrado	1	0	0	0	1
Totales	24	11	16	25	

Nota: Elaboración propia.

PROCESO PERIOPERATORIO SMPO



Continuación de la Figura 3. Arquitectura del Proceso (SMPO).
Elaboración propia.

efecto colateral con los pacientes e incrementa los vómitos. Se tendrá que cambiar de inmediato el medicamento. Enseguida se visualizan la cobertura que abarca el proceso de SMPO, se determina su alcance y con ello se valora si están disminuyendo las complicaciones quirúrgicas.

El indicador de la cobertura atendida del (SMPO) se integra como indicador para calcular las complicaciones en función de su cobertura de atención y servicio. Previamente identificada la actividad en el mapa del proceso (SMPO) y de atención quirúrgica, el algoritmo es: % Cobertura atendida en el SMPO vigilados en el (SMPO)/Cirugías Totales X 100. Dicho indicador muestra cual es la totalidad de pacientes quirúrgicos en el cual se da continuidad en este servicio y refleja la garantía de dar seguimiento a pacientes desde que ingresan a cirugía hasta que son dados de alta. La perspectiva de estos dos indicadores de complicaciones quirúrgicas y de cobertura en el SMPO afecta la calidad y seguridad ofrecida al paciente. El resultado del uso y categorización en el control se muestra en la tabla 3.

DISCUSIÓN

En la AP se observó como la metodología propuesta permite vincular estrechamente la disgregación de los subprocesos o etapas del proceso operativo, lo que representa el nivel de estandarización e integración de los procesos de negocio y puede ser considerado como una visualización a detalle general de cómo una organización ejecuta estrategias. El objetivo del KPI no es exclusivamente analizar los avances hacia el logro de resultados esperados, sino hacer uso de buenas prácticas que sirvan para el reforzamiento continuo de los diversos actores del proceso y apoyar al equipo de alto desempeño encargado a desarrollar diversas competencias que se verán reflejadas en los resultados que espera la alta dirección.

El modelo incluye desarrollo humano que vincula las prácticas de los recursos, las capacidades de la fuerza de trabajo, los resultados comerciales y desempeño financiero se tendrán que vincular las capacidades del capital humano con resultados empresariales (SAP, 2004) a través de:

Tabla 3
Porcentaje Cobertura atendida en el SMPO

PERIODO	COMPLICACIONES	% COMPLICACIONES QXs	PACIENTES PERIOPERATORIOS VIGILADOS	CIRUGÍAS	% CUBIERTO SPO
Dic-15	24.00	12.06	199	229	87
Ene-16	11.00	5.95	185	224	83
Feb-16	16.00	7.66	209	237	88
Mar-16	25.00	11.47	218	231	94
TOTALES	76.00		811	921	

Nota: Elaboración propia.

Tabla 4
Tablero Estratégico KPI del (SMPO)

PERSPECTIVA	ÁREAS MÉDICAS	OBJETIVO	ESTRATEGIA	KPIs	RESULTADOS DEL INDICADOR	META	STATUS	GRÁFICO
SEGURIDAD AL PACIENTE	PERIOPERATORIO	Vigilar y detectar con una visión integral los factores de riesgo para disminuir complicaciones en el proceso continuo anestésico quirúrgico desde el ingreso al egreso del paciente.	Dar a conocer en los medios de promoción y difusión del hospital al cliente el beneficio que ofrece este servicio de medicina perioperatoria que garantiza la seguridad del paciente en el continuo proceso anestésico quirúrgico y de su estancia en hospitalización hasta su restablecimiento o egreso del paciente.	% Cobertura atendida en el SMPO vigilados en Medicina Perioperatori/Cirugías TotalesX100	94% de cobertura	100%	1% a 100% 94%	
SEGURIDAD AL PACIENTE	PERIOPERATORIO		Disminuir las complicaciones quirúrgicas a través de la vigilancia y monitoreo de la medicina perioperatoria.	No. de complicaciones quirúrgicas	25 complicaciones	11%	100% a 0% 11%	

Nota: Elaboración propia.

1. La evaluación diagnóstica que destaca áreas para mejora del rendimiento o creación de valor
2. Medición recurrente de una actividad alineada con los procesos centrales de planificación de una organización.
3. Como parte de una transformación organizativa a gran escala, donde el objetivo es remodelar los recursos humanos tradicionales, el aprendizaje, la formación y las funciones de desarrollo para adaptarlas a una nueva estrategia de negocio.

CONCLUSIONES

Esta investigación afirma que el modelo de indicadores prioritarios de gestión de procesos médicos a través del análisis de las actividades mejora la atención médica de calidad y seguridad ofrecidas al paciente en HAE, como se observó, aunado a la reducción de costos por este concepto. Se acepta el supuesto de hipótesis a través de un

análisis de correlación múltiple de los indicadores en actividades prioritarias de los procesos médicos, clínicos e investigadores especialistas médicos-académicos de la UAM (Xochimilco) que obtienen correlación de r cuadrado de .950. Por otro lado, es de .309 para mandos medios con relación a la alta dirección; lo cual se interpreta como que los mandos medios tienen la misma prioridad de indicadores que la alta dirección en .30 y el restante obedece a otras prioridades de medición de indicadores de acuerdo a la operatividad cotidiana. El factor de Durbin Watson de 2.215 indica que sí se cumple el supuesto de independencia de errores bajo el criterio de aceptación o rechazo si el valor entra ente 1 y 3; por tanto, se acepta el supuesto de la hipótesis planteada en esta investigación.

Ahora bien, es vital categorizar los indicadores de la alta dirección, lo que es de importancia para ellos como eficiencia y rendimiento. A mandos medios los aspectos médicos de las actividades operativas, que realizan cotidianamente que

garanticen (prevención) con calidad y seguridad al paciente en los servicios en la atención hospitalaria de alta especialidad. Demuestra que los indicadores deben de categorizarse de acuerdo con el interés de

importancia para alta dirección o mandos medios que conducen a la oportuna toma de decisiones basadas en la prevención para garantizar resultados esperados en la calidad de la atención médica.

