



PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA

3

ANO 3 NUMERO 1



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA



PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

DIRECTORIO

Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca
Rectora

Dr. Aurelio Domínguez González
Secretario Académico

MAP. José Alejandro Ramírez Reséndiz
Secretario de la Contraloría

MSP. Sergio Pacheco Hernández
Secretario Administrativo

M. en I. Alejandro Jáuregui Sánchez
Secretario de Finanzas

Dra. María Teresa García Besné
Secretaria de Extensión Universitaria

M. en S. Luis Alberto Fernández García
Secretario Particular de Rectoría

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Director de la División de Investigación
y Posgrado de la Facultad de Ingeniería

Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería

Año 2. Núm. 001, julio del 2019, *Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería* es una publicación semestral editada y publicada por la **Universidad Autónoma de Querétaro, División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería**. Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Tel. (442) 192-12-00, ext. 7035.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 04-2017-032412430300-203

ISSN: En trámite

Ambos registros están en trámite por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

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

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial del contenido e imágenes de la publicación sin plena autorización de la Universidad.

DIRECCIÓN

Dr. Manuel Toledano Ayala

EDITORES RESPONSABLES

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
M. en C. Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez
M. en C. Christopher Alexis Cedillo Jiménez

EDITORES ASOCIADOS

MC. Adán Mercado Luna
Dr. Alejandro Espinosa Calderón
MC. Alejandro Moreno Gómez
Dr. Andrés Torres Acosta
MC. Armando Juárez Trujillo
Dr. Arturo González Gutiérrez
Dra. Claudia Gutiérrez Antonio
MC. Cuauhtémoc Hernández Galeno
Dr. Eduardo Elizalde Peña
Dr. Enrique Rico García
Dra. Genoveva Hernández Padrón
Dra. Janet Ledesma García
MI. Javier García Pérez
MI José Alfonso Balbuena Cruz
Dr. José Antonio Quevedo Tiznado
Dr. José de Jesús Pérez Bueno
Dr. José Luis Reyes Araiza
Dr. José Roberto Galaviz González
Dr. Luis Miguel Contreras Medina
Dr. Marco Antonio Aceves Fernández
Dr. Miguel A. Pérez Lara y Hernández
MC. Tadeo Rodríguez

COMITÉ EDITORIAL

DISEÑO EDITORIAL

Rodrigo Alonso Hernández Gallegos
Isaac Cabrera Ruiz
Sofía Amaya Alcalá
Jorge Javier Cruz Florín
COORDINACIÓN DE DISEÑO E IMAGEN
FACULTAD DE INGENIERÍA

PORTADA

Isaac Cabrera Ruiz

CUIDADO DE LA EDICIÓN

Daniela Pérez López
Soid Lazlo Ruíz
DISEÑO EDITORIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA

12. EFECTO DEL MÉTODO DE ESCARIFICACIÓN SOBRE EL PORCENTAJE DE GERMINACIÓN EN SEMILLAS (*Erythrina americana* Miller)

Effect of the scarrification method on the percentage of seed germination (*Erythrina americana* Miller)

HUGO ASael RODRÍGUEZ GUADARRAMA, JUAN FERNANDO GARCÍA TREJO, ROSARIO GUZMÁN CRUZ, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ.

22. SISTEMA DE MONITOREO INTELIGENTE DEL CONSUMO ELÉCTRICO EN CASAS ELÉCTRICAMENTE SUSTENTABLES

Smart Monitoring System of Electrical Consumption in Electrically Sustainable Houses

LUIS FELIPE OSEGUERA MORALES

34. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DE ÓXIDO DE BISMUTO PARA SU USO EN FOTOCATÁLISIS

Obtaining and characterization of thin films of bismuth oxide for use in photocatalysis

JOSÉ DEMETRIO QUIROZ QUIÑONES, SANDRA ANDREA MAYÉN HERNÁNDEZ

42. VALUACIÓN AMBIENTAL DEL CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO: CERRO DE PATAMBAN, TANGANCÍCUARO, MICHOACÁN

Environmental valuation of land cover change: Cerro de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán

ÁNGEL MARTÍN LOZA VARGAS, NEZAHUALCÓYOTL FLORES LAZO, VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL, VERÓNICA LEYVA PICAZO

58. EFECTO DEL RIEGO, TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTAL SOBRE COMPUESTOS FENÓLICOS Y LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE EN ORÉGANO

Effect of irrigation, environmental temperature and humidity on phenolic compounds and antioxidant activity in oregano

MARÍA ISABEL NIETO RAMÍREZ, JUAN FERNANDO GARCÍA TREJO, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ, RAMÓN GERARDO GUEVARA GONZÁLEZ, BENITO PARRA PACHECO.

68. DETECCIÓN DE ÁREAS DE PAVIMENTO EN IMÁGENES AÉREAS OBTENIDAS A TRAVÉS DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) UTILIZANDO FILTRO DE GABOR

Detection of pavement areas in aerial images obtained from unmanned aerial vehicles (UAV) using Gabor filter

SILVIA PATRICIA SALAS AGUILAR, OMAR CHÁVEZ ALEGRÍA,
DONATO ANDRÉS FLORES ESPINOZA

78. EFECTO DE EXTRUSIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FISCOQUÍMICAS EN BOTANAS DE TERCERA GENERACIÓN ENRIQUECIDAS CON PROTEÍNA VEGETAL

The Effect of Extrusion on the Physicochemical Properties of third generation snacks enriched with vegetal protein

L. M. ÁVALOS-ESPARZA, M. GAYTÁN. MARTÍNEZ, M. DE LA L. REYES-VEGA,
E. MORALES-SÁNCHEZ, M. CONTRERAS-PADILLA, J. O. VALENCIA-HERNÁNDEZ

88. OPTIMIZACIÓN ESTADÍSTICA DE UN POLVO PARA PREPARAR UNA BEBIDA ALTA EN FIBRA A PARTIR DE BAGAZO DE MANGO (*Mangifera indica* L., VARIEDAD MANILA)

Statistical optimization of a powder to prepare a high fiber beverage from mango bagasse (*Mangifera indica* L., Manila variety)

ALMA KAREN BURGOS-ARAIZA, MARCELA GAYTÁN-MARTÍNEZ

100. EFECTO DEL EXTRACTO ETANÓLICO DE DIFERENTES ÓRGANOS DE LA PLANTA DEL CHILCUAGUE (*Heliopsis longipes*) EN GORGOJO (*Sitophilus granarius*)

Effect of the ethanolic extract of different organs of the chilcuague plant (*Heliopsis longipes*) on weevil (*Sitophilus granarius*)

IXCHEL PAROLA-CONTRERAS, JUAN ANTONIO VALENCIA-HERNÁNDEZ,
NALLELY SOLANO-ÁLVAREZ, RAMÓN G. GUEVARA-GONZÁLEZ

110. MÉTODOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA ESTIMACIÓN DE ATRIBUTOS INTERNOS Y EXTERNOS DE CALIDAD Y MADUREZ DE UN FRUTO-UNA REVISIÓN

Destructive and non-destructive methods for the estimation of internal and external attributes of quality and ripening of a fruit-a review

LUCÍA LIMONES-PÉREZ, LUIS MIGUEL CONTRERAS-MEDINA

128. DESARROLLO DE UN PRODUCTO DE PANIFICACIÓN LIBRE DE GLUTEN

Development of a gluten-free bread product

PAMELA MIRANDA, MARCELA GAYTÁN, HÉCTOR MARTÍNEZ

EFFECTO DEL MÉTODO DE ESCARIFICACIÓN SOBRE EL PORCENTAJE DE GERMINACIÓN EN SEMILLAS *(Erythrina americana Miller)*

Effect of the scarrification method on the percentage of seed germination
(Erythrina americana Miller)

Hugo Asael Rodríguez Guadarrama, Juan Fernando García Trejo,
Rosario Guzmán Cruz, Ana Angélica Feregrino Pérez.

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
asaelrg91@gmail.com

RESUMEN

Las semillas de la planta *Erythrina americana* Miller poseen una cubierta muy dura, lo que dificulta que tengan un alto porcentaje de germinación en condiciones naturales. Es así que el objetivo de este trabajo fue utilizar métodos de escarificación mecánica, raspadura con una superficie abrasiva, térmica, sumersión en agua caliente a 35 °C y 60 °C por 30 y 70 min, mecánica-térmica, aplicación de calor con un quemador incandescente o cautín durante 2 y 5 segundos, y química, ácido sulfúrico al 98% durante 30 min. La temperatura de 35 °C en tiempos de 30 y 70 min mostró el mayor porcentaje de germinación con 42 y 52%, respectivamente, y 7-17% más que el grupo control, mientras que una temperatura de 60 °C en ambos tiempos provocó una disminución en el porcentaje de germinación con respecto al grupo control. Los tratamientos con cautín en ambos tiempos y escarificación con superficie abrasiva generaron que se obtuvieran los porcentajes más bajos de germinación: 13 y 23% menos que el control, respectivamente. Además, estos tratamientos causaron la muerte de más del 70% de semillas. La escarificación química no presentó diferencias con el grupo control. En conclusión, los tiempos de exposición para los tratamientos térmicos y químicos pueden generar una ventaja para la optimización en la germinación de esta especie de planta, tanto en costos económicos como en biológicos. Se requieren más estudios que ayuden a precisar un alto porcentaje de germinación, sobrevivencia de la semilla y buen crecimiento de la plántula para su utilización en sistemas agroforestales que maximicen el cultivo y propagación de *E. americana* Miller en el país.

Palabras clave: colorín, escarificación, latencia y dormición, porcentaje de germinación, semillas.

ABSTRACT

The seeds of the plant *Erythrina americana* Miller have a very hard cover and; scarification methods, which vary among different species, are required to achieve a high and efficient germination in a short period of time. The objective of this work was to use scarification methods such as: mechanical, scraping with an abrasive surface, thermal, immersion in hot water at 35 °C and 60 °C for 30 and 70 min, mechanical-thermal, application of heat with an incandescent burner or soldering iron for 2 and 5 seconds, and chemical, 98% sulfuric acid for 30 min, treatments. The treatments at 35 °C during 30 and 70 minutes showed the highest percentage of germination with 42 and 52%, respectively, 7-17% more than the control group, while the treatments at 60 °C in both times 30 and 70 min caused a decrease on the percentage of seed germination. The methods with soldering iron in both times 2 and, 5 seconds and, scarification with abrasive surface obtained the lowest percentages of seed germination; 13 and 23% less than the control, respectively. In addition, these treatments caused the death of more than 70% of seeds. The chemical treatment did not present differences with the control group. In conclusion, exposure times for thermal and chemical scarifications may have an advantage for optimization on seed germination for this plant species, both in economic costs and biological properties. More studies are necessary to reach a high percentage on germination and survival of seeds and good growth of seedlings for use in agroforestry systems that maximize the cultivation and propagation of *E. americana* Miller in our country.

Keywords: colorin, latency and dormancy, percentage of germination, scarification, seeds.



INTRODUCCIÓN

La germinación de semillas es una característica importante para el inicio del desarrollo de la plántula, lo que es de gran interés para los sistemas agrícolas de producción en cuanto a manipulación y conocimiento de los factores influyentes de este proceso [1]. La germinación es el proceso de hinchamiento del embrión y ruptura de la cubierta de la semilla, cuando la radícula ha alcanzado más de 3 mm de longitud [1], [2]. La mayoría de las semillas de plantas forestales poseen un bajo porcentaje de germinación, debido a su latencia o dormición, lo que limita la obtención de una gran cantidad de especies destinadas para el área agroforestal [3], [4].

Por un lado, el estado de latencia varía en cada especie de planta y su rompimiento depende de los tipos, cantidad o intensidad de los factores externos que influyen alrededor de la semilla. Estos factores son grado de humedad, diferencia de temperaturas y tipo de pH en el suelo [5]. Mientras que los estados de dormición impiden a las semillas germinar aún en las condiciones favorables y están relacionados con la testa o cubierta dura de la semilla (dormición física) o con la actividad metabólica al interior de la semilla (dormición fisiológica) [3], [5], [6]. La mayoría de las semillas de especies de la familia *Fabaceae* presentan dormición física y unas cuantas presentan dormición fisiológica o una combinación de dormición física-fisiológica [7]-[9].

La escarificación consiste, a través de diversos procesos, en el debilitamiento, apertura o alteración de la cubierta o estado de inactividad de la semilla para permitir la germinación [6]. En sistemas agroforestales se utilizan métodos de escarificación mecánica, térmica o química para acelerar el proceso de germinación, donde la elección del mejor tratamiento dependerá de la especie y el tipo de latencia de la semilla [10]. La escarificación mecánica consiste en causar daño en la testa de la semilla sin dañar al embrión mediante el contacto con superficies abrasivas, permitiendo la permeabilidad al agua, tempera-

tura y oxígeno [11]. Por ejemplo, el rayado mecánico con dos cilindros metálicos de superficie abrasiva por 1200 segundos resulta en un 69% de germinación (25% más que el control) en semillas de *Acacia angustissima* [12]. En otros estudios, se ha utilizado un quemador incandescente o cautín como método mecánico-térmico de escarificación con más del 80% de germinación en diferentes semillas como *Acacia spp.*, *Prosopis spp.*, *Delonix spp.* [13], *Medicago polymorpha* y *Trifolium subterraneum* [14] y *Acacia karoo* [15]. En este caso, la punta de hierro al rojo incandescente del cautín provoca un pequeño orificio marrón en la capa exterior de la testa, lo que puede provocar la permeabilidad del medio exterior al interior de la semilla [13]. Por otro lado, el tratamiento químico con ácido sulfúrico al 98% ha mostrado resultados de hasta 90% de germinación en semillas de *Prosopis juliflora* y *Dodonaea viscosa* [5], en *M. polymorpha* [14] y en *Lupinus bilineatus* [7].

La especie *Erythrina americana* Miller, comúnmente llamada Colorín o Patol, es un árbol endémico Fabáceo (subfamilia *Papilionoideae*) que se encuentra en el centro del país en bosques perenes, caducifolios y xerófilos con clima húmedo cálido a clima-seco, en elevaciones de 1000 a 2100 msnm [16], [17]. También, se ubica como planta ornamental en sitios urbanos como parques, calles, viveros y casas en diversas ciudades centrales de México [18]. Esta especie ha sido ampliamente estudiada por sus compuestos bioactivos, principalmente, los tipos alcaloides, que están presentes en varias partes vegetativas (en flores, semillas, hojas y tronco) y tienen una aplicación potencial en medicina [19]-[22]. Además, ha sido una planta importante y útil para la restauración de bosques tropicales estacionalmente secos [23], ya que es una planta fijadora de nitrógeno y ayuda a mantener la fertilidad del suelo con la conservación de la flora y fauna del sitio [24].

La semilla de esta planta posee una cubierta dura, lo que ocasiona que sólo el 10% de las semillas germinen en condiciones natura-

les. Algunos autores recomiendan la sumersión en agua caliente a temperaturas no mayores a 70 °C para promover la escarificación y aumentar el porcentaje de germinación [16], sin embargo, no se conoce la temperatura y tiempo de sumersión óptimas para lograr el máximo valor de germinación. Aunque se ha utilizado la macropropagación vegetativa a través de esquejes en esta especie para un crecimiento rápido [23], el uso de semillas para el cultivo de Colorín confiere a las plantas una variabilidad genética más alta que los esquejes, al ser organismos clonales de la planta madre, y puede generar ventajas como la protección contra plagas y la sobrevivencia en las condiciones ambientales [25]-[28].

Existen pocos estudios acerca de las características de germinación y producción de plántulas que son restringidos por la dormición física de la semilla del género *Erythrina* [29]. Por tal motivo, el objetivo fue determinar el efecto de los diferentes tratamientos de escarificación sobre el porcentaje de germinación de las semillas de Colorín (*Erythrina americana* Miller), así como conocer las variables óptimas de tiempo y tipo de escarificación, de las cuales no se han reportado anteriormente, para elegir el mejor proceso germinativo y potencial cultivo en sistemas agroforestales para esta especie.

METODOLOGÍA

Las semillas de *Erythrina americana* Miller se recolectaron de un ejemplar después de su proceso de floración en marzo del 2018, en el campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera a Chichimequillas s/n, Ejido Bolaños, C.P. 76140, Querétaro, Qro., cuyas coordenadas son 20.624741 N, -100.368679 O. Con una temperatura de 28°C, humedad relativa media 60%. Las semillas fueron limpiadas con agua destilada de forma previa a los tratamientos de escarificación. La longitud y ancho promedios de las semillas fueron de 1.5 y 0.91 cm. El peso promedio de 100 semillas fue de 89 g. Se es-

cogieron 20 semillas para cada tratamiento, con una réplica de cada uno.