REFERENCIAS

- Artaza Barrios, O., Holder Morrison, R., Méndez, C., & Suárez Jiménez, J. (2011). *Redes integradas de servicios de salud: El desafío de los hospitales* (299 pp.). Santiago, Chile: OPS-OMS.
- Berenguer Gouarnaluses, M. C., Mediaceja Álvarez, N. R., & Montoya Medina, M. (2014). *Evaluación de la satisfacción en salud: Un reto en la atención estomatológica*. *MEDISAN*, 18(7), 946-950.
- Díaz, A. A. (2014). Gestión por líneas de servicio en el Centro Médico ABC. *Anales Médicos-Medigraphic*, 59(3), 171-178.
- Gironés Muriel, A., Matute, E., González Perrino, C., Serradilla Mateos, L., Molinero, T., & Mariné, M. (2013). Resultados globales en un hospital privado sobre su modelo. *CMA Cirugía Mayor Ambulatoria*, 18(2), 61-67.
- Groene, O., Kringos, D., & Sunol, R. (2014). *Seven ways to improve quality and safety in hospitals. An evidence based-guide*. Editado por DUQuE. Recuperado de www.duque.eu
- Hammer, M., & Champy, J. (1994). *Reingeniería. Olvide lo que sabe sobre cómo debe funcionar una empresa. ¡Casi todo está errado!* (trad. de la 1ª en inglés J. Cárdenas Nannetti). Bogotá: Grupo Editorial Norma.
- Heredia Álvaro, J. A. (2001). *Sistema de indicadores para la mejora y el control integrado de la calidad de los procesos*. Castelló de la Plata: Universitat Jaume I-Athenea.
- Hernández de Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2015). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). México: McGraw-Hill Education.
- Information, M. (2013). *Manual para desarrollo de procedimientos, políticas y documentación* [Manual de curso]. Info-Maps.
- Meena, K., & Thakkar, J. (2014). Development of Balanced Scorecard for healthcare using Interpretive Structural Modeling and Analytic Network Process. *Journal of Advances in Management Research*, 11, 232-256. doi: 10.1108/JAMR-12-2012-0051
- Perkins, M., Grey, A., & Remmers, H. (2014). What do we really mean by "Balanced Scorecard"? *International Journal of Productivity and Performance Management*, 63(2), 148-169. doi: 10.1108/IJPPM-11-2012-0127
- Porter, M. E. (2009). *Ser competitivo*. España: Ediciones Deusto.
- _____ (2010). *Ventaja competitiva. Creación y sostenibilidad de un rendimiento superior*. México: Pirámide.
- _____ (2011). ¿Qué es la estrategia? *Harvard Business Review*, diciembre 2011, 100-117. Recuperado de <http://www.uciifg.com/Repositorio/MAES/MAES-03/Unidad1/ESTRATEGIA%20MPORTER%202011.pdf>
- Rojas González, A. (2014). Modelos de gestión por procesos integrados en la salud. *Ene* (versión en línea), 8(3). doi: 10.4321/S1988-348X2014000300008
- SAP AG (2004). *Human Capital Management. A measurement breakthrough on the horizon* (19 pp.) [Libro blanco]. Recuperado de <https://es.slideshare.net/Jacknickelson/human-capital-management-3914776>
- Simon, D., Fischbach, K., & Schoder, D. (2014). Enterprise architecture management and its role in corporate strategic management. *Information Systems and e-Business Management*, 12(1), 5-42.
- Velázquez Hernández, B. M., & Yacamán Handal, R. (2014). Implementación de un programa de excelencia operacional como una herramienta para la mejora continua en el Centro Médico ABC. *Anales Médicos-Medigraphic*, 59(3), 179-184.
- Vinot, D. (2014). Transforming hospital management à la française: The new role of clinical managers in French public hospitals. *International Journal of Public Sector Management*, 27(5), 406-416. doi: 10.1108/IJPSM-06-2012-0067

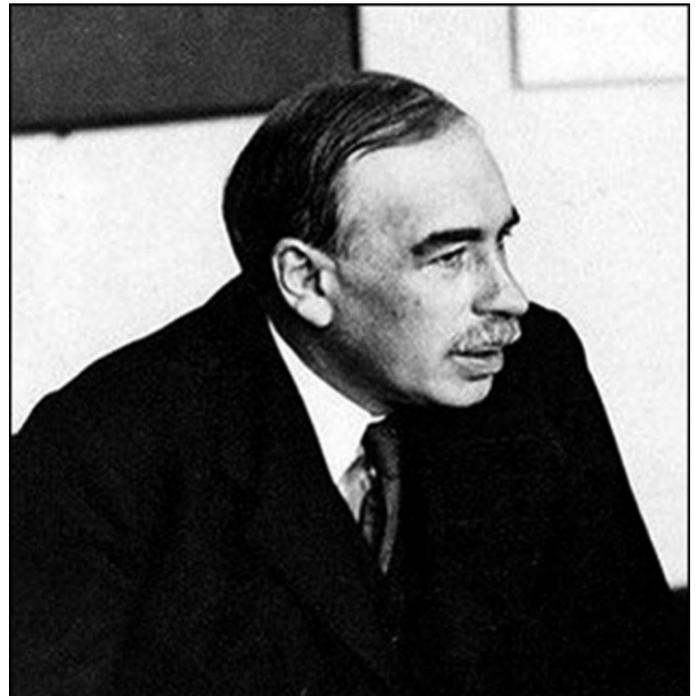
John Maynard Keynes. *In memoriam*

Gonzalo Maldonado Guzmán*✉

Maldonado Guzmán, G. (2018). John Maynard Keynes. *In memoriam* [Obituario]. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 95-96.

Sin lugar a dudas, la Teoría Económica ha sido una piedra angular en el crecimiento y desarrollo de la economía de las naciones, ha aportado información y modelos econométricos a las autoridades financieras y hacendarias para la toma de decisiones, o bien soluciones para erradicar las depresiones y crisis económicas. Asimismo, uno de los economistas de mayor renombre y máximo exponente en el campo de la Teoría Económica a nivel mundial, fue el Dr. John Maynard Keynes, economista inglés nacido el 5 de junio de 1883 en Cambridge, Reino Unido y fallecido en 21 de abril de 1946 en Firle, Sussex Oriental, Reino Unido, quien desarrolló una de las teorías macroeconómicas más importantes del siglo XX que permitió tanto al Reino Unido, a los Estados Unidos de América, como a otros países del orbe, superar la Gran Depresión de 1934.