Tratamientos con agua caliente

El agua se calentó en un recipiente a manera de baño María hasta llegar a una temperatura de 35 °C. Un lote de semillas fue colocado en el agua hirviendo a 35°C por 30 minutos y otro lote por 70 minutos. En otro tratamiento, el agua se calentó de igual manera a baño María, pero hasta alcanzar una temperatura de 60 °C y las semillas fueron sumergidas por 30 minutos y por 70 minutos.

Tratamientos con cautín

Se utilizó un quemador incandescente o cautín de 60 W (120 V/ 60 Hz y temperatura máxima de 460 °C) con una punta de grosor de 1 mm. A un grupo de semillas se le colocó la punta del cautín con su temperatura máxima en la zona cercana al hilo durante 2 segundos y a otro grupo durante 5 segundos. Se modificó la metodología de [13] con respecto a la duración de contacto con la punta del cautín, debido a que la cubierta de las semillas de Colorín es más gruesa que la de otras semillas de Fabáceas.

Tratamiento con superficie abrasiva

Con la ayuda de una lija para madera del número 40, grano grueso, se rasparon manualmente cada una de las semillas por cerca de 3 segundos, de tal manera que una parte de la cubierta de la semilla fuera dañada sin alcanzar el tejido embrionario o cotiledón.

Tratamiento con ácido sulfúrico al 98%

Un lote de semillas fue sumergido en un recipiente de vidrio con ácido sulfúrico al 98% durante 30 min, según la metodología de [7]. La proporción de semillas y ácido sulfúrico fue 1:2.

Después, las semillas fueron lavadas 3 veces con agua corriente antes de su siembra.



Análisis de datos

Un lote de semillas fue tomado como grupo control al sembrarlo directamente en el sustrato sin ningún tratamiento. Todas las semillas fueron sembradas en sustrato Peat-Moss (Turba Premier de musgo *Sphagnum*) en combinación con Perlita (Hortiperl RQ F) en una proporción 4:1. Las semillas fueron regadas con agua corriente cada dos días y el proceso de germinación se realizó bajo condiciones de invernadero, con una temperatura mínima de 16 °C y una temperatura máxima de 30 °C.

Se observó el número de semillas germinadas a través del tiempo. Se realizaron curvas de regresión polinomial de segundo grado para las semillas germinadas con los diferentes tratamientos contra el tiempo transcurrido mediante el programa estadístico GraphPad Prisma (versión 5, 2007, USA). También, se estimó el porcentaje total de semillas germinadas, no germinadas, semillas muertas y plántulas anormales, definidas como plantas con hojas cloróticas y tallos deformados, según la metodología de me-

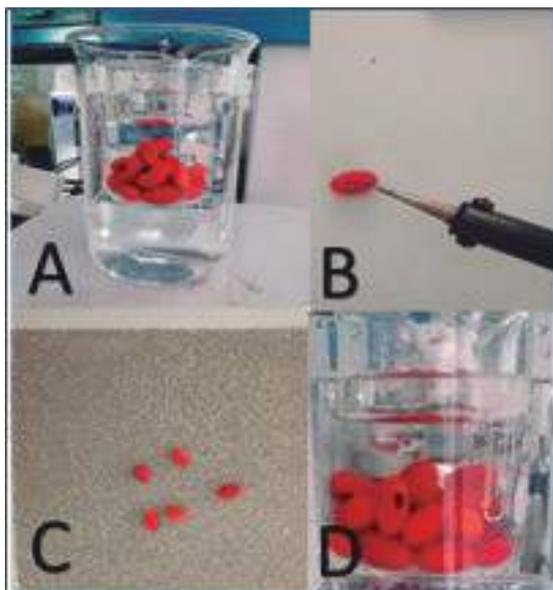


Figura 1. Imágenes con los diferentes tratamientos de escaificación de las semillas de *Erythrina americana* Miller. A) tratamientos con agua caliente, B) tratamientos con cautín, C) tratamiento con superficie abrasiva y D) tratamiento con ácido sulfúrico al 98%.

dición de [14] y en base a la Ecuación 1, se utilizó un ANOVA de una vía con postprueba de Tuckey ($p < 0.05$) para observar diferencias entre grupos de tratamiento y control.

$$G = \frac{n}{N} * 100 \quad (1)$$

Donde G representa el porcentaje de semillas/plántula; N es el número total de semillas por tratamiento y n es el promedio de semillas germinadas, no germinadas, muertas o plántulas anormales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se observa una gráfica del número acumulado de semillas germinadas a lo largo del tiempo para cada uno de los tratamientos, el control y la aplicación de regresiones polinomiales para conocer la uniformidad y la tendencia aumentada o disminuida de germinación. La germinación de semillas en el grupo control es constante a través de los días ($R^2=0.98$), lo cual es similar a los tratamientos con agua caliente, cautín y ácido sulfúrico, la germinación con una tendencia aumentada ($R^2 \geq 0.9$). Sin embargo, en el tratamiento con la superficie abrasiva, la germinación es atenuada a lo largo del tiempo ($R^2=0.77$) y la tendencia polinomial es menor al grupo control. Además, la Ecuación 2 de la regresión de tendencia lineal del tratamiento de agua caliente a 35 °C y a 70 min nos permite saber que una cantidad de 10 semillas, por ejemplo, pueden germinar aproximadamente en 6 días, más rápido que el grupo control que tarda hasta 8 días, según la Ecuación 3 (véase Apéndice).

El tratamiento que tuvo mayor porcentaje de germinación de semillas fue el de agua caliente a 35 °C durante 30 minutos con 52%, 17% más que el grupo control, y el tratamiento que tuvo menor porcentaje de germinación fue el de raspadura con superficie abrasiva con sólo 12%, 23% menos que el grupo control (véase Tabla 1). Los mayores porcentajes con semillas no germinadas fueron los tratamientos con agua caliente y el grupo control.

En cuanto a semillas muertas, el tratamiento con superficie abrasiva obtuvo el mayor porcentaje, seguido de los tratamientos con cautín. En este caso, los tratamientos con agua caliente a 35 °C obtuvieron los porcentajes más bajos de muerte de semillas y fueron diferentes estadísticamente a los demás tratamientos. También, se observó un pequeño porcentaje de plántulas con anomalías de las semillas germinadas, como cotiledones con manchas de quemadura, primordios de hojas con contornos irregulares y decoloración del epicótilo presentes en los tratamientos de 60 °C y 70 min, cautín a 2 s y ácido sulfúrico al 98% (véase Tabla 1).

Un tratamiento eficiente en agua caliente o hirviendo requiere de un control preciso, ya que los parámetros críticos son la temperatura y el tiempo durante la inmersión de la semilla. Además, puede ser complicado controlar la temperatura en grandes cantidades de semillas durante el tratamiento [13], [30].

En este estudio, el tratamiento con agua caliente a 35 °C en todos los tiempos obtuvo los mejores resultados de germinación, sin embargo, presentó un gran número de semillas no germinadas lo que sugiere que el método de calentamiento no fue uniforme en todo el lote de semillas durante el tratamiento o se requiere una temperatura mayor a 35 °C, pero menor a 60 °C para evitar el daño al embrión por temperatura en esta especie. En otros casos, se han obtenido buenos resultados a temperaturas de 110 y 140 °C en agua hirviendo por un tiempo de 2 min en semillas de *Lupinus leptophyllus* [31].

Por otro lado, el tratamiento con ácido sulfúrico al 98% durante 30 minutos no mostró diferencias con respecto al grupo control como se ha observado en otras especies de la familia *Fabaceae* [5], [12], [30]. Esto sugiere que las semillas requieren un tiempo más largo de sumersión en ácido sulfúrico al 98% para la escarificación como se ha ob-

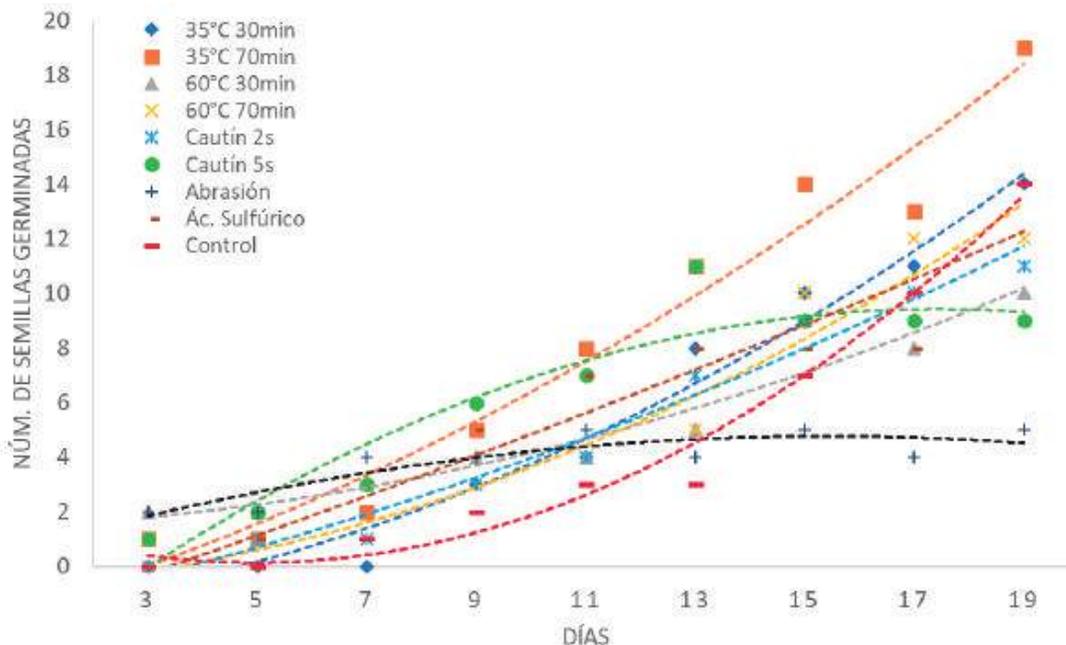


Figura 2. Número acumulado de semillas germinadas por tratamiento de escarificación a lo largo del tiempo. Aplicación de regresiones polinomiales para cada tratamiento y control son representadas con líneas punteadas: tratamientos con agua caliente: 35°C y 30 min (línea azul rey, $R^2=0.97$), 35°C y 70 min (línea anaranjada, $R^2=0.96$), 60°C y 30 min (línea gris, $R^2=0.92$) y 60°C y 70 min (línea amarilla, $R^2=0.95$); tratamientos con cautín: duración de 2 s (línea azul claro, $R^2=0.97$) y 5 s (línea verde, $R^2=0.9$); tratamiento con superficie abrasiva (línea negra, $R^2=0.77$); tratamiento con ácido sulfúrico al 98% (línea marrón $R^2=0.9$) y control (línea roja, $R^2=0.98$).



Tabla 1. Porcentajes de semillas germinadas, semillas no germinadas, semillas muertas y plántulas anormales (hojas cloróticas y tallos deformados). El porcentaje de plántulas anormales deriva del porcentaje total de semillas germinadas. Los valores indican promedios \pm desviación estándar.

Tratamiento	Semillas germinadas	Semillas no germinadas	Semillas muertas	Plántulas anormales
35°C 30 min	42.5 \pm 3.5% AB	42.5 \pm 10.6% a	15 \pm 7.1% a	7.5 \pm 3.5% a
35°C 70 min	52.5 \pm 3.5% A	32.5 \pm 10.6% abc	15 \pm 1% a	5 \pm 1% a
60°C 30 min	25 \pm 7.1% AB	25 \pm 1% abc	50 \pm 7.1% bde	0% a
60°C 70 min	30 \pm 1% AB	25 \pm 1% abc	45 \pm 1% be	10 \pm 1% a
Cautín 2 s	27.5 \pm 10.6% AB	0% b	72.5 \pm 10.6% bfg	5 \pm 7.1% a
Cautín 2 s	22.5 \pm 10.6% bc	2.5 \pm 3.5% bc	75 \pm 7.1% dfg	0% a
Abrasión	12.5 \pm 10.6% C	0% b	87.5 \pm 10.6% cf	2.5 \pm 3.5% a
Ác.sulfúrico	35 \pm 7.1% ab	17.5 \pm 3.5% bc	47.5 \pm 3.5% beg	5 \pm 7.1%a
Control	35 \pm 7.1% ab	37.5 \pm 17.7% a	27.5 \pm 10.6% ae	0% a

Las letras diferentes significan la diferencia entre grupos. Análisis de ANOVA de una vía. Comparación de promedios con prueba de Tuckey, $p < 0.05$.

servado en otros estudios [7], [32]. También, la concentración mayor o menor de ácido sulfúrico puede influir en la germinación o viabilidad de las semillas, ya que este tratamiento puede causar daños severos en algunas especies de semillas [12], [14], [33], lo que sugiere un porcentaje de semillas muertas mayor que el grupo control observado en este estudio. Además, este método de escarificación puede causar problemas ambientales en relación con el desecho de contaminantes químicos [13].

Las ventajas del tratamiento con un quemador mecánico, en comparación con el agua caliente, es que la semilla permanece seca y, por tanto, se puede almacenar por un periodo de tiempo antes de su siembra [34]. Además, este método es tan efectivo como el uso de taladros, rodillos o materiales con superficie abrasiva para escarificar las semillas mecánicamente [35], [36]. La escarificación con cautín es un método manual y muy económico, sin embargo, se limita a cantidades pequeñas de semillas o a pruebas de germinación en laboratorio. No obstante, existen aparatos de mayor procesamiento como el quemador mecánico, que es mucho más eficiente y rápido al escarificar 1 kg de

semillas en menos de 5 min y puede aplicarse a una gran variedad de especies de semillas [13], [37]. Por otro lado, el uso del quemador incandescente o cautín en este estudio no mostró diferencias contra el grupo control en cuanto al porcentaje de germinación. Por el contrario, mostró diferencias significativas entre grupos en cuanto al porcentaje de semillas muertas lo que supone que el tiempo de exposición, de 2 y 5 segundos, es perjudicial para esta especie. También, la escarificación con la superficie abrasiva fue la más perjudicial como método de germinación en esta especie, lo que sugiere que el contacto inmediato de la semilla desnuda con el sustrato húmedo es muy drástico para el inicio de la maquinaria fisiológica de germinación para este lote de semillas de *E. americana*.

Por otra parte, las semillas recolectadas para este trabajo indican un nivel de deterioro acelerado, debido al porcentaje moderado de semillas muertas en el grupo control. Esto sugiere una viabilidad baja en las semillas por su carga genética y/o fisiológica [2], [14], [38], que depende del ejemplar del cual fueron recolectadas las muestras. Adicionalmente, en futuras investigaciones se podrían aplicar otros métodos de escarificación como

temperaturas bajas [39], tiempos de sumersión con H_2SO_4 [30] y KNO_3 [40], con ácido giberélico [41] y uso de nanopartículas [42].

CONCLUSIONES

Los tratamientos térmicos con agua caliente a 37 °C tuvieron un efecto positivo al aumentar el porcentaje de germinación de semillas de *Erythrina americana* Miller. Las temperaturas altas y los tiempos prolongados en agua caliente y con el quemador incandescente, además de métodos abrasivos, afectan gravemente la viabilidad de las semillas en esta especie. Por ello, se requiere precisar los tiempos de exposición en la escarificación de la semilla con temperatura alrededor de los 37 °C y generar un modelo que ayude a optimizar el máximo porcentaje de germinación en esta planta.

APÉNDICE

Ecuaciones de las regresiones de tendencia polinomial de la germinación/tiempo:

Tratamiento 35 °C 70 min:

$$y=0.106x^2+1.23x-1.33 \quad (2)$$

$$\text{Control: } y=0.273x^2-1.08x+1.21 \quad (3)$$

Tratamiento 35 °C 30 min:

$$y=0.132x^2+0.579x-1.523 \quad (4)$$

Tratamiento 60 °C 30 min:

$$y=0.0833x^2 + 0.2167x + 1.5 \quad (5)$$

Tratamiento 60 °C 70 min:

$$y=0.1331x^2+ 0.3522x - 0.6429 \quad (6)$$

Tratamiento ácido sulfúrico:

$$y=0.0238x^2 + 1.3286x-1.619 \quad (7)$$

Tratamiento cautín 2 s:

$$y=0.0595x^2 + 0.9214x-1.381 \quad (8)$$

Tratamiento cautín 5 s:

$$y=-0.1818x^2 + 2.9848x-2.8333 \quad (9)$$

Tratamiento abrasivo:

$$y=-0.0758x^2 + 1.0909x + 0.8333 \quad (10)$$

Donde y indica el número de semillas germinadas y x indica el tiempo en días.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo y la beca otorgada al Biólogo H. Asael Rodríguez Guadarrama durante toda esta investigación.

REFERENCIAS

[1] ISTA, *Reglas Internacionales para el Análisis de las Semillas*, 2016.

[2] I. Rodríguez-Quilon, G. Adam y J. M. Durán, "Ensayos de germinación y análisis de viabilidad y vigor en semillas," Madrid, 2008.

[3] C. Cuadra, "Germinacion, latencia y dormicion de las semillas," *Internental Medicine*, vol. 50, no. 10, pp. 1089-1092, 2011.

[4] J. M. Baskin y C. C. Baskin, "A classification system for seed dormancy," *Seed Science Research*, vol. 14, no. 01, pp. 1-16, Mar. 2004.

[5] S. M. H. Nasr, S. K. Savadkoohi, y E. Ahmadi, "Effect of different seed treatments on dormancy breaking and germination in three species in arid and semi-arid lands," *Forest Science and Practice*, vol. 15, no. 2, pp. 130-136, May 2013.

[6] E. Khurana y J. S. Singh, "Ecology of seed and seedling growth for conservation and restoration of tropical dry forest : a review," *Environmental Conservation*, vol. 28, no. 01, pp. 39-52, Mar. 2001.

[7] J. M. Martínez, D. A. Rodríguez-Trejo, E. Guizar-Nolazco y R. Bonilla-Beas, "Escarifica-



ción artificial y natural de la semilla de *Lupinus bilineatus* Benth. TT-Natural and artificial scarification of *Lupinus bilineatus* Benth. Seeds," *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 14, no. 2, pp. 73-79, 2008.

[8] K. M. G. G. Jayasuriya, A. S. T. B. Wijetunga, J. M. Baskin y C. C. Baskin, "Seed dormancy and storage behaviour in tropical Fabaceae: A study of 100 species from Sri Lanka," *Seed Science Research*, vol. 23, no. 4, pp. 257-269, 2013.

[9] B. J. López, J. A. Devesa, T. Ruiz, J. López Martínez, T. Ruiz y A. Ortega-olivencia, "Seed germination in Genisteae (Fabaceae) from South-West Spain," 1999.

[10] S. A. Varela y V. Arana, "Latencia y germinación de semillas. Tratamientos pregerminativos," *Unidad Genética Ecológica y Mejoramiento Forestal*, INTA EEA Bariloche, no. 1, pp. 1-10, 2011.

[11] J. M. Pérez-Armas, "Evaluación de doce métodos de escarificación de semillas de chonte (*zanthoxylum Aguilarii*) y Canoj (*Ocotea guatemalensis*) en el Asintal, Retalhuleu," *AUSJAL*, 2008.

[12] R. Rincón-Rosales, N. R. Culebro-Espinosa, F. A. Gutierrez-Miceli y L. Dendooven, "Scarification of seeds of *Acacia angustissima* (Mill.) Kuntze and its effect on germination," *Seed Science and Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 301-307, 2003.

[13] K. Poulsen y F. Stubsgaard, "Tres Métodos de Escarificación Mecánica de Semillas de Testa Dura," *Danida Forest Seed Centre*, vol. 27. pp. 36-52, 1995.

[14] I. Martín y C. De la Cuadra, "Evaluation of different scarification methods to remove hardseededness in *Trifolium subterraneum* and *Medicago polymorpha* accessions of the Spanish base genebank," *Seed Science and Technology*, vol. 32, no. 3, pp. 671-681, Oct. 2004.

[15] D. Lagerwall, "Germination and predation of *Acacia karroo* seeds on acid mine drainage polluted soils," *WireDSpace, Wits Institutional Respository Environment. Dsp.*, 2016.

[16] R. García-Mateos, M. Soto-Hernández y H. Vibrans, "*Erythrina americana miller* ('Colo-

rín'; Fabaceae), a versatile resource from Mexico: A review," *Economic Botany*, 2001.

[17] B. A. Krukoff y R. C. Barneby, "Conspectus of species of the genus *Erythrina*," *Lloydia*, 1974.

[18] CONABIO, "Morelos-Estrategias Estatales de Biodiversidad," 2017. [Online]. Available: <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/morelos.html>

[19] M. E. Garín-Aguilar, J. E. Ramírez Luna, M. Soto-Hernández, G. V. Del Toro y M. M. Vázquez, "Effect of crude extracts of *Erythrina americana* Mill. on aggressive behavior in rats," *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 69, pp. 189-196, 2000.

[20] S. Sánchez-Herrera, R M Soto-Hernández, G Kite, y M R García-Mateos, "Identificación de alcaloides en las inflorescencias de *Erythrina americana* Miller," *Revista Chapingo Serie Horticultura*, vol. 7, no. 1, pp. 37-48, 2001.

[21] E. Reimann, "Synthesis Pathways to *Erythrina* Alkaloids and *Erythrina* Type Compounds," in *Progress in the Chemistry of Organic Natural Products*. Vienna: Springer Vienna, 2007, pp. 1-62.

[22] R. García-Mateos, M. Soto-Hernandez y D. Kelly, "Alkaloids from six *Erythrina* species endemic to Mexico," *Biochemical Systematics and Ecology*, vol. 26, no. 5, pp. 545-551, Jul. 1998.

[23] T. C. Fehling-Fraser y E. Ceccon, "Macropropagation of *Erythrina americana* in a greenhouse: a potential tool for seasonally dry tropical forest restoration," *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 2015.

[24] A. Moreno-Calles et al., "Agroforestry systems and biodiversity conservation in arid zones: the case of the Tehuacán Valley, Central México," *Agroforestry Systems*, vol. 80, no. 3, pp. 315-331, Nov. 2010.

[25] L. Deisset et al., "Weed Seed Bank in an Agroforestry System With *Eucalyptus* in Subtropical Brazil," *Planta Daninha*, vol. 36, no. 0, May 2018.

[26] A. Gardarin, C. Dürr, y N. Colbach, "Modeling the dynamics and emergence of a mul-

tispecies weed seed bank with species traits," *Ecological Modelling*, vol. 240, pp. 123-138, Agosto 2012.

[27] B. I. Nyoka, S. A. Mng'omba, F. K. Akinnifesi, O. C. Ajayi, G. Sileshi y R. Jamnadass, "Agroforestry Tree Seed Production and Supply Systems in Malawi," *Small-scale For*, vol. 10, no. 4, pp. 419-434, Nov. 2011.

[28] F. Tapia-Pastrana y A. Jiménez-Salazar Los cariotipos de *Cologania grandiflora* y *Erythrina americana* (Leguminosae-Papilionoideae-Phaseoleae) de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, México," *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 82, no. 3, 2011.

[29] A. M. Soares Pereira et al., "Seed Germination and Production of *Erythrina mulungu* and *Erythrina velutina* Plantlets," *American Journal of Plant Sciences*, vol. 5, pp. 535-540, 2014.

[30] D. Sanabria, R. Silva-Acuña, M. A. Oliveros y R. Barrios, "Escarificación química y térmica de semillas subterráneas de *Centrosema rotundifolium*," 2001.

[31] A. Alderete-Chávez, D. A. Rodríguez-Trejo, V. Espinosa-Hernández, E. Ojeda-Trejo y N. de la Cruz-Landero, "Effects of different scarification treatments on the germination of *Lupinus leptophyllus* seeds," *International Journal of Botany*, vol. 6, no. 1, pp. 64-68, 2010.

[32] F. J. Maldonado-Arciniegas, "Evaluación de la germinación de semillas de *Vachellia macracantha* usando métodos de escarificación," Quito: USFQ, 2015.

[33] R. H. Ellis, T. D. Hong, y E. H. Roberts, *Handbook of seed technology for genebanks*. Volume I. Principles and methodology, 1985.

[34] E. Kimura y M. A. Islam, "Seed Scarification Methods and their Use in Forage Legumes," *Research Journal of Seed Science*, vol. 5, no. 2, pp. 38-50, Feb. 2012.

[35] T. Myint, W. y Srikul, S. (2010). Germination of seed of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) as affected by different mechanical scarification methods. *Seed Science and Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 635-645, Oct. 2010.

[36] Y. L. Qian, J. A. Cosenza, S. J. Wilhelm y D. Christensen, "Techniques for Enhancing

Saltgrass Seed Germination and Establishment," *Crop Science*, vol. 46, no. 6, p. 2613, Nov. 2006.

[37] K. M. Ghantous y H. A. Sandler, "Mechanical Scarification of Dodder Seeds with a Handheld Rotary Tool," *Weed Technology*, vol. 26, no. 03, pp. 485-489, Sep. 2012.

[38] J. D. Bewley y M. Black, *Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination: Volume 2: Viability, Dormancy, and Environmental Control*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1982.

[39] A. A. Kandil, A. E. Sharief y A. M. A. Odam, "Dormancy Overcoming of Some Alfalfa Varieties," *Research Journal of Seed Science*, vol. 5, no. 1, pp. 19-31, Jan. 2012.

[40] J. Martínez, Y. Villegas, J. R. Enríquez-del Valle, J. C. Carrillo, y M. A. Vásquez, "Estrategias de escarificación para eliminar la latencia en semillas de *Cenchrus ciliaris* L. y *Brachiaria brizantha* cv. Marandu," *Revista Mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 4, no. SPE6, pp. 1263-1272, 2013.

[41] E. Kimura y M. A. Islam, "Seed Scarification Methods and their Use in Forage Legumes," *Research Journal of Seed Science*, vol. 5, no. 2, pp. 38-50, Feb. 2012.

[42] R. Azimi, G. A. Heshmati y R. Kavandi, "Evaluation of SiO₂ Nanoparticles Effects on Seed Germination in *Astragalus squarrosus*," *Journal of Rangeland Science*, vol. 6, no. 2, pp. 135-143, Apr. 2016.

SISTEMA DE MONITOREO INTELIGENTE DEL CONSUMO ELÉCTRICO EN CASAS ELÉCTRICAMENTE SUSTENTABLES

Smart Monitoring System of Electrical Consumption in
Electrically Sustainable Houses

Luis Felipe Osegueda Morales

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
luisosegueda@outlook.com

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados del desarrollo de un sistema de monitoreo inteligente del consumo de energía eléctrica que examina cada uno de los contactos instalados en una vivienda, lo cual permite saber cuál es el consumo por área o por dispositivo conectado a la red. Este dato ayuda a que el usuario modifique el patrón de uso o consumo por cada uno de los aparatos conectados a la red eléctrica. La conexión del sistema a la nube o sistema de almacenamiento de datos a internet contribuye a disponer de los datos del consumo en cualquier lugar donde se tenga una conexión a internet. La escalabilidad del proyecto es uno de los factores principales, ya que este sistema puede ser utilizado por sistemas inteligentes como lo son de predicción y de control del consumo de energía eléctrica.

Palabras clave: sistema de monitoreo, consumo eléctrico, monitoreo inteligente de energía eléctrica.

ABSTRACT

This paper presents the results of the development of an intelligent monitoring system for electricity consumption. The system monitors each of the outlet boxes installed in a home, which allows knowing the area and device consumption connected to the network, this data allows the user to modify the use or consumption pattern for each of the connected devices to the electrical network. The connection of the system to the cloud allows to have the consumption data in any place with Internet connection. The scalability of the project is one of the main factors, since this system can be used by intelligent systems such as those of prediction and control of the consumption of electricity.

Keywords: monitoring system, electric consumption, smart monitoring of electricity

INTRODUCCIÓN

Hoy en día se considera que la generación de energía eléctrica está totalmente relacionada con el desarrollo de los países, y México no es la excepción. En 1899, la capacidad instalada para generar energía eléctrica en México era de 31 039 kW en industrias textiles y mineras, todas de inversión privada, la capacidad aumentó hasta llegar a 1450 MW en 1951, en 1987 la capacidad instalada había alcanzado 23.15 GW y para el 2011 ese valor estaba situado en 52 GW [1].

Los dispositivos y servicios de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) se están expandiendo día a día en todos los aspectos de la vida humana. A raíz de un mayor enfoque mundial en los impactos ambientales sobre el consumo de energía en general, se ha tomado en cuenta el consumo eléctrico relacionado con las TIC. Heddeghem *et al.* [2] evaluó que el consumo eléctrico de las TIC en su etapa de uso ha evolucionado de 2007 a 2012 en función de tres categorías principales: redes de comunicación, computadoras personales y centros de datos. Las estimaciones muestran que el incremento anual de las tres categorías individualmente (10%, 5% y 4%, respectivamente) es mayor que el crecimiento general sobre el consumo eléctrico mundial en el mismo periodo que representa el 3%. La participación relativa en este subconjunto de productos y servicios de TIC en el consumo eléctrico total a nivel mundial ha aumentado del 3,9% en 2007 al 4,6% en 2012.

El ahorro en el consumo de energía y de agua representa uno de los desafíos más importantes para los gobiernos de todo el mundo. Los desarrollos residenciales en México ofrecen una buena manera para que la gente pobre pueda comprar una casa. Tolodano *et al.* [3] presentó un nuevo enfoque en el desarrollo residencial para alcanzar buenos ahorros en el consumo de energía y agua. La



herramienta es un sistema de control del consumo de energía y agua, cuya metodología consiste en mostrar las fechas de consumo al cliente para que pueda tomar conciencia sobre el consumo de energía y agua por día. El resultado obtenido es un ahorro de 13.43% en energía eléctrica, 10.18% relacionado con el ahorro de agua y 9.13% menos de consumo de gas.

Para llegar a una disminución del consumo de energía eléctrica es necesario implementar acciones correctivas, que actualmente son tomadas por los habitantes del edificio, por lo que, si las personas desconocen cuál es su consumo de energía eléctrica no pueden realizar ninguna acción. Webb *et al.* [4] mostró cómo el uso del sistema de consumo de energía en los hogares es benéfico y ayuda a reducir este tipo de energía. En su trabajo, hizo un estudio para conocer las creencias de las personas sobre el uso de la electricidad y los sistemas de control del consumo. Él monitoreó el consumo de energía eléctrica de 348 participantes. A través de subconjunto de 38 participantes que utilizó un sistema de monitoreo, demuestra cómo el uso de estos dispositivos reduce el consumo de energía.

El rápido desarrollo de la población mundial, la construcción y la aplicación de la tecnología en la actualidad han provocado un rápido incremento en el consumo de energía eléctrica. Por lo tanto, la gestión eficiente de los pronósticos de consumo de energía en los edificios es importante para tomar decisiones sobre el ahorro y el desarrollo de los sistemas de energía en algunos lugares. Ahmad *et al.* [5] comprobó que para pronosticar el consumo de energía eléctrica en edificios se pueden utilizar algunos métodos de inteligencia artificial como la máquina de vectores de soporte (SVM) y la red neuronal artificial (ANN). Ambos métodos son ampliamente empleados para pronosticar el consumo de energía. No obstante, existe un método híbrido que usa los dos antes mencionados y que puede obtener mejores resultados.

El pronóstico preciso sobre el consumo de energía eléctrica tiene una importancia primordial en el diseño energético en los países en desarrollo. Durante la última década se han empleado nuevas técnicas para planificar el consumo de energía y predecir con precisión las necesidades futuras en el área. Entre éstas, se encuentran la máquina de vectores de soporte y la máquina de vectores de soporte de mínimos cuadrados (LS-SVM) que se han adoptado para obtener pronósticos de energía eléctrica. Al respecto, Kaytez *et al.* [6] implementó el método LS-SVM para predecir el consumo de energía eléctrica en Turquía. Además de considerar el análisis de la regresión tradicional y las redes neuronales artificiales. Los resultados de la predicción, al compararlos entre ellos, indican que el modelo LS-SVM es un método rápido y preciso.

De la misma manera, otras alternativas han sido utilizadas para la predicción del consumo de energía eléctrica. Li *et al.* [7] empleó diferentes combinaciones para mejorar la predicción del consumo: optimización de enjambre de partículas y algoritmos genéticos aplicados para modificar los pesos en la red neuronal, y el análisis de componentes principales para saber cuáles entradas son las adecuadas. También, presentó que al usar un híbrido en conjunto con las redes neuronales se obtiene un mejor resultado. Asimismo, Kouhi *et al.* [8] utilizó un sistema híbrido partiendo del perceptrón multicapa y del método Levenberg-Marquardt y el diferencial evolutivo.

La regresión de vectores de soporte (SVR) se ha utilizado con éxito para resolver problemas de regresión no lineal y series temporales relacionadas con el pronóstico del consumo de energía en los edificios. Zhang *et al.* [9] desarrolló un modelo de predicción denominado diferencial evolucionado (DE) con modelos SVR. El algoritmo DE se empleó para determinar los pesos que le corresponden a cada modelo. El algoritmo se proporcionó con datos de consumo de energía de series temporales de un edificio institucional de Singapur.

Las casas eléctricamente sostenibles o edificios de energía cero han sido propuestos en los últimos años como alternativa para reducir la contaminación generada por la energía eléctrica. Existen diferentes propuestas, pero nos enfocaremos en el caso particular que involucra sólo el sistema de energía eléctrica, el cual está compuesto por un sistema de generación (paneles solares), un sistema de almacenamiento (baterías) y un sistema de distribución.