Sir John Maynard Keynes es considerado por la comunidad científica internacional como uno de los economistas más influyentes del siglo XX, ya que sus ideas tuvieron una fuerte repercusión en las teorías y políticas económicas de principios del siglo pasado, al haber propuesto que el sistema capitalista no tiende al *pleno empleo* ni al *equilibrio de los factores productivos*, como lo consideraba en su momento la inmensa mayoría de los economistas, sino más bien tiende a un equilibrio que sólo de forma accidental coincidirá con el pleno empleo, porque no solamente la oferta agregada tiene un carácter ascendente, sino también por la inestabilidad de la demanda agregada proveniente de los desequilibrios en los mercados financieros y de capital, y como una consecuencia de la pérdida de confianza de los inversionistas privados en la economía.



John Maynard Keynes. Foto tomada de Wikipedia.

Sin embargo, la contribución sustancial de Keynes fue el proponer y demostrar que la intervención pública directa en materia de *gasto público* permitiría cerrar la brecha o déficit de la demanda agregada. En otras palabras, Keynes planteaba la necesidad de la participación del Estado a través del gasto público para alentar la inversión de los inversionistas privados, además de que el Estado debería regular la oferta y demanda agregadas a través de la famosa *Mano Invisible*; es decir, que el Estado interviniera directamente en la economía e invirtiera en ella para equilibrar el consumo y la inversión, ya que solamente mediante la intervención directa del Estado es que se podía erradicar la crisis económica (Gran Depresión de 1929) que estaban padeciendo la mayoría de los

* Departamento de Mercadotecnia, Centro de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Avenida Universidad 940, Ciudad Universitaria, C. P. 20131, Aguascalientes, Aguascalientes, México. Correo electrónico: gmalдона@correo.uaa.mx

✉ Autor para correspondencia

países capitalistas de inicio del siglo pasado, entre ellos nuestro país.

Los planteamientos de Keynes tuvieron gran repercusión en la economía del México de inicios del siglo XX, ya que la participación del Estado en la regulación del consumo y la inversión permitió el desarrollo e implementación de una política de puertas cerradas; es decir, se cerraron las puertas a las importaciones y se dio prioridad a la compra de insumos y materias primas a las empresas establecidas al interior del país y sustituyó importaciones por productos generados en el mismo país, lo cual facilitó el desarrollo de un proceso de industrialización basado en el consumo e inversión internos. A este proceso se le conoce como la industrialización basada en la sustitución de importaciones, logrando resultados importantes para la economía mexicana, pues le permitió superar la crisis que estaba atravesando México, producto de la Gran Depresión o Crisis Mundial de 1929.

Adicionalmente, Keynes consideró que la participación del Estado en la economía debería centrarse en incrementar significativamente la cantidad de ahorro de la sociedad, pero como el ahorro depende del ingreso económico que tengan las personas, la economía de cualquier país capitalista podría alcanzar un incremento sustancial del ahorro total si el Estado disminuye significativamente las tasas de interés, lo cual estimularía que las personas no guarden su dinero en el banco sino lo inviertan en

la creación de empresas y negocios, lo cual alentaría el empleo y, una vez que la sociedad tiene un mayor nivel de ingresos derivados de sus condiciones de empleo, es cuando el país estaría en condiciones de incrementar el ahorro total.

En este sentido, si se incrementa el ahorro nacional entonces el Estado tendría mayores recursos para generar un gasto mayor en obra pública, sobre todo cuando se tuvieran problemas de desempleo, o bien para mejorar la infraestructura industrial o para incrementar el nivel de vida de la sociedad. Por tanto, la visión de Keynes fue que el Estado tuviera una participación activa en la regulación de la oferta y demanda agregadas, en la regulación del gasto y la inversión y, esencialmente, en la generación de un equilibrio en el mercado que estimule o desaliente a los inversionistas privados, dependiendo del nivel de la demanda agregada, ya que ello le permitirá al Estado no solamente solucionar algunos de sus principales problemas macroeconómicos, sino también generar los recursos económicos necesarios para ejercer el gasto público (obra pública).

Este pensamiento macroeconómico revolucionó la forma de pensar de los economistas clásicos de principios del siglo XX, y cambió totalmente la forma de hacer investigación científica por parte de un sector importante de la comunidad científica y académica a nivel mundial, al incorporar una nueva visión y metodología totalmente contraria a la forma del trabajo científico imperante en ese momento.

Building digital government strategies. Principles and practices [Construyendo estrategias de gobierno digital. Principios y prácticas]

Sandoval-Almazán, R., Luna Reyes, L. F., Luna Reyes, D. E., Gil-García, J. R., Puroñ-Cid, G., & Picazo-Vela, S. (2017). *Public Administration and Information Technology [Construyendo estrategias de gobierno digital. Principios y prácticas]* (114 pp., ISBN 978-3-319-60347-6, doi 10.1007/978-3-319-60348-3). San Antonio, US: Springer International Publishing AG.

Manuel Díaz Flores*✉

Díaz Flores, M. (2018). *Building digital government strategies. Principles and practices [Construyendo estrategias de gobierno digital. Principios y prácticas]*. Reseña [Reseña de libro] *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 97-98.

El Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 se planteó como objetivo establecer una Estrategia Digital Nacional para acelerar la inserción de México en la Sociedad de la Información y del Conocimiento. Entre los logros más relevantes reportados por el propio gobierno federal está la Ventanilla Única Nacional para los Trámites e Información del Gobierno. De este modo, este portal ha contribuido a que el número de personas que utilizan Internet para interactuar con el gobierno haya aumentado muy significativamente. Sin embargo, a medida que se hace una revisión de la incorporación de las tecnologías de la información por los gobiernos estatales y aún más en los municipios el panorama es muy diverso, ya que solamente la mitad de los ayuntamientos de México han implementado acciones relacionadas con el índice de gobierno electrónico, el cual incorpora: indicador de computadoras, de líneas telefónicas, conexión a internet, información en sitio web y su funcionalidad. Entre las limitaciones más relevantes para avanzar en este proceso se señalan la falta de capacitación de los recursos humanos, la infraestructura y el financiamiento.