La energía hoy en día es un tema muy popular, debido a que cada vez el avance tecnológico en cuestión de aprovechamiento de la energía es mayor, sin embargo, existen métodos para el ahorro y conservación de la energía eléctrica donde el usuario es el que tiene que realizar una acción para obtener ese ahorro. En el presente artículo se desarrolla un sistema de aprovechamiento de la energía eléctrica, tomando en cuenta la generada y la consumida para así tener un mejor aprovechamiento. Asimismo, está enfocado en la etapa del monitoreo del consumo de energía eléctrica propuesto para su implementación en un sistema de predicción y control en una vivienda eléctricamente sostenible.

METODOLOGÍA

El sistema consiste en el monitoreo del consumo de energía eléctrica, el cual está instalado en cada toma de corriente eléctrica alrededor de la vivienda y será conectado a un sistema de predicción del consumo y se comparará con el sistema de cuantificación de la energía generada. Cuando la energía, que se consuma, sea mayor a la energía generada, el sistema desconectará los aparatos no necesarios para conservar la energía. En conjunto, este sistema aprovechará la energía y evitará que la vivienda se quede sin ella durante la noche.



Figura 1. Proceso general del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo toma los valores de corriente y voltaje por medio de la adquisición de las señales en un microcontrolador, al tenerlos calcula la potencia en el dispositivo y luego el consumo eléctrico. El cálculo del consumo se envía a la plataforma para que el usuario pueda disponer de esa información desde cualquier punto y en el momento que lo requiera, contando con una conexión a internet. En la plataforma se guardan los valores de voltaje, corriente y potencia RMS, así como el consumo eléctrico del dispositivo durante un tiempo determinado.

Al poseer en casa diferentes electrodomésticos o dispositivos que consumen energía de manera continua, intermitente y esporádica, el consumo de energía es variable y no se puede representar con una línea recta. También depende de diferentes factores, por ejemplo, las personas que están en la vivienda, clima, hora del día, día de la semana, entre otros. La predicción se realizará con esta información ya que es considerada importante.

El sistema de monitoreo está construido por una red de sensores que están instalados en cada tomacorriente e integrados por un sensor de corriente y uno de voltaje para obtener la potencia eléctrica y, por medio de las unidades de tiempo, el consumo eléctrico. Al sumar los consumos se obtiene la potencia utilizada por cada dispositivo y por la vivienda en total. Estas cifras pueden pronosticar el consumo eléctrico y así tomar decisiones para conectar y desconectar los dispositivos dependiendo la prioridad del dispositivo.

El dispositivo toma 20 muestras de corriente y voltaje en un período de la onda senoidal para así calcular la potencia que se conoce como potencia instantánea, obteniéndola con la magnitud de corriente y voltaje en un



instante determinado. Los sensores están conectados a un microcontrolador, el cual es el encargado de hacer el cálculo y mandar la información obtenida a una plataforma en la red cada 15 segundos. La información es almacenada en la red y tomada después para realizar la predicción. La plataforma Thingspeak es una plataforma que te permite almacenar información durante periodos de tiempo y es fácil de obtener con sistemas Mathworks.

La predicción se realizará por medio de una red neuronal en Matlab con los diferentes factores mencionados anteriormente, ya que este sistema permite realizar una predicción más apegada a la realidad y en consecuencia más fiel al modelo.

Medición de corriente

La corriente es obtenida por medio de un sensor de corriente ACS722, el cual está disponible en diferentes versiones (sólo cambia la corriente máxima medible por el sensor y el tipo de corriente, alterna o directa). El sensor entrega a su salida un voltaje propor-

cional a la corriente que fluye entre sus terminales principales, lo que genera a su salida una señal idéntica a la señal de corriente principal.

La corriente se calcula con la siguiente fórmula:

$$I = \frac{V_{\text{sensor}} - 1.65}{0.066} \quad (1)$$

Donde:

V=la corriente instantánea

V_{sensor} =el voltaje a la salida del sensor de corriente

Medición del voltaje

El voltaje es conseguido mediante un transformador de aislamiento con relación 1:1 conectado a un divisor de voltaje proporcional a la entrada de un seguidor de voltaje. La señal de voltaje obtenida es proporcional a la del voltaje de línea en el circuito de medición.

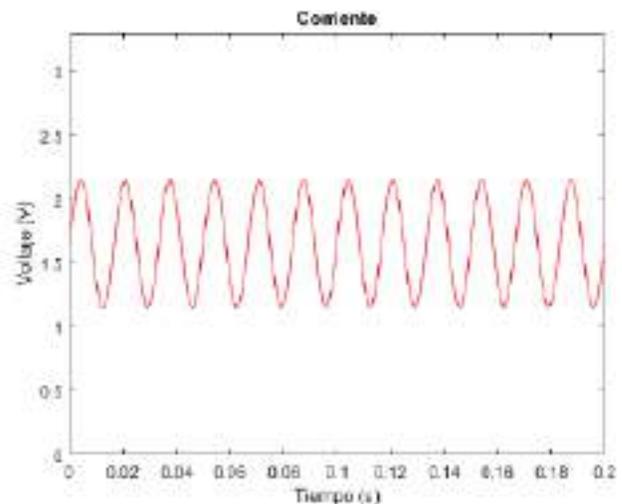
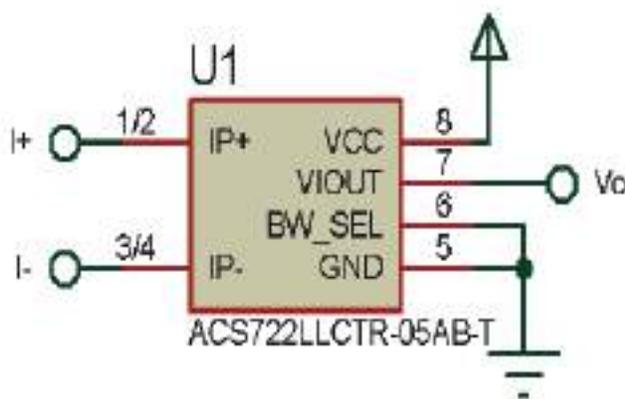


Figura 2. Circuito para la medición de corriente y señal de salida

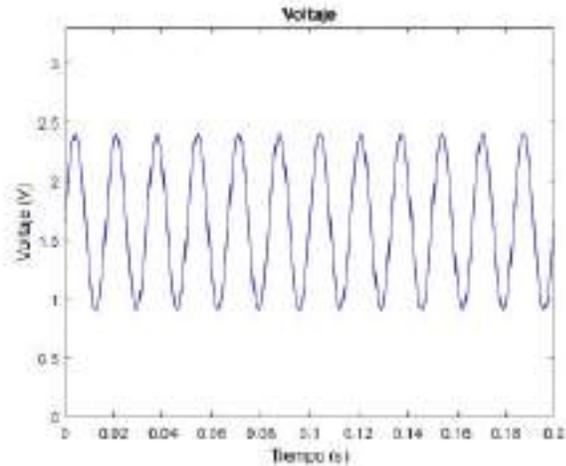
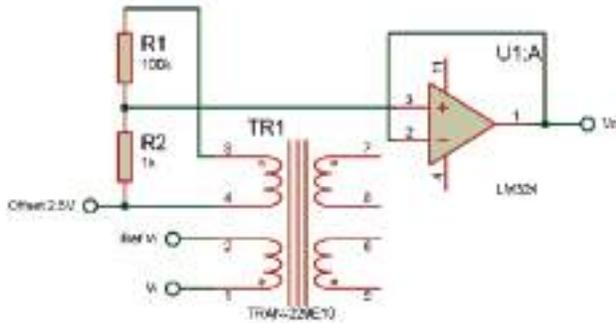


Figura 3. Circuito para la medición de voltaje y señal de salida.

El voltaje se calcula a través de la siguiente formula:

$$V = \frac{V_{\text{sensor}} - 1.65}{0.00943}$$

(2)

Donde:

V = el voltaje instantáneo

V_{sensor} = el voltaje a la salida del sensor de voltaje

Cálculo de la potencia

La potencia instantánea es obtenida por medio del cálculo del voltaje y la corriente instantánea que están presentes en el circuito. Esto se realiza para cada uno de los dispositivos conectados en el sistema de monitoreo. La fórmula para calcular la potencia es:

$$P = V * I \quad (3)$$

Donde:

P = la potencia instantánea

V = el voltaje instantáneo

I = la corriente instantánea

El consumo es calculado con la siguiente fórmula:

$$Q = \left(\frac{P}{1000} \right) * T \quad (4)$$

Donde:

Q = el consumo (kW/h)

P = la potencia

T = el tiempo de conexión de la carga

Para este caso el valor eficaz de la potencia se obtiene calculando el valor cuadrático medio

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i * I_i)^2}{n} \quad (5)$$

Donde:

P = el valor eficaz de la potencia en un ciclo de la onda senoidal

V = el voltaje instantáneo

I = la corriente instantánea

n = el número de muestras en un periodo de la onda senoidal

Tiempo de muestreo

El tiempo de muestreo para un sistema es importante. Por el teorema de Nyquist éste debe ser cuando menos dos veces el valor de la frecuencia de la onda a medir. Para el caso de México, la frecuencia de la señal de corriente eléctrica convencional es de 60Hz, por lo que la frecuencia de muestreo debe de ser cuando menos cada 8.33 m. El tiempo de muestreo propuesto es de 0.5 m para ob-



tener una señal continua y sin saltos abruptos, también ayuda a no medir ruido contenido en la señal proveniente del sensor de corriente y al sensor de voltaje.

Cruce por cero

El cruce por cero es utilizado para tomar un número determinado de valores durante el periodo de la señal de voltaje obtenida directamente de la red. La señal de cruce por cero es conseguida por medio de la señal de voltaje en la entrada y comparada con un voltaje fijo que es la referencia. Un amplificador operacional es el encargado de realizar esta tarea y, como la señal de entrada es una señal senoidal con un periodo determinado, la señal de salida es una señal cuadrada con el mismo periodo que la señal de voltaje de línea.

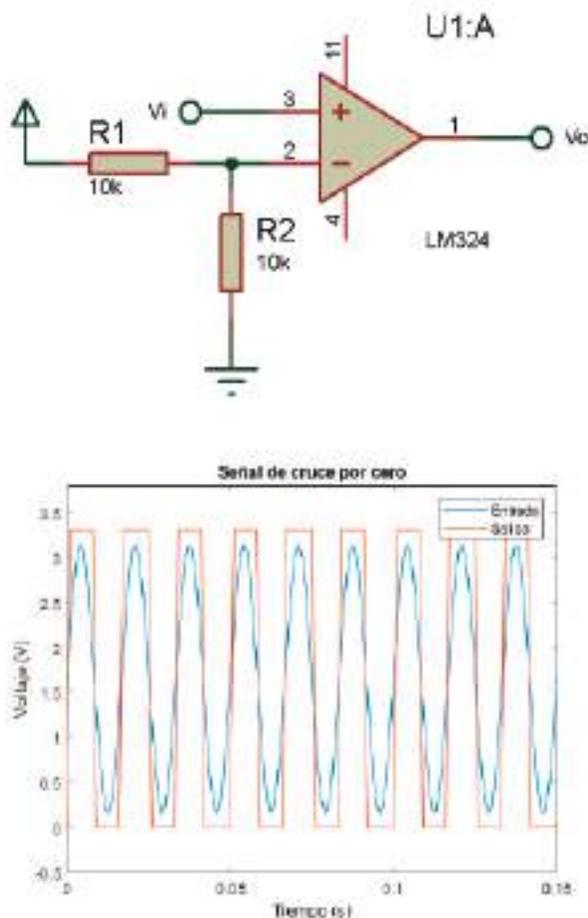


Figura 4. Cruce por cero. Comparador y señal resultante.

Programa del microcontrolador

El programa del microcontrolador está basado en la función de los microcontroladores de Gama alta de Microchip llamada Real Time Operative System (RTOS), el cual ayuda a optimizar el tiempo utilizado por el microcontrolador para llevar a cabo todas las funciones necesarias en el proceso de medición, transmisión de datos y activación/desactivación de energía en los contactos.

Almacenamiento y presentación de datos

Después de la adquisición de datos, éstos son almacenados en una plataforma virtual llamada Thingspeak que es muy versátil y tiene algunas herramientas para el tratamiento de datos. Los datos son mandados a la nube con un radio WiFi conectado al microcontrolador vía UART y enlazado a una red inalámbrica con conexión a internet. Para enviar los datos se especifica el canal y las claves necesarias para actualizarlos en la plataforma.

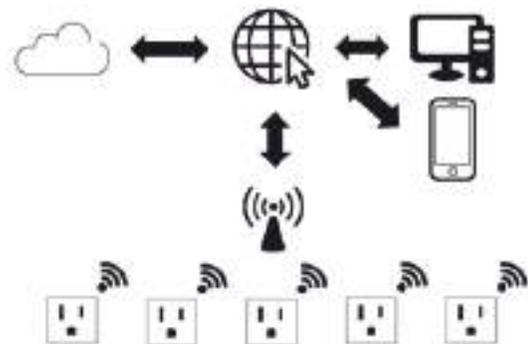


Figura 5. Intercambio de datos entre la plataforma, dispositivos y contactos.

Los diferentes datos son presentados en la plataforma Thingspeak, mediante gráficas de consumo instantáneo y consumo acumulado, para saber en qué momento se tiene más consumo y cuál es el consumo total acumulado en ese aparato en especial.

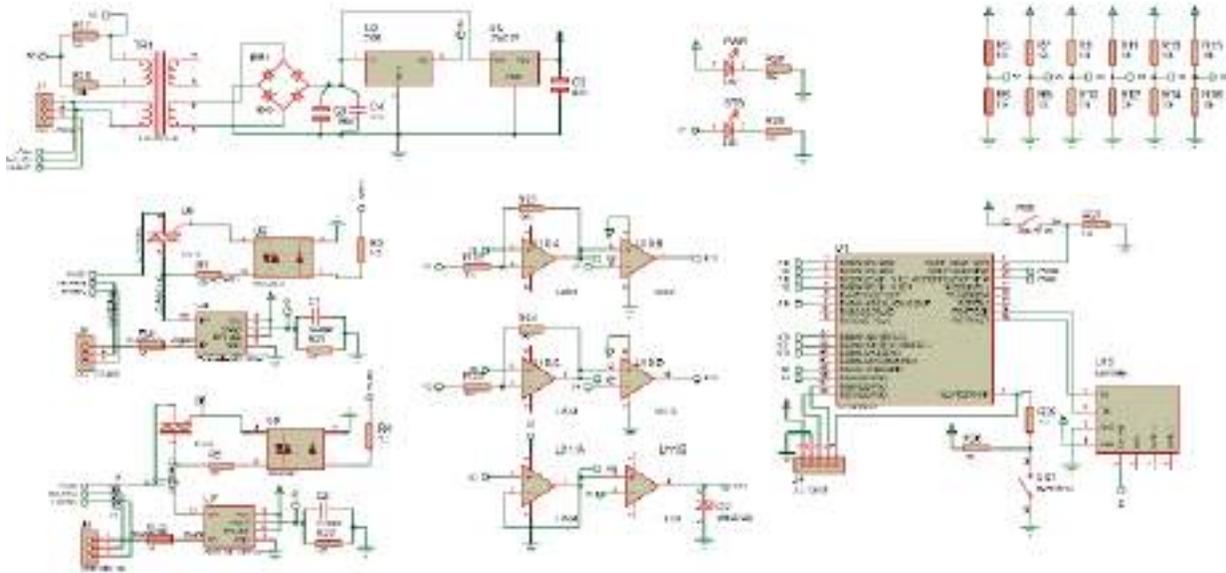


Figura 6. Diagrama electrónico.

El sistema es alimentado por la misma tensión de línea por medio de un transformador de voltaje que tiene dos salidas de 5 volts. Este voltaje es rectificado por medio de un puente rectificador y filtrado por un par de condensadores, cuenta con dos sensores de corriente y el sensor del voltaje de línea, todo esto alimentado a 3.3 volts y utilizando dispositivos XLP de muy bajo consumo para disminuir el consumo generado por el sistema de monitoreo, ya que el sistema también representa una carga energética para nuestro sistema de distribución. La etapa de acondicionamiento de las señales tiene algunos amplificadores operacionales en su configuración de seguidor de voltaje, amplificador no inversor y comparador, y cuenta con un radio transmisor receptor WiFi, el cual se utiliza cada determinado tiempo para enviar la información por medio de una red WiFi.

La tarjeta resultante tiene dos sensores de corriente y uno de voltaje de línea para realizar los cálculos de consumo y para conectar a ella hasta dos elementos o circuitos, dado que los contactos comúnmente instalados vienen en pares y es necesario tomar el consumo de cada uno de ellos, tomando en cuenta la potencia máxima que soporta el sensor de corriente. También cuenta con un microcontrolador 18F25K20 que se encarga de hacer el cálculo del consumo y enviar la información a la plataforma por medio del módulo WiFi ESP-01S. Se le han colocado un par de fusibles como protección de los sensores de corriente, así también contiene la electrónica de acondicionamiento de la señal proveniente de los sensores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se utilizaron diferentes electrodomésticos para ver el comportamiento en señal de corriente y voltaje como lo son: refrigerador, estufa, bombilla, televisión, cafetera, calefactor, plancha, laptop y monitor por mencionar algunos. Cada aparato tiene un consumo diferente y la señal de la onda es distinta dada la naturaleza del dispositivo.

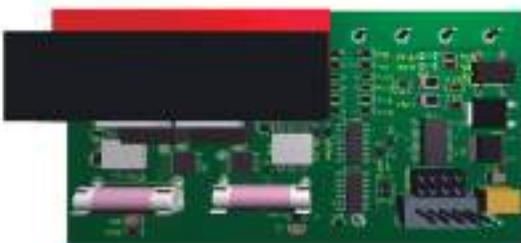


Figura 7. Prototipo resultante



Tabla 1. Comparación entre las mediciones de un multímetro comercial y el dispositivo de medición

	Medidos			Dispositivo		
	Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
Refrigerador	120.3	1.56	121	120.1	1.53	124
Estufa	121.5	0.33	41.1	121.2	0.31	40.5
Televisión	121.6	0.42	31.2	121.2	0.41	31
Calefactor	121.6	12.58	1531	121.2	12.5	1527
Monitor	130	0.39	31.3	128.9	0.37	31.1
Laptop	130.3	0.34	23.6	129	0.32	23.5
Frigobar	129	1.3	167.7	128.7	1.29	165
Plancha	128	9.3	1190	128.7	9.27	1194

La Tabla 1 presenta los resultados del sistema teniendo en cuenta mediciones que se realizaron a diferentes electrodomésticos y aparatos electrónicos conectados al dispositivo de medición. Se observa que los valores varían para los diferentes electrodomésticos, pero el valor es muy cercano a lo que presenta un instrumento de medición comercial. La finalidad de este artículo no es presentar un sistema de medición con un error bajo, sino el desarrollo de un sistema inalámbrico que presente los datos de consumo de energía eléctrica de una casa solar.

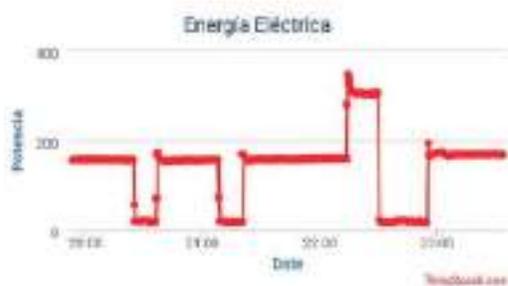


Figura 8. Gráfica de potencia de un refrigerador

La gráfica muestra el consumo de un refrigerador convencional en operación normal y se observan las variaciones de consumo respecto al tiempo, las cuales son causadas por el encendido y apagado del compresor y de los ventiladores que realizan el tiro forzado dentro del congelador y del compartimento principal. A pesar de que el consumo de este dispositivo es casi lineal dado que es un dispositivo que está en funcionamiento día y noche, presenta variaciones dependiendo del uso que le dé el usuario y sus hábitos personales. También tiene un comportamiento repetitivo durante la noche que es cuando se mantiene por más tiempo cerrado.

También tenemos la gráfica del comportamiento de la potencia de un refrigerador en estado que se ha mantenido cerrado durante un tiempo y tiene un comportamiento periódico. La Figura 9 exhibe la señal cuadrada casi periódica que se tiene como resultado del consumo de un refrigerador que se ha mantenido en un estado de reposo durante un tiempo. Lo anterior representaría un comportamiento normal si el usuario no abriera la puerta del

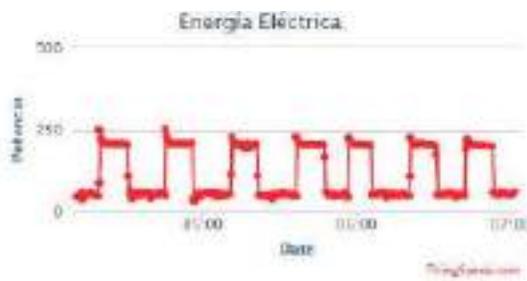


Figura 9. Gráfica de potencia de un refrigerador.

refrigerador, cuestión que es imposible ya que es un sistema diseñado para guardar alimentos y bebidas las cuales son requeridas a cualquier hora del día.

Tomando en cuenta las diferentes gráficas de comportamiento se tiene que en la mayoría de los casos el consumo está determinado por los hábitos del usuario. Por lo tanto, cuando se observa la diferencia del consumo en un aparato se puede concluir que el uso que se le da determinará su consumo eléctrico. Por los resultados, se puede cambiar el comportamiento o el patrón de uso del dispositivo al considerar que el consumo del dispositivo baja y que el sistema de monitoreo presenta información útil para tomar consciencia del consumo de energía.

CONCLUSIONES

Los sistemas de monitoreo del consumo de energía eléctrica son muy útiles desde los más básicos hasta los más completos, ya que los primeros sólo presentan el consumo general de la casa, sin embargo, el tener un sistema que muestre el consumo de cada uno de los aparatos ayuda a saber cuál es su comportamiento dependiendo del patrón de uso. También tiene como resultado el generar acciones que modifiquen ese patrón de uso y que el usuario sea consciente de lo que representa el aumento o disminución en el consumo, es decir, el cambio de un hábito.

También es importante mencionar que un sistema de este tipo se puede conectar a un sistema de predicción y control del consumo eléctrico. Al considerar el trabajo de Suryaderava et al. [10] se observa que se pueden controlar los dispositivos para así limitar el consumo. En este caso el sistema se implementará dentro de un sistema de predicción y control de consumo, dado que las casas eléctricamente aisladas presentan un problema con la dependencia de la carga en sus baterías. Al depender el sistema de la cantidad de energía generada y la cantidad de energía utilizada, es conveniente tener un monitoreo del consumo y generación de la energía. Como trabajo futuro se planea utilizar el sistema para proveer los datos a un sistema de predicción del consumo de energía eléctrica, por medio de redes neuronales y el principio de las máquinas de soporte de vectores. Estos métodos han sido utilizados para la predicción del consumo, así como algunos otros métodos híbridos teniendo como base las redes neuronales. También se podrá controlar el consumo por medio de la conexión y desconexión de cargas para así alcanzar el objetivo de tener una vivienda eléctricamente sustentable al contar con su sistema de generación y distribución conectado al sistema de monitoreo, predicción y control de consumo.

REFERENCIAS

- [1] M.-F., Ramos-Gutiérrez, "La generación de energía eléctrica en México," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, no. 4, pp. 197-211, 2012.
- [2] W. Van Heddeghem, S. Lambert, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet y P. Demeester, "Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012." *Computer Communications*, vol. 50, pp. 64-76, 2014.
- [3] M. Toledano-Ayala et al., "Water, gas and electric power monitoring system for residential developments: A technological approach,"



Building Services Engineering Research and Technology, vol. 32, pp. 183-197, 2011.

[4] T. L. Webb, Y. Benn, y B. P. I. Chang, "Antecedents and consequences of monitoring domestic electricity consumption," *Journal of Environmental Psychology*, vol. 40, pp. 228-238, 2014.

[5] A. S. Ahmad et al., "A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 102-109, 2014.

[6] F. Kaytez, M. C. Taplamacioglu, E. Cam y F. Hardalac, "Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 67, no. August, pp. 431-438, 2015.

[7] K. Li, C. Hu, G. Liu y W. Xue, "Building's electricity consumption prediction using optimized artificial neural networks and principal component analysis," *Energy and Buildings*, vol. 108, pp. 106-113, 2015.

[8] S. Kouhi, F. Keynia, y S. Najafi , "A new short-term load forecast method based on neuro-evolutionary algorithm and chaotic feature selection," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 62, pp. 862-867, 2014.

[9] F. Zhang, C. Deb, S. E. Lee, J. Yang, y K. W. Shah, "Time series forecasting for building energy consumption using weighted Support Vector Regression with differential evolution optimization technique," *Energy and Buildings*, vol. 126, pp. 94-103, 2016.

[10] N. K. Suryadevara, S. C. Mukhopadhyay, S. D. T. Kelly y S. P. S. Gill, "WSN-based smart sensors and actuator for power management in intelligent buildings," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 564-571, 2015.

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DE ÓXIDO DE BISMUTO PARA SU USO EN FOTOCATÁLISIS

Obtaining and characterization of thin films of bismuth oxide for use in photocatalysis

José Demetrio Quiroz Quiñones, Sandra Andrea Mayén Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
jdemetrioqq@gmail.com

RESUMEN

Las tecnologías avanzadas de oxidación han demostrado ser procedimientos útiles y factibles para la remediación de agua, suelos y aire. A este grupo pertenece la fotocatalisis, la cual es cada día más viable debido a los nuevos materiales que se investigan y que son susceptibles a ser activados por energía en el intervalo visible del espectro electromagnético. En el presente trabajo se obtuvieron películas delgadas de Bi_2O_3 por las técnicas sol-gel e inmersión-remoción. Se reporta que estas películas, de acuerdo con la literatura, tienen valores de ancho de banda prohibida (E_g) que logran aprovechar de manera más eficiente la energía del espectro visible (400-800 nm). Durante la síntesis del Bi_2O_3 se trabajaron dos surfactantes: Tritón y Tween. Una vez obtenida la solución de Bi_2O_3 y recubiertos los sustratos (vidrio portaobjetos), se procedió al tratamiento térmico. Para establecer la influencia de la temperatura de sinterizado en la cristalinidad del material se probaron temperaturas de 350, 400, 450, 500 y 550 °C. Las películas fueron caracterizadas por espectroscopias UV-Vis y Raman, y difracción de rayos X. Los experimentos de degradación de azul de metileno en solución acuosa, usando como fuente de irradiación una lámpara UV, mostraron que las películas de Tritón sinterizadas a 550 °C fueron las que degradaron un mayor porcentaje de la concentración inicial del colorante, específicamente un 60%.

Palabras clave: Bi_2O_3 , óxidos semiconductores, fotocatalisis solar, sol-gel, películas delgadas.

ABSTRACT

In the present work, thin films of Bi_2O_3 were obtained by sol-gel and dip-coating techniques. These films, according to the literature, are reported to have band gap values (E_g) that manage to take advantage more efficiently of the energy of the visible spectrum (400-800 nm).

During the synthesis of Bi_2O_3 two surfactants, Triton and Tween were worked. Once the Bi_2O_3 solution was obtained and the substrates were coated (glass slide), the thermal treatment was carried out. To establish the influence of the sintering temperature on the crystallinity of the material, temperatures of 350, 400, 450, 500 and 550 °C were tested. The films were characterized by UV-Vis and Raman spectroscopy and X-ray diffraction. The methylene blue degradation experiments in aqueous solution using a UV lamp as irradiation source, showed that the Triton films sintered at 550 °C were the ones that degraded a greater percentage of the initial concentration of the dye, precisely 60%.

Keywords: Bi_2O_3 , semiconductor oxides, solar photocatalysis, sol-gel, thin films.

INTRODUCCIÓN

Un óxido semiconductor muy empleado en procesos de oxidación avanzada es el TiO_2 , ya que ha sido identificado como un material fotocatalizador con varias ventajas como una alta actividad fotocatalítica y estabilidad fotoquímica [1]. Sin embargo, cuenta con un alto valor en su banda de energía prohibida ($E_g=3.2$ eV), por lo que el material es excitado con energía en intervalo ultravioleta ($\lambda < 400$ nm) [2], [3], [4], obteniéndose solamente un aprovechamiento de aproximadamente el 4% de la irradiación solar.

Muchas investigaciones se han centrado en el desarrollo de nuevos materiales semiconductores con propiedades fotocatalíticas que puedan ser activadas en el espectro visible de la luz ($\lambda > 400$ nm) [5] [6]. Entre algunos de los óxidos semiconductores estudiados, el Bi_2O_3 ha demostrado ser un buen material fotocatalizador, debido al potencial de sus propiedades ópticas y eléctricas, tales como un alto intervalo en el valor de su banda de energía prohibida (2.4-3.8 eV, dependiendo su fase cristalina), permitividad dieléctrica, alto índice de refractividad, así como fotoconductividad, fotoluminiscencia [7] y baja toxicidad [8], [9],



[10], [11]. La manipulación de las condiciones de síntesis permite el control racional del tamaño y la forma de las partículas y provee los medios para adaptar las propiedades de los materiales a una aplicación específica [12]. Por este motivo el óxido de bismuto es sintetizado de diversas formas según su aplicación: polvos, aeropartículas, nanopartículas, nanoestructuras o películas delgadas [13]. Dentro de las técnicas de síntesis más usadas se encuentran: co-precipitación, emulsión hidrotérmica y de coloides, mediante spray pirólisis o el sol-gel [10]. El sol-gel está comprendido dentro de los métodos de química suave para la obtención de materiales inorgánicos avanzados de alta tecnología que incluyen películas delgadas, fibras, partículas, etcétera, debido a que permite una manipulación a nivel molecular de las diversas etapas de una reacción sol-gel y es posible sintetizar materiales de alta pureza controlando las características de la microestructura. Además, ayuda a controlar las superficies y las interfaces del material durante las últimas etapas del proceso de producción. Por lo que ofrece una gran ventaja al producir estructuras homogéneas a escalas que van desde algunas decenas de nanómetros a micrómetros. Mientras que la profundidad de las alteraciones producidas varía entre unas pocas capas atómicas hasta decenas de nm [14], [15].

Un aspecto importante del Bi_2O_3 es que presenta 6 polimorfismos propios, de los cuales los más comunes son $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$, $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$, $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Bi}_2\text{O}_3$ y $\omega\text{-Bi}_2\text{O}_3$. Cada una de estas fases cristalinas tiene una estructura y propiedades características [16], [17], [18]. Las fases estables de este material son la fase α (monoclínica) y δ (cúbica centrada en las caras), mientras que las otras fases se presentan como metaestables y ocurren durante el enfriamiento de la fase δ , siendo la fase β (tetragonal) y γ (cúbica centrada en el cuerpo). Las dos fases restantes, ω (triclínica) y ϵ (ortorrómbica), ocurren bajo condiciones especiales. Dentro de estas fases, la β es la que presenta mejores propiedades fotocatalíticas [7].

En la fotocatalisis, el semiconductor absorbe los fotones provenientes de una fuente de luz, éstos tienen una energía mayor que la banda prohibida del semiconductor. Los electrones (e^-) fotoexcitados de la banda de valencia pasan a la banda de conducción generando un hueco (h^+). El par e^-h^+ viaja hacia la superficie del semiconductor dando lugar a reacciones de oxidación-reducción que promueven la descomposición de las moléculas orgánicas adsorbidas [23].

El presente trabajo tiene como objetivo probar como fotocatalizador al Bi_2O_3 en la degradación de azul de metileno (AM) en solución acuosa. Para ello se sintetizó Bi_2O_3 por la técnica de sol-gel, mientras que para el depósito de las películas delgadas se hizo con el método de inmersión-remoción. Se realizó un estudio de temperatura en el tratamiento térmico postdepósito de Bi_2O_3 . Finalmente, las películas fueron caracterizadas mediante espectroscopías UV-Vis y Raman, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.

METODOLOGÍA

Limpieza de los sustratos

Para obtener las películas se usaron sustratos de vidrio Corning. Primero los sustratos se lavan con jabón neutro y esponja, se enjuagan con agua corriente y agua destilada. Se acomodan en una caja coplin que se llena con mezcla crómica hasta cubrir por completo los sustratos, se dejan 24 horas en reposo. Al respecto, el uso de la mezcla crómica ayuda a la limpieza de impurezas en la superficie de los sustratos. Posteriormente se enjuagan con agua destilada y se acomodan en un vaso de precipitados. El vaso es llenado con una solución de ácido nítrico diluido hasta cubrir los portaobjetos, éste se coloca en una parrilla caliente y se ponen a hervir por un espacio de 3 horas. Dicho paso sirve para aumentar la porosidad del material y lograr una mejor adherencia de la solución en los sustratos.

Transcurrido este tiempo, se dejan enfriar y los portaobjetos son enjuagados con agua destilada.

Preparación de las soluciones precursoras y obtención de las películas delgadas

Las películas se obtuvieron mediante la técnica de inmersión-remoción y utilizando una modificación de la síntesis sol-gel propuesta por Weidong H. *et al* [10]. Los reactivos para la síntesis fueron nitrato de bismuto pentahidratado ($\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), solución de ácido nítrico (HNO_3 : Agua desionizada, 1:8), polietilenglicol ($\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_{200}\text{H}$), ácido cítrico (99.5% pureza), Tritón-X y Tween-100. Esta técnica conlleva los siguientes pasos:

- Disolver 4 g de $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en 20 mL de solución de HNO_3 . Adicionar a la solución anterior 1.6 mL de $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_{200}\text{H}$, 1.6 g de ácido cítrico y la cantidad correspondiente del surfactante en cuestión. Todo bajo agitación continua.
- La solución es mezclada durante 10 min hasta formar la solución sol-gel.
- Posteriormente se aplica 1, 2, 3, 4 o 5 recubrimientos a cada sustrato.
- Finalmente se realiza un tratamiento térmico a diferentes temperaturas de 300, 350, 400, 450, 500 y 550 °C durante una hora.