Adicionalmente, los tres niveles de gobierno tienen actualmente importantes requerimientos de información para cumplir con la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública Gubernamental, así como la rendición de cuentas. En este contexto, se publica este libro, una herramienta sumamente útil ya que es el resultado de investigaciones académicas tradicionales, de lecciones aprendidas

a través de la práctica profesional y la experiencia de consultoría. Está dirigido a los funcionarios públicos, administradores, consultores del gobierno, líderes de organizaciones no gubernamentales interesados en promover y desarrollar el gobierno digital. No da soluciones para cada situación particular, porque cada problema es diferente en su contexto, es más una

Public Administration and Information Technology 16

Rodrigo Sandoval-Almazán
Luis F. Luna-Reyes
Dolores E. Luna-Reyes
J. Ramon Gil-García
Gabriel Puroñ-Cid
Sergio Picazo-Vela

Building Digital Government Strategies

Principles and Practices

* Departamento de Economía, Centro de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad Autónoma de Aguascalientes. Avenida Universidad 940, Ciudad Universitaria, C. P. 20131, Aguascalientes, Aguascalientes, México. Correo electrónico: mdiaz@correo.uaa.mx
✉ Autor para correspondencia

Portada del libro *Building Digital Government Strategies. Principles and Practices [Construyendo estrategias de gobierno digital. Principios y prácticas]*.

guía que proporciona principios generales y vías para entender y resolver los desafíos asociados con los proyectos y estrategias del gobierno digital. Se presenta una colección relevante de principios e ideas sobre estrategias para mejorar la implementación del gobierno digital.

En cada capítulo se presenta un pequeño caso de estudio para ilustrar el problema a resolver, describe los principales principios y presenta argumentos y conclusiones basadas en los hallazgos de la propia investigación y referencias de estudios previos. Este libro está estructurado en nueve capítulos y desarrolla siete áreas en las que se interrelacionan una serie de principios y estrategias: la primera se expone en el capítulo dos y se titula *Desarrollando una Estrategia de Gobierno Digital para la Creación de Valor Público*. Se definen los conceptos de estrategia digital gubernamental y empresarial. Considera que el diseño de la estrategia es un continuo proceso de negociación de planes y oportunidades para la creación de valor público, el cual es otro proceso de negociación y clarificación entre los actores del gobierno y otros grupos de interés.

La segunda área, descrita en el tercer capítulo, se refiere a *la Conceptualización y Pre-planeación para un Proyecto de Gobierno Digital*. Se argumenta que hay otros aspectos más allá de la tecnología que deben considerarse, la comprensión y la administración para incrementar la probabilidad de éxito de los proyectos para gobiernos digitales, incorporando múltiples dimensiones que incluyan aspectos sociales y técnicos. Se recomienda a los administradores públicos seguir una serie de pasos para entender mejor el problema, los grupos de interés y las soluciones potenciales de estos proyectos, se incluye también a los negocios.

La tercer área se describe en el cuarto capítulo, *el Financiamiento y la Provisión de Recursos de las Estrategias del Gobierno Digital*. Se proponen estrategias a lo largo del ciclo presupuestal del gobierno, se proporciona una guía para definir adecuadamente las fuentes de recursos y la implementación del presupuesto en proyectos del gobierno digital. Se identifican diversos principios para construir sólidas estrategias de administración financiera para estos proyectos.

En la cuarta área, capítulo 5, *Trabajo en Red del Gobierno y la Interoperabilidad de los sistemas*, se introduce la idea del gobierno en red como una forma de organizar la entrega de servicios mediante la colaboración interorganizacional. El diseño institucional que enfatiza el proceso sobre la dirección y el control apoya la colaboración. El concepto de interoperabilidad combina aspectos técnicos con las políticas y otros aspectos organizacionales.

La quinta área se expone en el capítulo 6, denominado *Administrando la Información Tecnológica en el Desarrollo de Proyectos*. Aborda el desafío que tienen los gobiernos de generar metodologías para proyectos del gobierno digital con un diseño que reduzca el tiempo entre la concepción del proyecto y su implementación. Debido a los cambios tan rápidos de la información tecnológica se deben hacer ajustes de los planes en respuesta a los cambios del contexto con acciones ágiles y oportunas. Usar herramientas simples para que las organizaciones obtengan ventaja documentando sus experiencias sobre procesos, problemas, lecciones aprendidas y resultados en el desarrollo de proyectos de información tecnológica.

La sexta área, capítulo 7, *Gobierno Abierto: Datos Abiertos y Proyectos*, describe la importancia de ecosistemas de datos abiertos y su implementación en gobiernos abiertos. Se discute la importancia de una cultura de datos abiertos y la creación de comunidades que usen, compartan y colaboren con la información gubernamental. También se enfatiza la importancia de equipos de trabajo para crear oportunidades que promuevan la innovación al interior del gobierno abierto.

La séptima área, capítulo 8, *Promoviendo el Compromiso Ciudadano*, discute el rol de las herramientas electrónicas de doble vía, la comunicación y el compromiso entre las entidades gubernamentales y el público. Describe también el impacto social de la adopción de estas herramientas en la estructura organizacional del gobierno y sus beneficios para los ciudadanos. Se presentan recomendaciones para mejorar el éxito en las estrategias para la implementación de los diversos medios electrónicos.

Finalmente, en la conclusión del libro se hace una reflexión sobre estas siete áreas que presentan igual número de desafíos.

Política editorial de la revista *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*

Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes es una revista arbitrada, científica y multidisciplinaria; editada y distribuida cuatrimestralmente por el Departamento de Apoyo a la Investigación, de la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Se editan tres números por año en versión impresa y electrónica.

La revista *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* contribuye con la difusión del conocimiento científico y tecnológico generado por investigadores de la región, nacionales y extranjeros mediante la publicación de artículos de investigación, revisiones científicas, notas científicas, reseñas de libros y obituarios, para fomentar la colaboración multidisciplinaria e interinstitucional que favorezca el desarrollo de la investigación, promueva la publicación de sus resultados y la formación de una cultura científica en la población lectora.

Tiene como objetivo principal difundir, comunicar y divulgar el conocimiento científico y tecnológico, así como promover el desarrollo de la investigación y la producción científica con estándares de calidad en el ámbito local, nacional e internacional a través de la publicación de artículos originales y de difusión.

Está dirigida a estudiantes de licenciatura, ingenierías y posgrados, profesionistas de las diversas disciplinas, profesores e investigadores y público interesado en la investigación científica y el desarrollo tecnológico. Se distribuye en instituciones de educación superior, centros de investigación, bibliotecas, y organismos del sector público. Cuenta con convenios de intercambio bibliotecario, como: México-USA, COMPAB, REBCO y REMBA. A nivel internacional la revista se difunde por medio de los índices en los que está citada: Índice de Revistas de Divulgación Científica y Tecnológica del Conacyt, Actualidad Iberoamericana, IRESIE, LATINDEX, PERIÓDICA y REDALYC, y en las bases de datos: DIALNET, EBSCO, HELA, ULRICH'S Periodicals Directory e Informe Académico.