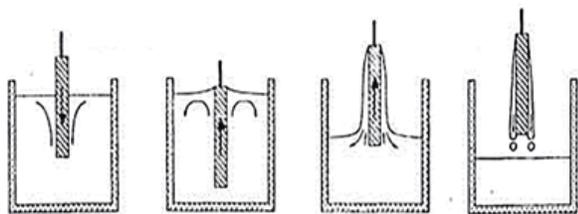


Figura 1. Esquema del proceso de inmersión-remoción.

Fuente: modificado de Nieto *et al.*, 1994.

Caracterización de las películas delgadas

Las películas fueron caracterizadas mediante técnicas ópticas: espectroscopía UV-Vis y espectroscopía Raman. La caracterización es-

tructural se realizó por medio de difracción de rayos X (XRD por sus siglas en inglés).

Para la caracterización óptica se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis marca Thermo Scientific, modelo Genesys 10S. Los parámetros se fijaron en modo Transmisión (%) con una longitud de onda de 190-1100 nm para la medición de películas delgadas. En el caso de las mediciones de soluciones de AM, se fijó en modo Absorbancia con una longitud de onda 400-800 nm. La difracción de rayos X se llevó a cabo con un equipo PAnalytical XpertPro con haz de incidencia rasante, las condiciones son lámpara de Cu (1.540598Å), ángulo 2θ de 20-100 grados, tamaño de paso de medición de 0.04, potencia 45 kA e intensidad de 20 mA. Los datos para la generación de las gráficas presentadas a continuación son tratados con el programa OriginPro 2018.

Experimentos de fotodegradación

Los sustratos con 5 recubrimientos se probaron en la fotodegradación de una solución acuosa de AM con una concentración inicial $2 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$. Se utilizó un fotorreactor tipo batch, equipado con una lámpara germicida G15T8. Las películas fueron cortadas en pedazos de aproximadamente 1.8 cm^2 . En una celda de cuarzo se adicionaron 3.5 mL de solución de AM, se colocó al centro de la celda con ayuda de un sujetador especial una muestra de película y este arreglo (celda-solución-muestra) se acomoda dentro del reactor a 4.5 cm de distancia perpendicular a la radiación. Todos los experimentos se dejaron por espacio de 4 horas. Una vez transcurrido este tiempo, se midió la absorbancia del AM remanente en la solución en un espectrofotómetro UV-Vis marca Thermo Scientific modelo Genesys 10S, con previa calibración y estándares externos que fueron preparados en el laboratorio.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Espectroscopia UV-Vis

En la Figura 2, se presentan los espectros de transmisión para las películas con 5 recubrimientos, con diferentes temperaturas de tratamiento postdepósito; solamente los resultados para películas con cinco recubrimientos, ya que fueron las películas que mostraron un mejor desempeño en las pruebas de fotodegradación, además el grosor de estas películas permite una mejor medición en la espectroscopia UV-Vis y Raman. La transmisión promedio para las películas de Bi_2O_3 con Tritón (Figura 1a) disminuye desde un 90% hasta un 65%, conforme se incrementa la temperatura del tratamiento postdepósito. Lo anterior se atribuye a que estas películas presentan opacidad a mayor temperatura. Para las películas de Bi_2O_3 con Tween (Figura 1b), la transmisión promedio también disminuye desde 85% a 55% con el incremento de la temperatura del tratamiento postdepósito. Al igual que las de Tritón, también presentaron opacidad a mayor temperatura.

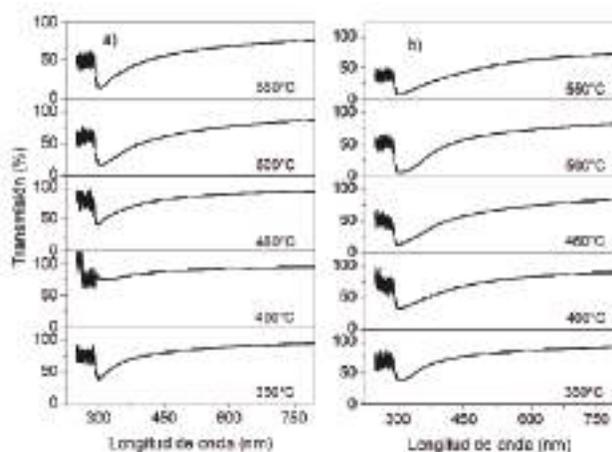


Figura 2. Transmisión óptica de películas de Bi_2O_3 en función de las temperaturas de sinterizado: a) Tritón y b) Tween.

En ambos casos se observa que el borde de absorción de las películas se da en la región ultravioleta. Mediante el modelo de bandas parabólicas de Tauc y de acuerdo con lo re-

portado en literatura, se determinó al ancho de banda prohibida directo. Los valores se muestran en la Tabla 1. Las películas obtenidas con Tween presentaron valores de ancho de banda prohibida más grandes y, como veremos en los resultados de fotocatalisis, exhibieron un desempeño catalítico muy pobre.

Tabla 1. Valores de ancho de banda de las películas a diferentes temperaturas de sinterizado.

Temperatura de sinterizado (°C)	Tritón	Tween
	E_g (eV)	
350	3.26	3.43
400	3.11	3.26
450	3.24	3.49
500	3.24	3.48
550	3.16	3.50

Análisis de resultados XRD de las películas delgadas

La Figura 3 muestra los difractogramas de las películas de Bi_2O_3 con tratamiento térmico postdepósito a 400, 450, 500 y 550 °C. Estos resultados corresponden solamente a películas que tienen Tritón como surfactante. En cuanto a ello, se puede observar que las películas sinterizadas por debajo de los 500 °C tienden a ser amorfas. A 500 °C el material presenta cierta cristalinidad y a 550 °C se define mejor. Para este difractograma se encontró una combinación de fases α : (022), (021), (112) y β : (221), (402). El tamaño de cristal obtenido por medio de Scherrer es de 25 nm.

La Figura 4 muestra también difractogramas de las películas de Bi_2O_3 a 400, 450, 500 y 550 °C, los cuales corresponden a películas con Tween como surfactante. A 450 y 500 °C el material presenta una estructura que tiende a ser amorfa, mientras que a temperaturas de 400 °C y 550 °C se presenta cierta cristalinidad, definiéndose mejor a 450 °C. Para este difractograma se encontró una combinación de fases α : (021) y β : (221) y (402), específicamente a temperatura de sinterizado

de 400 °C. El tamaño de cristal obtenido por medio de Scherrer es de 12 nm.

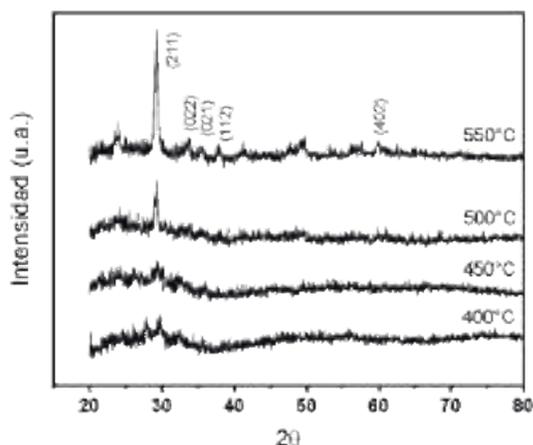


Figura 3. Patrones de difracción de rayos X de películas obtenidas con Tritón a diferentes temperaturas de sinterizado.

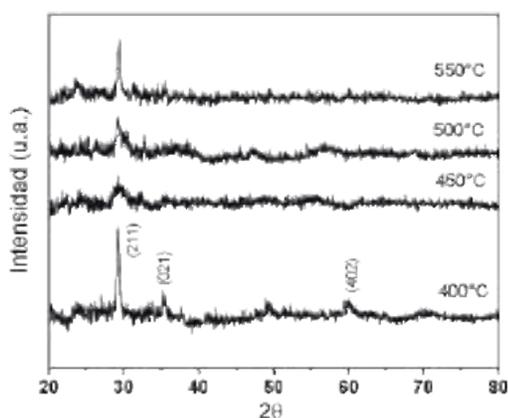
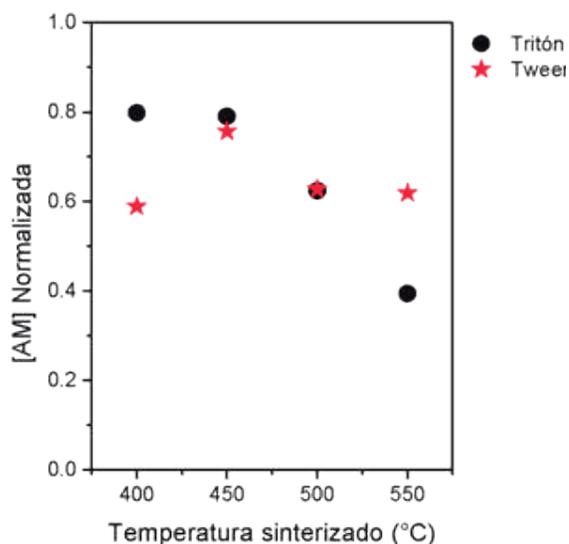


Figura 4. Patrones de difracción de rayos X de películas obtenidas con Tween a diferentes temperaturas de sinterizado.

Fotodegradación del azul de metileno

La degradación del AM con las películas de Bi_2O_3 como fotocatalizador, en función de la temperatura de sinterizado, es mostrada en la Figura 5. De manera general se observa que conforme aumenta la temperatura se incrementa la actividad fotocatalítica, lo que se atribuye a que las películas sinterizadas a 500 y 550 °C presentaron una mayor cristalinidad.

En particular, la película obtenida con Tritón y sinterizada a 550 °C es la que más degrada el colorante. Para 4 horas disminuye un 60% la concentración inicial.



CONCLUSIONES

El borde de absorción de las películas está en la región ultravioleta, obteniéndose un ancho de banda promedio de 3.3eV. Las películas obtenidas con Tritón como surfactante, con cinco recubrimientos y a 550°C de temperatura tratamiento postdepósito, presentaron una combinación de fases α y β , siendo esta última fase la más activa fotocatalíticamente, de acuerdo con lo consultado en literatura [7], [21]. Esta película mostró el mejor desempeño fotocatalítico; obteniéndose una degradación de 60% de la concentración inicial del azul de metileno.

El trabajo futuro de este proyecto encamina a realizar mejoras en la síntesis de la solución precursora de Bi_2O_3 . Al mejorar esta síntesis, se espera que, con los tratamientos térmicos a 550°C, se obtengan materiales más cristalinos y con un mayor porcentaje de fase β , o bien, solamente esta fase. Esto también conlleva un aumento de la absorción del material en el intervalo visible del espectro electromagnético (400-700 nm) y, por ende, una disminución en su ancho de banda (E_g),



obteniéndose mayores porcentajes de fotodegradación, no sólo en presencia de luz ultravioleta, sino también, en presencia de luz solar. Por otra parte, las caracterizaciones estructurales en espectroscopía Raman y morfológicas en Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) serán realizadas para confirmar la presencia de la fase β y obtener el tipo de crecimiento del material.

REFERENCIAS

- [1] C. Liao, Z. Ma, X. Chen, X. He and J. Qiu, "Controlled synthesis of bismuth oxyiodide toward optimization of photocatalytic performance," *Applied Surface Science*, vol. 387, pp. 1247-1256, 2016.
- [2] X. Meng and Z. Zhang, "Bismuth-based photocatalytic semiconductors: Introduction, challenges and possible approaches," *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, vol. 423, pp. 533-549, 2016.
- [3] D. S. Shtarev, A. V. Shtareva, A. V. Syuy and M. V. Pereginiak, "Synthesis and photocatalytic properties of alkaline earth metals bismuthates-bismuth oxide compositions," *Optik (Stuttgart)*, vol. 127, no. 3, pp. 1414-1420, 2016.
- [4] A. Fujishima and K. Honda, "Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode," *Nature*, vol. 238, no. 5358, pp. 37-38, 1972.
- [5] W. Raza, M. M. Haque, M. Muneer, T. Harada and M. Matsumura, "Synthesis, characterization and photocatalytic performance of visible light induced bismuth oxide nanoparticle," *Journal of Alloys Compounds*, vol. 648, pp. 641-650, 2015.
- [6] L. J. R. Forero, "Fuentes de energía, renovables y no renovables. Aplicaciones.," *Revista Escuela de Administración de Negocios*, no. 77, pp. 216-218, 2014.
- [7] D. M. Otálora B., J. J. Olaya Flórez and A. Dussan, "Microestructura y propiedades eléctricas de bismuto y óxido de bismuto depositados por magnetron sputtering UBM," *Revista Mexicana de Física*, vol. 61, no. 2, pp. 105-111.
- [8] C. M. Bedoya Hincapie, M. J. Pinzón Cárdenas, J. E. Alfonso Orjuela and E. Restrepo Parra, "Physical-chemical properties of bismuth and bismuth oxides: synthesis, characterization and applications," *DYNA*, vol. 79, no. 176 (2012), pp. 139-148.
- [9] Q. Qiao, Y. W. Li, J. Z. Zhang, Z. G. Hu and J. H. Chu, "Experimental investigations of the bismuth oxide film grown by atomic layer deposition using triphenyl bismuth," *Thin Solid Films*, vol. 622, pp. 65-70, 2017.
- [10] H. Weidong, Q. Wei, W. Xiaohong, D. Xianbo, C. Long and J. Zhaohua, "The photocatalytic properties of bismuth oxide films prepared through the sol-gel method," *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 13, pp. 5362-5365, 2007.
- [11] A. Iljinas, S. Burinskas and J. Dudonis, "Synthesis of bismuth oxide thin films deposited by reactive magnetron sputtering," *Acta Physica Polonica A*, vol. 120, no. 1, pp. 60-62, 2011.
- [12] R. Zanella, "Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño," *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, vol. 5, no. 1, pp. 69-81, 2012.
- [13] S. Iyyapushpam, S. T. Nishanthi and D. Pathinettam Padiyan, "Synthesis of room temperature bismuth oxide and its photocatalytic activity," *Materials Letters*, vol. 86, pp. 25-27, 2012.
- [14] E. P. Durán, C. Moure and J. F. Fernández, "Películas delgadas fabricación y aplicaciones," *Boletín la Sociedad Española Cerámica y Vidrio*, vol. 33, no. 5, pp. 245-258, 1994.
- [15] M. P. Gutiérrez and M. A. Castellanos, "Síntesis por el método sol-gel aplicado al estudio del polimorfismo en nanopartículas de TiO_2 ," *Mundo Nano*, vol. 4, no. 1, pp. 67-73, 2011.
- [16] L. Leontie, M. Caraman, M. Alexe and C. Harnagea, "Structural and optical characteristics of bismuth oxide thin films," *Surface Science*, vol. 507-510, pp. 480-485, 2002.
- [17] P. Shuk, "Oxide ion conducting solid electrolytes based on Bi_2O_3 ," *Solid State Ionics*, vol. 89, no. 3-4, pp. 179-196, 1996.

[18] V. G. Orlov, a. a. Bush, S. a. Ivanov and V. V. Zhurov, "Anomalies in the physical properties of the α form of bismuth oxide," *Physics of Solid State*, vol. 39, no. 5, pp. 770-774, 1997.

[19] C. L. Gomez *et al.*, "Opto-electronic properties of bismuth oxide films presenting different crystallographic phases," *Thin Solid Films*, vol. 578, pp. 103-112, 2015.

[20] D. Sánchez-Martínez, I. Juárez-Ramírez, L. M. Torres-Martínez and I. De León-Abarte, "Photocatalytic properties of Bi_2O_3 powders obtained by an ultrasound-assisted precipitation method," *Ceramics International*, vol. 42, no. 1, pp. 2013-2020, 2016.

[21] W. Xiaohong, Q. Wei and H. Weidong, "Thin bismuth oxide films prepared through the sol-gel method as photocatalyst," *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, vol. 261, no. 2, pp. 167-171, 2007.

[22] W. Raza, D. Bahnemann and M. Muneer, "A green approach for degradation of organic pollutants using rare earth metal doped bismuth oxide," *Catalysis Today*, vol. 300, no. April 2017, pp. 89-98, 2018.

[23] J. Hou, C. Yang, Z. Wang, W. Zhou, S. Jiao and H. Zhu, "In situ synthesis of α - β phase heterojunction on Bi_2O_3 nanowires with exceptional visible-light photocatalytic performance," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 142-143, pp. 504-511, 2013.