El primer número se publicó en el año de 1990 y hasta el momento se han editado más de 70. En su estructura considera tres secciones: 1) Editorial, que incluye el Directorio, un Consejo Editor, un Comité Editorial de distinguida trayectoria y el grupo editor. 2) Artículos científicos, inéditos y originales. 3) Reseñas de libros y obituarios, todos relacionados con las Ciencias Agropecuarias, Ciencias Naturales y Exactas, Ciencias de la Salud, Ingenierías y Tecnologías, así como las Ciencias Económicas, Sociales y Humanidades.

La revista participa en la Declaración del Movimiento Internacional "Open Acces" con el fin de contribuir al aumento de la visibilidad, el acceso y la difusión de la producción científica, por ello, los autores y colaboradores de los artículos ceden los derechos autorales a través de una carta de cesión de derechos, a la revista *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, de manera que la misma podrá publicarlos en formato impreso y/o electrónico, incluyendo Internet.

CRITERIOS PARA PUBLICAR

Los manuscritos propuestos a publicación, deberán ser textos científicos que no hayan sido publicados ni enviados simultáneamente a otra revista para su publicación y de esta manera, sean una contribución inédita a la literatura científica. Solo se aceptan artículos escritos en idioma español y deberán contener todas las secciones estipuladas en esta guía, formateados correctamente. Deben seguir las reglas gramaticales y ortográficas de la lengua española. Todos los manuscritos serán evaluados por al menos dos especialistas o investigadores expertos de las diferentes áreas, pertenecientes a diversas instituciones de investigación reconocidas a nivel nacional e internacional.

Tipos de publicaciones

Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes acepta artículos originales: de investigación, revisiones científicas y notas científicas; asimismo, reseñas de libros y obituarios; sin embargo, se da prioridad al primer género, de tal manera que integrará el 75% del contenido de cada número y el 25% corresponderá al segundo género.

Artículo de investigación: Informa los resultados de una investigación, cuyo tema queda comprendido en alguna de las áreas del conocimiento anteriormente indicadas y es de interés científico por su relevancia.

Artículo de revisión científica: Resume y analiza un tema científico de importancia, es una revisión de la literatura y del estado actual de un campo de investigación, que ofrece una evaluación crítica del tema.

Nota científica: Es un artículo corto de un tema relevante, novedoso y actual, de ciencia y tecnología que describe o explica un hallazgo y por su mérito científico ameritan una rápida publicación. Pueden incluirse resultados relevantes que se quieren difundir de forma rápida y no detallada, con información concluyente, pero insuficiente para su análisis en extenso.

Reseña de libro: Narra o describe de manera breve y clara la evaluación o crítica constructiva de una obra literaria o científica que se ha publicado en los tres años anteriores a la fecha de publicación de la reseña.

Obituario: Describe la vida y obra de una persona fallecida con aportaciones relevantes a la ciencia.

Estructura del contenido

Artículo de investigación

No deberá ser menor de cinco ni mayor de 20 cuartillas incluyendo las ilustraciones. En algunos casos se podrá acordar con el editor una extensión mayor, no sin antes valorar la importancia de dicha ampliación. Los manuscritos deberán incluir los siguientes elementos (si de acuerdo a la temática no es posible cumplirlo se deberá justificar, en su caso podrán aceptarse ensayos con una aportación crítica, analítica y documentada):

Título. Deberá ser breve y claro que refleje el contenido del trabajo. No exceder de 20 palabras, escrito en español y en renglón aparte, el título en inglés.

Nombre(s) del/los autor(es). Se presentará en primer orden el nombre completo del autor principal y posteriormente de los coautores (sin grado académico), agregando al pie de primer página para cada uno su adscripción (departamento, dependencia e institución, país), domicilio de la institución y correo electrónico. Indicar quién es el autor para correspondencia.

Resumen. Deberá ser un sólo párrafo que sintetice el propósito del trabajo y reúna las principales aportaciones del artículo en un máximo de 150 palabras, sin subdivisiones y sin citas bibliográficas. Esta sección se iniciará con la palabra **Resumen** al margen izquierdo, con letras negritas y sin punto. Todo manuscrito debe incluir una versión en inglés del resumen (*abstract*).

Palabras clave. Incluir seis palabras clave relacionadas con el contenido del trabajo, separadas con punto y coma, escritas en español y su versión en inglés (*keywords*).

Introducción. Señalar en qué consiste el trabajo completo, objetivos, antecedentes, estado actual del problema e hipótesis.

Materiales y Métodos. Describir en forma precisa el procedimiento realizado para comprobar la hipótesis y los recursos empleados en ello.

Resultados. Describir los resultados de la investigación. Se podrán presentar datos de medición o cuantificación.

Discusión. Presentar la interpretación de los resultados de acuerdo con estudios similares, es decir, correlacionando

el estudio con otros realizados, enunciando sus ventajas y aportaciones, evitando adjetivos de elogio.

Conclusiones. Precisar qué resultados se obtuvieron y si permitieron verificar la hipótesis; asimismo, plantear perspectivas del estudio y de su aplicación.

Agradecimientos. Mencionar fuente de financiamiento o gratitud que el autor considere necesario.

Referencias. Todas las referencias citadas en el texto deberán aparecer en esta sección y viceversa. Se enlistarán las fuentes bibliográficas y páginas electrónicas consultadas en riguroso orden alfabético sin enumeración ni viñetas, con sangría francesa e interlineado doble.

Todos los artículos deberán apegarse al Manual de Publicaciones de la *American Psychological Association* (APA) 6^a edición.

Para libro. Iniciar con el apellido del primer autor con mayúsculas y minúsculas, separándolo de la(s) inicial(es) del nombre con una coma. Si son varias iniciales, éstas se separan entre sí con un punto y un espacio. Se coloca un punto después de la última inicial de cada autor y una coma para separar el nombre del siguiente autor. Después del último autor se abre un paréntesis donde se coloca el año de la referencia citada, se cierra el paréntesis y se coloca un punto. Se escribe el título del libro con mayúsculas y minúsculas y cursivas. Se coloca entre paréntesis la edición usando número ordinal con la abreviatura *ed* y un punto al cierre del paréntesis. En caso de ser la primera edición se omitirá. A continuación la ciudad (si la ciudad en la que se encuentra la editorial no es muy conocida, se colocará el país también), dos puntos, espacio y el nombre de la editorial con mayúsculas y minúsculas, y punto final. Aquí se presenta el formato de diversas publicaciones con diferente número de autores.