VALUACIÓN AMBIENTAL DEL CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO: CERRO DE PATAMBAN, TANGANCÍCUARO, MICHOACÁN

Environmental valuation of land cover change:
Cerro de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán

Ángel Martín Loza Vargas, Nezahualcóyotl Flores Lazo,
Víctor Manuel Hernández Madrigal, Verónica Leyva Picazo

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
vargas.aml@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito realizar la valuación ambiental del cambio de uso de suelo en el Cerro de Patamban, Michoacán, a través de valorar la disminución de servicios ecosistémicos, debido al cambio de cobertura del suelo. En el procedimiento se utilizó un sistema de información geográfica donde se identificaron las áreas con cambio de cobertura para 1973 y 2017, así como las formaciones vegetales modificadas. Posteriormente, con base en la literatura y sin pretender ser exhaustivos, se identificaron los servicios ecosistémicos a valorar: captura de carbono, control de erosión y captación de agua. Se establecieron con base en niveles de conservación, costos por hectárea de cada servicio y formación vegetal para relacionarlos al aumento o disminución en superficie y obtener diferencias monetarias. Se consideró el monto de ingreso potencial y costo de rehabilitación del ecosistema para finalmente determinar el importe implicado al cambio de uso del suelo. Como resultado se encontró el valor general de 97.671 millones de pesos, que está compuesto principalmente por los conceptos de captura de carbono y rehabilitación del ecosistema, aportando más de 47 millones de pesos cada uno y seguido por la captación de agua con 2.3 millones, mientras que control de erosión y pérdida de ingresos representaron menos de 0.5 millones de pesos cada uno. Con lo mencionado se concluye que es posible cuantificar en términos económicos el impacto ambiental del cambio de uso del suelo como referencia de valor para fomentar sistemas sustentables de manejo de los recursos naturales.

Palabras clave: cambio de uso del suelo, captación de agua, captura de carbono, control de erosión, servicios ecosistémicos, valoración económica.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to perform the environmental valuation of land use change in Cerro de Patamban, Michoacán, by valuing the decrease in ecosystem services due to the change in land cover. It was started by determining the areas that presented a difference in the class of coverage using available cartographic information on land use for 1973 and 2017, after which the plant formations modified on the surface at the end of the period were identified, then based on literature and under no pretention of exhaustion, the ecosystem services to be valued were identified: carbon capture, erosion control and water catchment. Costs per hectare of each mentioned service and plant formation were established to relate them to the increase or decrease of area and obtain the monetary difference, the potential amount of income and cost of the ecosystem rehabilitation were considered to finally determine the monetary amount involved in the land use change. The general value of 97.671 million pesos was found, composed mainly of the concepts of carbon capture and ecosystem rehabilitation, each contributing more than 47 million pesos, followed by water catchment with 2.3 million, while erosion control and loss of income represented less than 0.5 million pesos each. With the aforementioned, it is concluded that it is possible to quantify the environmental impact by the land use change in economic terms as a reference value to promote sustainable systems of natural resources management.

Keywords: carbon capture, economic valuation, ecosystem services, erosion control, land use change, water catchment.

INTRODUCCIÓN

Entre los diversos antecedentes acerca del cambio de cobertura del suelo, se encuentra un informe de la serie de Políticas Pecuarías



de la Dirección de Producción y Sanidad Animal del Fondo Mundial para la Agricultura y la Alimentación (FAO) que menciona que en América Latina se ha deforestado una superficie boscosa equivalente al territorio de la India, teniendo como causa principal la expansión de los pastizales para la producción ganadera, lo cual genera daños ambientales, a veces difíciles de calcular, así como la liberación de miles de millones de toneladas de bióxido de carbono a la atmósfera lo que afecta a nivel global (FAO, 2007). También la expansión de la frontera agrícola es una amenaza creciente a la biodiversidad como lo ha investigado la Dirección Nacional de Ordenamiento Ambiental y Conservación de la Biodiversidad en Argentina (2008).

Por otro lado, [21] explica que las tierras agrícolas altamente productivas y bien ubicadas tienden a desaparecer, en la medida en que el mercado urbano ofrece mejores ganancias. Lo anterior representa una opción viable para los propietarios en corto plazo, ya que la pobreza es el factor más profundo que promueve deforestación y degradación ambiental mediante el cambio de uso de suelo.

Así pues, la expansión de la agricultura, la ganadería y la zona urbana a lo largo del tiempo causan impacto en los ecosistemas mientras que los humanos obtienen beneficios de estos [2]. En cuanto a ello, los estudios de cambio de uso de suelo en escala local son escasos y no existe un sistema de monitoreo de dicho cambio, de sus causas y de su predicción [11], ni la valoración económica de los impactos. En el caso de Patamban se ha iniciado un proceso de cambio de uso de suelo en terrenos forestales, sin embargo, al sucumbir la capacidad productiva de éstos terminarán en su abandono [11].

Con los antecedentes de la problemática, también se puede notar que la importancia de los servicios ecosistémicos solamente se enlista, se categoriza o se describe, por lo que a partir de la adecuada valoración económica de los costos ambientales puede lograrse un uso eficiente de los ecosistemas

[19], ya que al considerar el valor de los servicios ecosistémicos en la toma de decisiones [17] se pueden generar políticas eficaces y bien dirigidas para desacelerar la deforestación y promover sistemas sostenibles de aprovechamiento de los recursos naturales.

Debido a que en la zona de estudio no se han realizado indagaciones sobre el tema, el presente estudio tiene el propósito de estimar el valor de los servicios ecosistémicos en el cerro de Patamban para conocer el costo implicado en la expansión de la actividad agrícola donde originalmente el suelo sostenía un ecosistema de bosque templado. Con la finalidad de que el proceso de toma de decisiones acerca del adecuado uso de suelo, desde la perspectiva sustentable, sea con una visión incluyente de costo-beneficio [15].

La presente investigación se planteó bajo la hipótesis de que la degradación ambiental puede cuantificarse económicamente con el objetivo de estimar el valor económico del impacto a los servicios ecosistémicos, generado por el cambio de uso del suelo en el Cerro de Patamban, Tangancícuaro de Arista, Michoacán de Ocampo. Cabe destacar que en este estudio se utiliza el concepto de impacto ambiental sin menoscabo del término de la teoría económica donde se denomina externalidad. Es importante mencionar a manera de alcances, que se trabajó con los importes que representan los servicios ambientales mas no con las cantidades de masa o volumen en que éstos se generan y que se abordan únicamente impactos primarios (no los culturales) y circunscritos al área de estudio (no regionales o globales). Además, este método se enfoca en las diferencias en cantidad de superficie que presenta cada tipo de cobertura en el periodo dado, mas no analiza los posibles cambios en su ubicación geográfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El primer requerimiento de la investigación fue la delimitación del área de estudio mediante el criterio geomorfológico, considerando adicionalmente la división política mu-

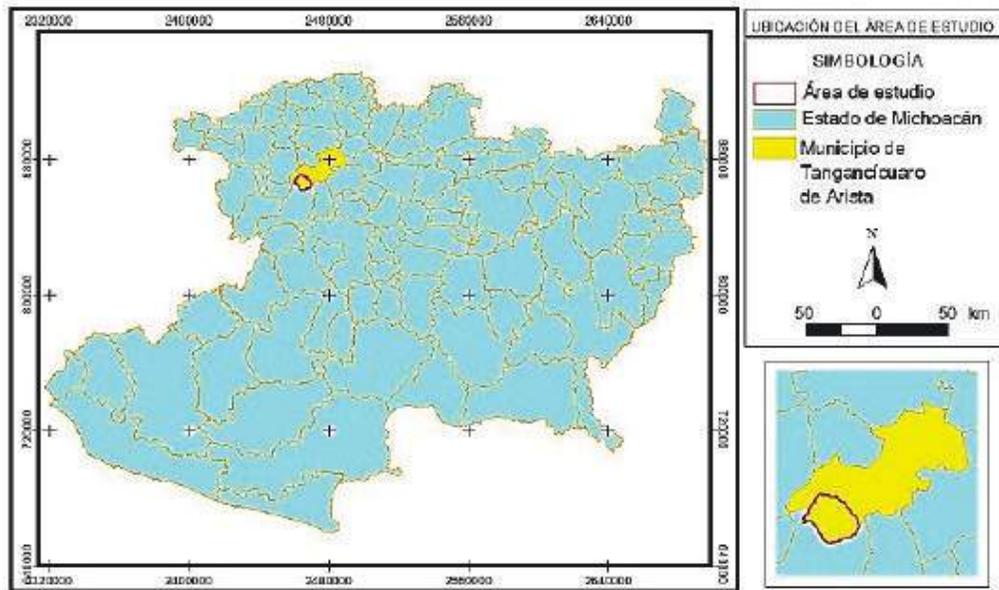


Figura 1. Ubicación del área de estudio Cerro de Patamban.
Fuente: elaboración propia a partir de [12]

nicipal de Tangancicuaro de Arista que abarca el Cerro de Patamban (Patamban), ubicado al sur de dicho municipio y perteneciente al estado de Michoacán de Ocampo como se muestra en la Figura 1. La zona representa un área de 5,897.70 ha y está caracterizada por un ecosistema de bosque templado y agricultura de temporal [13]. La localidad de Patamban constituye el principal asentamiento humano de la zona con 3,602 habitantes, dedicados principalmente a la agricultura de temporal y alfarería [11], con un crecimiento nulo de la población en los últimos 30 años.

Análisis del cambio de uso del suelo

Para abordar el trabajo se realizó un análisis cartográfico del cambio de uso del suelo que muestra la superficie que presentó modificación en el tipo de cobertura del suelo. Para ello se eligió el periodo de estudio teniendo en cuenta la información disponible, así que se tomó como fecha inicial el año 1973 y como fecha final el año 2017, y se copiaron las cartas digitales tipo vector de uso de suelo y vegetación escala 1:50 000 de la zona de trabajo. La primera carta fue tomada

de la Tesis doctoral de Flores, titulada *Valoración de bienes y servicios ecosistémicos, como indicador del ordenamiento ecológico del territorio en la cuenca del Río Duero, Michoacán* y mostrada en la Figura 2, mientras que la segunda, del Inventario Forestal Nacional (IFN) de la Comisión Nacional Forestal (2014) y United States Geological Survey (2017), representada en la Figura 3. A ambas cartas se les homogeneizó la base de datos para posteriormente realizar un cruce cartográfico, utilizando el programa ArcMap 10.3 para obtener las áreas que mostraron cambio de tipo de cobertura en dicho periodo como se aprecia en la Figura 4, al tiempo que se generó una nueva tabla de atributos (véase Tabla 14) mediante el *software*.

A partir de la Carta de cambios en el uso de suelo y vegetación (Figura 4) se recalculó la superficie de cada división en el mapa y se identificó la ruta que siguió cada cambio, creando así una matriz con los tipos de cobertura en cada fecha e incluyendo las superficies en hectáreas presentes al final del periodo como se asienta en el Tabla 14 del apartado de Resultados.

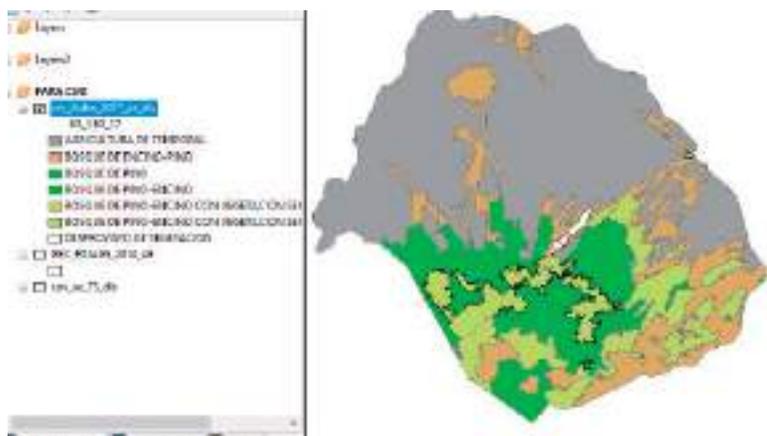


Figura 2. Vegetación y uso de suelo del área de estudio Cerro de Patamban en 1973.
Fuente: Elaborado a partir de Flores (Tesis doctoral en proceso).



Figura 3. Carta de uso de suelo y vegetación del área de estudio Cerro de Patamban en 2017.
Fuente: Elaboración propia a partir de CONAFOR (2014) y USGS (2017).

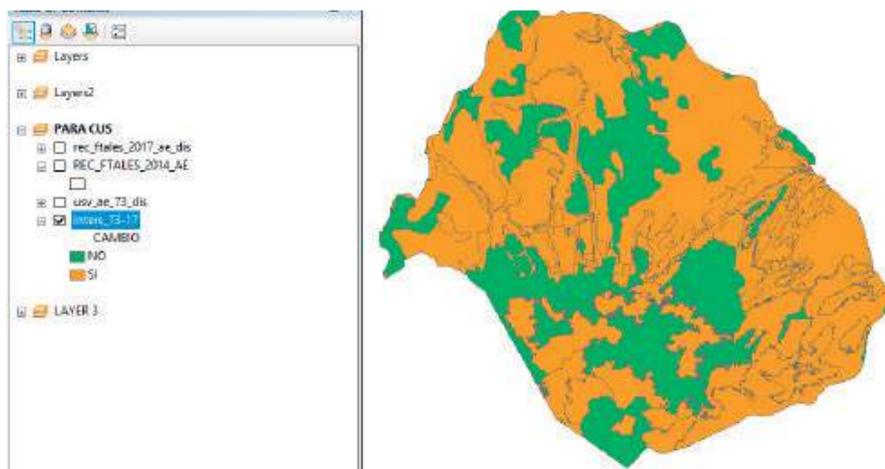


Figura 4. Carta de cambios en el uso de suelo y vegetación del área de estudio Cerro de Patamban en el periodo 1973-2017.
Fuente: Elaboración propia a partir de Flores (Tesis doctoral en proceso), CONAFOR (2014) y USGS (2017).

Valuación

Cotler *et al.* [6] menciona que los ejercicios tendientes a valorar los ecosistemas y los servicios ambientales aún son incipientes, puntuales y muchas veces insuficientes e incompletos, por lo que la perspectiva de valorar económicamente los servicios que otorgan los ecosistemas puede convertirse en una tarea titánica, e incompleta. Por ello, generalmente la valoración de un ecosistema o un componente de éste suele expresarse considerando uno o algunos de sus beneficios. Costanza *et al.* [5] muestran la importancia de clasificar el capital natural conforme a cada bioma existente y relacionar a éstos los principales servicios que proveen. De tal modo que en el presente trabajo se hizo uso de información de diversas investigaciones publicadas y no fue el objetivo realizar nuevos muestreos en campo. Así mismo durante la búsqueda de datos que sirvieran de base

para realizar la valuación del impacto a los servicios ecosistémicos por cambio de uso del suelo, se encontró en la literatura información de útil aplicación y relacionable a los diferentes tipos de cobertura del suelo para valorar los servicios ecosistémicos de Captura de carbono, Control de erosión y el servicio de Captación de agua mediante el procedimiento descrito a continuación:

Captura de carbono

Se construyó un cuadro con base en valores por hectárea de pérdida de inventario de CO₂, debidas al cambio de uso del suelo en algunos tipos de cobertura, y datos estimados a partir de Center for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE) (1993) para diferentes niveles de conservación del ecosistema propuestos y mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores por hectárea de pérdida de inventario de CO₂ debido al cambio de uso del suelo (USD\$/ha) y de acuerdo con el nivel de conservación (NC) propuesto.

Tipo de bosque	NC 3	NC 2	NC 1	Diferencias en pérdida de valor
	*Sin Vegetación	Pastizal	Cultivos	
Templado caducifolio	743	693	643	50
Tropical caducifolio	1911	1887	1863	24
Templado conífero	3462	3436	3410	26
Tropical siempre verde	3929	3633	3337	296
Templado mixto	2102.5	2064.5	2026.5	38

*Datos inferidos y basados en los promedios de las diferencias en valores, considerando las coberturas en la zona. Debido a que el valor tiende a ser alto, se propuso utilizar niveles de estado de conservación y usar el rango de diferencia de valor entre cada nivel como dato conservador.
Los valores se presentan en dólares estadounidenses del año 1993.
NC 1. Nivel de conservación alto; NC 2. Nivel de conservación medio; NC3. Nivel de conservación bajo
Fuente: elaboración propia a partir de CSERGE (1993).



Tabla 2. Valores de pérdida de inventario CO₂/ha y superficie de cambio de acuerdo con el destino-procedencia de cada formación vegetal.

Fuente: Elaboración propia y CSERGE (1993).