Formato de libro con un autor:

Apellido1 Apellido2 de autor, X. (Año). *Título de libro*. Ciudad: Editorial.

Formato de libro con número de edición y con un autor:

Apellido1 Apellido2 de autor, X. (Año). *Título de libro* (0^a ed.). Ciudad: Editorial.

Formato de libro con dos autores:

Apellido1 Apellido2 de Autor1, X., & Apellido1 Apellido2 de Autor2, Y. (Año). *Título de libro* (0^a ed.). Ciudad: Editorial.

Formato de libro con tres a siete autores:

Apellido1 Apellido2 de Autor1, V., Apellido1 Apellido2 de Autor2, W., Apellido1 Apellido2 de Autor3, X., Apellido1 Apellido2 de Autor4, Y., & Apellido1 Apellido2 de Autor5, Z. (Año). *Título de libro* (0^a ed.). Ciudad: Editorial.

En caso de haber un libro con ocho o más autores, se colocan los primeros seis autores igual que en los libros con siete o menos autores, inmediatamente puntos suspensivos, coma, y el último autor. El año, título, ciudad y editorial se colocan igual que en libro con menos de ocho autores.

En referencias de origen anglosajón es usual que autores tengan su nombre normalizado con un solo apellido, lo cual facilita su búsqueda en índices. Algunos autores de origen latino, por otra parte, en ocasiones colocan su nombre con ambos apellidos unidos por un guion, con el mismo motivo. Se tratará de respetar este aspecto dentro de lo posible.

Formato de libro editado:

Apellido1 Apellido2 de Editor1, X., & Apellido1 Apellido2 de Editor2, Y. (Eds.). (Año). *Título de libro editado*. Ciudad: Editorial.

Formato de capítulo en libro editado:

Apellido1 Apellido2 de autor de capítulo, X. (Año). Título de capítulo de libro editado. En X. Apellido1 Apellido2 de Editor (Ed.), *Título de libro editado* (pp. 000-111). Ciudad: Editorial.

Para artículo científico en publicación periódica. Para autores y año de publicación es igual que para libro; de ser revista mensual, se incluirá el mes antes del año. Después se coloca el título del artículo empleando mayúsculas y minúsculas y redondas. Punto. Nombre de la revista o publicación con mayúsculas y minúsculas y cursivas, coma, volumen con cursivas, número de publicación entre paréntesis, coma, espacio y número de primera y última página del artículo separadas por guion y punto final.

Formato de artículo en publicación periódica:

Apellido1 Apellido2 de Autor1, W., Apellido1 Apellido2 de Autor2, X., Apellido1 Apellido2 de Autor3, Y., & Apellido1 Apellido2 de Autor4, Z. (Año). Título del artículo. *Nombre de revista*, 0(1), 000-111.

Formato para artículo de periódico:

Apellido1 Apellido2 de Autor, X. (día de mes de año). Título de artículo o nota. *Nombre de periódico*, pp. X0, X1.

Para sitio de Internet. Este tipo de referencias deben ir en orden alfabético en la misma lista que las referencias consultadas para realizar el documento. Se sigue el mismo proceso que para las versiones impresas, pero en las referencias electrónicas se incluye la clave conocida como DOI (digital object identifier, por sus siglas en inglés), que significa identificador digital de objetos, aunque no todas las publicaciones electrónicas cuentan con uno. De contar con DOI, es suficiente con colocarlo después de

la editorial, en caso de ser libro; o después de las páginas Recuperado de, en caso de publicación periódica, para una adecuada recuperación de los datos. Si no se tiene DOI, se coloca el URL (uniform resource locator, por sus siglas en inglés) o localizador uniforme de recursos, al que se conoce como enlace electrónico.

Ejemplo de URL:

<http://www.crossref.org/02publishers/glossary.html>

Al trabajar con un enlace electrónico en un documento de texto, es importante tener la casilla de guiones inactiva en el procesador. También lo es copiar el URL de la ventana de dirección del navegador y pegarlo en el documento para una correcta recuperación de los datos. Tanto el DOI como el URL deben colocarse sin agregar ningún punto final, aunque sean la parte última de la referencia, ya que ello puede dar lugar a confusión en el rastreo de los datos.

Ejemplo de DOI:

10.1037/0278-6133.27.3.379

Formato de libro electrónico con DOI:

Apellido1 Apellido2 de Autor, X. (Año). *Título de libro*. doi: 00.0000/0-000-00000-0

Formato de libro electrónico sin DOI:

Apellido1 Apellido2 de Autor, X. (Año). *Título de libro*. Recuperado de <http://www.xxxxx.xxx.xxx/xxxx/XXXX.xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx0xxxx0xxxx00000>

Formato para publicación periódica electrónica con DOI:

Apellido1 Apellido2 de Autor1, X., Apellido1 Apellido2 de Autor2, Y., & Apellido1 Apellido2 de Autor3, Z. (Año). Título del artículo. *Nombre de la revista electrónica*, 0(1), 000-111. doi: xx.xxxxxxxx

Formato para publicación periódica electrónica sin DOI:

Apellido1 Apellido2 de Autor1, X., Apellido1 Apellido2 de Autor2, Y., & Apellido1 Apellido2 de Autor3, Z. (Año). Título del artículo. *Nombre de la revista electrónica*, 0(1), 000-111. Recuperado de <http://www.xxxxxxx>

Periódico en línea:

Además de la información para periódico impreso mencionada en esta guía, agregar Recuperado de y el enlace electrónico.

Formato para una película:

Apellido1 Apellido2 de Productor, X. (Productor), & Apellido1 Apellido2 de Director, Y. (Director). (Año). *Título de la película* [Película]. País de origen: Estudio.

Formato para una fotografía recuperada en línea:

Apellido1 Apellido2 de Fotógrafo, X. (Año). *Título de fotografía* [Fotografía]. Recuperado de <http://www.www.www>

Si no se tiene el autor:

Título de la fotografía [Fotografía]. (Año). Recuperado de <http://www.www.www>

Si no se tienen tampoco título ni fecha:

[Imagen de xxxxx]. Recuperado de <http://www.www.www>

Para mayor detalle se recomienda consultar los lineamientos del manual de publicaciones de la APA (*American Psychological Association*). Se pueden revisar en

Tovar Sosa, M. A. (Dir. ed.). (2010). *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association*. Versión abreviada (2ª. ed., trad. de la 6ª. en inglés M. Guerra Frías). México: Editorial El Manual Moderno.

Para las citas a lo largo del documento se recomienda la siguiente guía.

Cuando el o los nombres de los autores forman parte de la redacción; es decir, están incluidos en la acción, se colocan los autores unidos con la conjunción “y”, posteriormente se coloca el año entre paréntesis. Ejemplo: Domínguez Márquez y Johns (2009) descubrieron que las partículas se movían hexagonalmente. En la siguiente tabla se encuentra el formato para este tipo de cita.

Número de autores	Primer mención de autor(es) dentro de la redacción	Siguientes menciones dentro de la redacción
Un autor	Apellido(s) de Autor (año)	Apellido(s) de Autor (año)
Dos autores	Apellido(s) de Autor1 y Apellido(s) de Autor2 (año)	Apellido(s) de Autor1 y Apellido(s) de Autor2 (año)
Tres a cinco autores	Apellido(s) de Autor1, Apellido(s) de Autor2, de Autor3, de Autor4 y de Autor5 (año)	Apellido(s) de Autor1 et al. (año)
Seis autores en adelante	Apellido(s) de Autor1 et al. (año)	Apellido(s) de Autor1 et al. (año)

Por otra parte, cuando el o los nombres de los autores no forman parte de la redacción; es decir, están excluidos de la acción, se colocan tanto los autores como el año dentro del paréntesis, separados por una coma. Ejemplo: Otros autores han descubierto que las partículas se movían hexagonalmente (Domínguez Márquez, & Johns, 2009). En la siguiente tabla se encuentra el formato para este tipo de cita.

Número de autores	Primer mención de autor(es) fuera de la redacción	Siguientes menciones fuera de la redacción
Un autor	(Apellido[s] de Autor, año)	(Apellido[s] de Autor, año)
Dos autores	(Apellido[s] de Autor1 & Apellido[s] de Autor2, año)	(Apellido[s] de Autor1 & Apellido[s] de Autor2, año)
Tres a cinco autores	(Apellido[s] de Autor1, Apellido[s] de Autor2, de Autor3, de Autor4, & de Autor5, año)	(Apellido[s] de Autor1 et al., año)
Seis autores en adelante	(Apellido[s] de Autor1 et al., año)	(Apellido[s] de Autor1 et al., año)

Tablas y Figuras. Deberán encontrarse insertadas en el lugar que les corresponde a lo largo del artículo, se identificarán consecutivamente con números arábigos y cada una deberá ser mencionada pertinentemente dentro del texto.

En cuanto a las tablas, su orientación será vertical. Deberán tener título breve pero explicativo en la parte superior utilizando mayúsculas y minúsculas, así como la fuente de donde se obtuvieron al pie de las mismas. Se suprimirán los filetes verticales. Cada tabla deberá, además de estar incluida en el documento, ser enviada aparte en el formato original en el que fue creada (Word, Excel, por ejemplo). Se evitará enviar tablas creadas en formato de imagen o pdf.

Con respecto a las figuras, se consideran como tales tanto gráficas, como fotografías, mapas, planos, dibujos, etc., se utilizarán mayúsculas y minúsculas con tipografía Century Gothic 8-10 pts. en su elaboración. Se deberá explicar en un texto al pie de la imagen, claro pero breve, el contenido de cada una, así como la fuente de donde se obtuvo. El tamaño máximo de cada figura incluyendo texto al pie será de 12 cm de longitud y 16 cm de ancho, el mínimo permitido será de 6 cm de longitud y 8 cm de ancho. Los dibujos o esquemas deberán estar en original y tener una calidad mínima de 300 ppp. o al menos 5 megapíxeles con formato tiff, eps o jpg.

Además de las gráficas, mapas, planos, etc., que pueda contener, el artículo deberá incluir por lo menos una fotografía con texto al pie breve pero explicativo, e incluir todas las características referidas en esta guía.

Para especificar la fuente tanto en tablas como figuras, en caso de ser de su autoría, se colocará la leyenda “Elaboración propia” al pie de cada tabla o figura. De no ser así, es responsabilidad del autor contar con el permiso para tomar o adaptar información, así como colocar la fuente de donde se tomó o adaptó la misma con la

leyenda "Tomada de..." o "Adaptada de...", según corresponda, e incluir dicha referencia en el apartado correspondiente, para tener un cruce de referencias completo.

Ecuaciones o símbolos matemáticos. En caso de que el artículo contenga ecuaciones o símbolos matemáticos que pudiesen perderse en el proceso de edición, se enviarán, además del archivo en Word, el mismo documento en formato pdf con cada ecuación o símbolo señalados y otro archivo también en pdf, que contenga únicamente las ecuaciones.

Identificación de archivos de imagen para envío:

Para el envío de archivos de figuras, el o los archivos deberán estar nombrados con la expresión Fig, sin espacio el número consecutivo y sin espacio una o máximo dos palabras identificatorias del artículo, sin acentos, puntos ni guiones, con la finalidad de lograr una mayor fluidez en el proceso de edición.

Ejemplo:
Fig1Nanotubos
Fig2EspecieMarina

Artículo de revisión científica

No deberá ser menor de cinco ni mayor a 20 cuartillas, considerando figuras y tablas insertadas dentro del documento. Debe incluir título en español y en inglés; nombre, datos de adscripción con dirección completa de institución y correo electrónico de cada autor a pie de primer página; resumen en español y en inglés (abstract) y palabras clave en español y en inglés (keywords); texto del artículo considerando: introducción al tema (incluyendo por qué el problema es de interés), desarrollo del trabajo con una discusión académica, conclusión y un apartado de referencias. El contenido del artículo puede estar subdividido cuidando que exista una conexión entre los apartados. Las referencias, figuras y tablas seguirán el mismo formato que en los artículos de investigación.

Nota científica

No deberá ser mayor a cinco cuartillas. Debe incluir título en español y en inglés; nombre, datos de adscripción con dirección completa de institución y correo electrónico de cada autor a pie de primer página; resumen en español y en inglés (abstract) y palabras clave en español y en inglés (keywords). El texto deberá escribirse de continuo y sin espacio extra entre los párrafos. Las referencias, figuras y tablas seguirán el mismo formato que en los artículos de investigación.

Reseña de libro

No deberá ser mayor a dos cuartillas, con la imagen de la portada ya insertada. Debe incluir identificación del autor y su obra: nombre del autor, título de la obra, lugar de publicación, editorial, fecha de edición, ISBN y número de páginas; resumen o descripción del texto o contenido, se-

ñalando las partes en que está integrado, crítica y conclusión, literatura, fotografías, ilustraciones o gráficas y otros recursos o datos relevantes que lo particularizan como exponente y autoridad en la materia. Se enviará, aparte del archivo de texto, un archivo jpg con la portada del libro en la edición reseñada.

Obituario

No deberá ser mayor a dos cuartillas, considerando ya la fotografía ilustrativa dentro del texto. Deberá incluir nombre del autor y sus datos de adscripción incluyendo correo electrónico a pie de primer página, texto del artículo con una introducción que incluya nombre de la persona recordada, fecha y lugar de nacimiento y muerte, una breve biografía, aportaciones científicas y académicas relevantes en la ciencia y una reflexión. También es importante que el autor envíe aparte el archivo jpg con buena resolución de la fotografía en donde aparezca solamente el científico aludido para ilustrar el documento. Deberá colocar la autoría de dicha imagen o la fuente de donde se obtuvo.

Características de la revisión de artículos

1. El editor se reserva el derecho de devolver a los autores los artículos que no cumplan con los criterios para su publicación.
2. El proceso de dictaminación se llevará a cabo siguiendo un orden, de acuerdo con la fecha de recepción.
3. Los artículos son revisados mediante un software para detección de plagio.
4. Todos los trabajos son sometidos a un arbitraje de doble ciego a cargo de la Cartera de Árbitros que integra la revista, la cual está compuesta por miembros del SNI o investigadores expertos en el área pertenecientes a instituciones de investigación reconocidas a nivel nacional e internacional. Cada trabajo es revisado por al menos dos evaluadores, especificando en el dictamen si se acepta el artículo intacto, con modificaciones o si definitivamente se rechaza. En caso de contar con resultados discrepantes, se enviará el trabajo a un tercer evaluador, cuyo resultado será definitivo.
5. El editor dará a conocer al autor contacto el resultado del arbitraje a través del formato "Observaciones"; si el trabajo es aceptado con modificaciones, el autor deberá atenderlas en un plazo no mayor a 10 días hábiles y enviará nuevamente al editor el original y el archivo electrónico del artículo junto con un **archivo de respuesta a dichas observaciones** en formato Word. El archivo consiste en una explicación detallada de las modificaciones realizadas tomando en cuenta todas y cada una de las observaciones

señaladas por los evaluadores. Se deberá incluir el comentario del evaluador y correspondiente acción o respuesta del autor. No es necesario incluir en este archivo las anotaciones realizadas por los evaluadores sobre el artículo.

6. Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, el artículo no será considerado para publicarse en el siguiente número de la revista.
7. El editor informará al autor contacto, en su caso, el avance de su trabajo en el proceso de dictaminación, el rechazo, o la fecha de publicación del mismo.
8. La revista se reserva el derecho de adelantar o posponer los artículos aceptados con el fin de dar una mejor estructura a cada número de acuerdo a la política editorial.
9. Una vez que el artículo haya sido aceptado, pasará a una revisión de estilo y formato, para su versión definitiva. Se enviarán pruebas de impresión en formato pdf al autor para correspondencia y serán devueltas al editor dos días después de haber sido recibidas. Si las pruebas no se entregan a tiempo, el artículo se publicará sin las correcciones correspondientes.
10. Los artículos presentados son responsabilidad total del autor (o los autores) y no reflejan necesariamente el criterio de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, a menos que se especifique lo contrario.

Indicaciones para los autores

1. El escrito se enviará en formato Word y en formato pdf en hoja tamaño carta.
2. Tipografía para texto: Arial en 12 pts. Tipografía para figuras: Century Gothic 10 pts.
3. Justificación: Completa, no utilizar sangría al inicio de párrafos.
4. Márgenes: Superior e inferior 2.5 cm.; izquierdo y derecho de 3 cm.
5. Espacio: Doble.
6. Abreviaturas: Escribir el término completo la primera vez que se usa y seguirlo con la abreviatura entre paréntesis.
7. Las expresiones matemáticas deben estar escritas claramente y se debe utilizar el Sistema Internacional de Unidades. Asimismo, los conceptos y términos científicos y técnicos deberán escribirse de forma clara y precisa.
8. Es importante que la información se condense dentro del texto principal y utilizar alguna nota al pie solo

para fortalecer los planteamientos del artículo. La nota debe transmitir solo una idea evitando ecuaciones o párrafos complejos.

9. Sugerir por lo menos tres posibles evaluadores para la revisión de su trabajo. La selección final de revisores será responsabilidad del editor.
10. Los autores tendrán derecho a recibir cinco ejemplares de la versión impresa. No se tienen costos por publicación.

Especificaciones de envío

Para enviar un artículo es necesario que el documento cumpla estrictamente con los lineamientos de formato y de contenido que anteriormente se han especificado.

El envío del artículo puede realizarse mediante dos vías:

- a) **Mensajería o entrega personal** en la Dirección General de Investigación y Posgrado, en un sobre cerrado dirigido a María del Carmen Martínez Serna, editora de la revista, el cual deberá contener artículo impreso, archivos del artículo e ilustraciones, resumen curricular del primer autor y datos del autor para correspondencia.
- b) **Correo electrónico** dirigido a la editora de la revista, a través de revistaiyc@correo.uaa.mx que contenga archivos adjuntos (*attachment*) con el artículo, las ilustraciones, resumen curricular del primer autor y datos del autor para correspondencia.

Es importante que el autor conserve una copia de los archivos y de la impresión enviada.

Colaboración e informes

Revista *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*

Dirección General de Investigación y Posgrado

Departamento de Apoyo a la Investigación

Av. Universidad núm. 940, C.U.,

Edificio Académico-Administrativo, piso 6

C. P. 20131, Aguascalientes, Ags., México

Teléfono (449) 910 74 00 Ext. 34113

Correo electrónico: revistaiyc@correo.uaa.mx

www.uaa.mx/investigacion/revista