	Cultivos		Bosques de coníferas		Bosques coníferas-latifoliadas		Área sin vegetación aparente	
	Superficie (ha)	Valor (USD/ha)	Superficie (ha)	Valor (USD/ha)	Superficie (ha)	Valor (USD/ha)	Superficie (ha)	Valor (USD/ha)
Cultivos	0	\$0.00	8.2445	\$3,410.00	19.7802	\$643.00	0.0000	\$0.00
Bosques de coníferas	177.8259	-\$3,410.00	0	\$0.00	1515.2926	-\$1,377.50	0.7503	-\$3,462.00
Bosques de coníferas-latifoliadas	298.1962	-\$2,026.50	10.0583	\$1,377.50	0	\$0.00	1.1945	-\$2,102.50
Pastizal	1725.7383	\$38.00	51.7679	\$3,436.00	103.8644	\$2,064.50	23.2866	-\$38.00

Tabla 3. Resumen de pérdida de valor (USD) debido a la disminución del inventario CO₂ en cada superficie con cambio de uso del suelo.

	Cultivos	Bosques de coníferas	Bosques coníferas-latifoliadas	Área sin vegetación aparente
Cultivos	\$0.00	\$28,113.75	\$12,718.67	\$0.00
Bosques de coníferas	-\$606,386.32	\$0.00	-\$2,087,315.56	-\$2,597.54
Bosques de coníferas-latifoliadas	-\$604,294.60	\$13,855.31	\$0.00	-\$2,511.44
Pastizal	\$65,578.06	\$177,874.50	\$214,428.05	-\$884.89
Total	-\$2,791,422.01	-\$1,145,102.86	\$219,843.56	-\$5,993.87

Los valores se presentan en dólares estadounidenses del año 1993.
Fuente: elaboración propia con datos de CSERGE (1993).

Tabla 4. Pérdida de valor debido a la disminución del inventario CO₂ en cada superficie con cambio de uso del suelo, en pesos reales con base en 2010.

Año	Pesos por dólar	*Precios corrientes	INPC 1993 base segunda quincena 2010	**Pesos reales con base en 2010
1993	\$3.12	-\$8,695,708.82	\$18.43	-\$47,190,040.83

*Precios corrientes=(tipo de cambio pesos por dólar multiplicado por valor obtenido en USD en 1993)
**Valor real=(Valor nominal/Deflactor "inflación que es el INPC") x 100.
Fuente: Elaboración propia.

Los valores de la Tabla 1 se multiplican por las superficies de cambio de cada formación vegetal (véase Tabla 2) para obtener los valores del impacto ambiental, debido a la pérdida de la capacidad del ecosistema para captura de carbono (Tabla 3):

El valor total de -\$2,791,422.01 se trasladó de dólares a pesos mexicanos, además se convirtió el valor nominal a valor real (Tabla 4) realizando el ajuste por inflación con el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) mediante:

$$\text{Valor real} = (\text{Valor nominal} / \text{Deflactor "inflación INPC"}) \times 100.$$

Control de erosión

Se generó un cuadro de valores con niveles de conservación del ecosistema propuestos por tipo de cobertura o formación vegetal (véase Tabla 5), el cual consideró los costos por pérdidas en la productividad y costos por la reposición de nutrientes del suelo por hectárea causados por la erosión, usando como límites

inferior y superior los escenarios conservadores para el Nivel de conservación alto y crítico, y para el Nivel de conservación bajo. Estos fueron tomados de Cotler *et al.* [6] quienes recopilaron estudios sobre la erosión de suelos en México desde 1960 a 2006, que refieren datos de 140 sitios a lo largo del país donde se consideran como variables principales y como causantes de erosión al clima, tipo de suelo, uso de suelo y pendiente. Se utiliza el factor C que representa el coeficiente por tipo de cobertura de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) para obtener los valores de Niveles de conservación 2 y 3 como se observa a continuación.

Los montos de la Tabla anterior son la base para obtener el valor del impacto ambiental debido a la pérdida de la capacidad del ecosistema para controlar la erosión, por lo que se generó la Tabla 6, donde se usa la diferencia de valores del tipo de cobertura de destino y el tipo de cobertura de procedencia, por ejemplo, \$ -12.11 USD/ha representa merma de valor al cambiar el uso de suelo Bosques al uso de suelo Cultivos.

Tabla 5. Valores de acuerdo con niveles de conservación por tipo de cobertura

Niveles de conservación (NC)	Cobertura	Valor (USD/ha)	Factor C
4	Sin vegetación	\$54.50**	1.00
3	Cultivos*	\$50.41*	0.75
2	Pastizal*	\$38.46*	0.02
1	Bosques	\$38.30***	0.01

* Valores obtenidos en base a la ecuación generada en hoja de cálculo Excel $Y=16.364x + 38.136$; $R^2=1$, donde X corresponde al factor C respectivo.

** Valor de costo total de pérdida por erosión de escenario crítico obtenido por Cotler *et al.* [6].

*** Valor de costo total de pérdida por erosión de escenario conservador obtenido por Cotler *et al.* [6].

Todos los valores se presentan en dólares estadounidenses del año 2011 como se encuentran en la fuente de consulta.

NC1. Nivel de conservación alto; NC2. Nivel de conservación medio-alto; NC3. Nivel de conservación medio-bajo; NC4. Nivel de conservación bajo

Fuente: Elaboración propia con datos de Cotler *et al.* [6] y Montes-León *et al.* [18].



Con base en la Tabla 6, el valor de pérdida de suelo se multiplicó por la superficie de cada formación vegetal para obtener el valor total de la matriz que refleja el impacto económico de la pérdida de suelo debido a la erosión (véase Tabla 7).

Para contar con valores comparables, se requirió trasladar el valor en dólares a pesos mexicanos y convertir el valor nominal a valor real realizando el ajuste por inflación (véase Tabla 8) con el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) mediante: Valor real=(Valor nominal / Deflactor "inflación INPC") x 100.

Captación de agua

Para conocer el valor de captura de agua y la proporción en que éste se ve afectado respecto a cada nivel de conservación del ecosistema propuesto por formación vegetal en el área de estudio se generó la Tabla 9, donde la determinación de la captura de agua se realizó a través de las variables usadas en la ecuación de escurrimiento medio (Soil Conservation Service, 1972), que considera el potencial máximo de retención de agua (S) mediante coeficientes de curvas numéricas (CN)

Tabla 6. Valores de pérdida de suelo por hectárea (USD/ha) y superficie de cambio (ha) de acuerdo con la matriz destino-procedencia por formación vegetal.

Fuente: Elaboración propia con datos de Cotler *et al.* [6] y Montes-León *et al.* [18].

	Cultivos		Bosques		Sin vegetación	
	Superficie (ha)	Diferencia en (USD/ha)	Superficie (ha)	Diferencia en (USD/ha)	Superficie (ha)	Diferencia en (USD/ha)
Cultivos	795.6104	\$0.00	28.0247	\$12.11	0.0000	\$0.00
Bosques	476.0221	-\$12.11	2691.4456	\$0.00	1.9448	-\$16.20
Pastizal	1725.7383	-\$11.95	155.6323	\$0.16	23.2866	-\$16.04

Tabla 7. Resumen de pérdida de valor (USD) debido a la erosión en cada superficie con cambio de uso del suelo.

Fuente: Elaboración propia con datos de Cotler *et al.* [6] y Montes-León *et al.* [18].

	Cultivos	Bosques	Sin vegetación
Cultivos	\$ ----	\$ 339.35	\$ ----
Bosques	-\$ 5,764.15	\$ -----	-\$ 31.51
Pastizal	-\$ 20,615.19	\$ 25.41	-\$ 373.44
Total	-\$ 26,419.52	\$ 364.76	-\$ 404.95

Los valores se presentan en dólares estadounidenses del año 2011.

Tabla 8. Pérdida de valor debido a la erosión en cada superficie con cambio de uso del suelo, en pesos reales con base en 2010.

Año	Pesos por dólar	*Precios corrientes	INPC 2011 base segunda quincena 2010	**Pesos reales con base en 2010
2011	\$12.43	-\$328,396.25	\$103.55	-\$317,134.79

*Precios corrientes=(tipo de cambio pesos por dólar multiplicado por valor obtenido en USD en 2011)
 **Valor real=(Valor nominal / Deflactor "inflación que es el INPC") x 100
 Fuente: Elaboración propia.

según el uso del suelo (véanse Ecuación 1 y Figura 5). También se usaron precios locales, oficiales y actuales por aprovechamiento de agua como se muestra en la Tabla 9.

Cuando cambia el tipo de formación vegetal que cubre a cierta superficie de suelo también se altera su capacidad para la captación de agua y por tanto el valor económico que representa. Así pues, la diferencia de valor de captura de agua entre las formaciones vegetales se incluyó en la matriz desti-

no-procedencia de acuerdo con cada cambio de uso del suelo correspondiente como se observa en la Tabla 10.

A partir de la Tabla anterior, el valor de captura de agua en pesos por hectárea se relacionó con la superficie de cada formación vegetal según la ruta de cambios, dando como resultado el valor total del impacto ambiental debido a la pérdida de potencial de captura de agua, como se observa (véase Tabla 11).

Tabla 9. Obtención de valor de captura de agua (\$/ha/año) por nivel de conservación.

Nivel conservación	Formación vegetal	CN	S	Factor de potencial máx. de retención S	Captura de agua (m ³ /ha/año)	Precio *** (\$/m ³)	Valor de captura (\$/ha/año)
1	Bosque	60	169.33	1.0000	*162.00	\$17.83	\$2,889.14
2	Pastizal	69	114.12	**0.6733	109.07	\$17.83	\$1,945.21
3	Cultivo	81	59.58	**0.3515	56.95	\$17.83	\$1,015.60
4	Sin vegetación	82	55.76	**0.3290	53.29	\$17.83	\$950.41

Consideran el volumen de agua 162 m³/ha al año captado por bosques en el estado de Michoacán según Torres-Rojo (2002).

** Obtenido en base a la ecuación de regresión lineal simple generada en hoja de cálculo Excel Y=0.0059X; R²=1

***Considera el promedio de precios por m³ de agua de fuentes superficiales y subterráneas para el año 2017 publicado en el D.O.F (2016).

Los valores se expresan en pesos mexicanos del año 2017.

Fuente: elaboración propia a partir de datos extraídos de Soil Conservation Service (1972), Torres-Rojo (2002), D.O.F (2016) y D.O.F (2017).

(Ecuación 01)

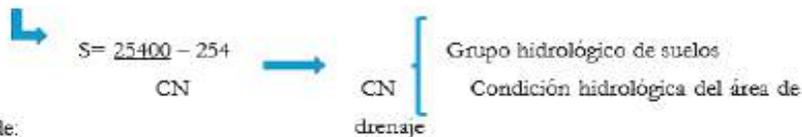
$$Q = \frac{(P - 0.25)^2}{(P + 0.85)}$$

Donde:

Q = escurrimiento medio por evento (mm).

P = precipitación efectiva por evento (mm).

S = retención máxima potencial (mm).



Donde:

S = Potencial máximo de retención (mm).

CN = Curvas numéricas (adimensional).

Figura 5. Variables relacionadas con el escurrimiento medio incluyendo el uso de suelo expresado en el coeficiente de CN. Fuente: Elaborado a partir de Soil Conservation Service (1972).



Pérdida de ingresos

La disminución de la capacidad de los ecosistemas para la provisión de servicios ambientales también puede reflejar una pérdida potencial de ingresos. En referencia al mercado nacional de servicios provenientes de los ecosistemas, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) cuenta con el componente de pago por servicios ambientales (PSA) del Programa Nacional Forestal, mediante el cual se otorga un pago anual por hectárea a los propietarios de terrenos forestales en buen

estado de conservación. El cálculo de valor por pérdida de ingresos en este apartado se realizó bajo la premisa de que la superficie forestal perdida para el final del periodo de estudio dejaría de percibir el ingreso equivalente por el concepto mencionado, como se plasma en la Tabla 12.

El valor de pérdida de ingreso de pago por servicios ambientales se obtiene de multiplicar \$280 por la superficie de bosque por 5 años, menos \$82,500 por costo de asistencia técnica de acuerdo con el esquema del programa nacional forestal que se trata.

Tabla 10. Valores de pérdida de potencial de captura de agua por hectárea (\$/ha) y superficie de cambio (ha) de acuerdo con la matriz destino-procedencia por formación vegetal.

	Cultivos		Bosques		Sin vegetación	
	Superficie (ha)	Diferencia (\$/ha)	Superficie (ha)	Diferencia (\$/ha)	Superficie (ha)	Diferencia (\$/ha)
Cultivos	795.6104	\$0.00	28.0247	\$1,873.54	0.0000	\$0.00
Bosques	476.0221	-\$1,873.54	2691.4456	\$0.00	1.9448	-\$1,938.73
Pastizal	1725.7383	-\$929.61	155.6323	\$943.93	23.2866	-\$994.80

Fuente: Elaboración propia a partir de Torres-Rojo (2002), D.O.F (2016) y D.O.F (2017).
A partir de la Tabla anterior, el valor de captura de agua en pesos por hectárea se relacionó con la superficie de cada formación vegetal según la ruta de cambios resultando el valor total del impacto ambiental debido a la pérdida de potencial de captura de agua, como se observa abajo (véase Tabla 11).

Tabla 11. Resumen de pérdida de valor debido a la pérdida de potencial de captura de agua en cada superficie con cambio de uso del suelo. Fuente: elaboración propia.

	Cultivos	Bosques	Sin vegetación
Cultivos	\$ ----	\$ 52,505.39	\$ ---
Bosques	-\$ 891,846.34	\$ ----	-\$ 3,770.43
Pastizal	-\$ 1,604,266.26	\$ 146,905.72	-\$ 23,165.46
Total	-\$ 2,323,637.38	\$ 199,411.11	-\$ 26,935.89

Los valores se presentan en pesos mexicanos del año 2017.

Tabla 12. Pérdida del ingreso de pago por servicios ambientales.

Disminución de superficie del bosque	Monto de pago (\$/ha/año) durante 5 años	Pérdida de ingreso de PSA*
-294.3098	280	-\$494,533.72

*Considerando \$16,500 de asistencia técnica por año. Los montos se expresan en pesos mexicanos al año 2017.
Fuente: Elaboración propia con base en datos del D.O.F. (2016b).

Costos de rehabilitación del ecosistema

Se estimó el costo de rehabilitación del ecosistema para recuperar la formación vegetal de bosque y su capacidad de provisión de los servicios ecosistémicos. En el desarrollo de este apartado se utilizaron los precios base del Programa Nacional Forestal de la CONAFOR para obras y actividades de restauración aplicables a la zona de estudio, quedando como lo muestra la Tabla 13.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambio en el uso del suelo

A partir del análisis del cambio de uso del suelo mediante cartografía temática digital se obtuvo la Matriz de ruta de cambios o Matriz destino-procedencia, que indica de cuáles coberturas proviene la cobertura actual (véase Tabla 14) y muestra que 795.61 ha de Agricultura de temporal (TA) no sufrieron cambio

Tabla 13. Pérdida del ingreso de pago por servicios ambientales.

Superficie a rehabilitar (ha)	Inversión (\$/ha)	Costo total por rehabilitación (\$)
3022.6020	\$15,664.00	\$47,346,037.73
<p>* La superficie a rehabilitar se tomó de la Carta de uso de suelo y vegetación 2017, elaborada en la Etapa 1 de la metodología. Los valores presentados se expresan en pesos mexicanos al año 2017. Fuente: Elaboración propia con base en datos del D.O.F. (2016b). Fuente: Elaboración propia con base en datos del D.O.F. (2016b).</p>		

Tabla 14. Matriz Destino-Procedencia.

Fuente: elaboración propia a partir de CONAFOR (2014) y USGS (2017).

Procedencia/ Destino	TA	BP	BQP	BPQ/VSA	BPQ/VSa	BPQ	DV
TA	795.6104	8.2445	17.1520	2.6282	0.0000	0.0000	0.0000
BP	177.8259	980.6093	638.4300	560.3290	316.5336	0.0000	0.7503
BP/VSa	268.1466	10.0583	176.5968	0.0000	0.0000	0.5953	0.0000
PI	1725.7383	51.7679	102.8143	0.2237	0.8264	0.0000	23.2866
BPQ/VSa	30.0496	0.0000	8.2933	0.0000	0.0000	0.0000	1.1945
Agricultura de temporal			TA		Pastizal inducido		PI
Bosque de pino			BP		Bosque de pino-encino		BPQ
Bosque de pino con vegetación secundaria			BP/VSa		Bosque de encino-pino		BQP
Bosque de pino-encino con vegetación secundaria arbustiva			BPQ/VSa		Desprovisto de vegetación		DV
Bosque de pino-encino con vegetación secundaria arbórea			BPQ/VSA				



y que 980.60 ha de Bosque de pino (BP) también mantuvieron el mismo uso al inicio y final del periodo de análisis, mientras que el resto de la superficie (4,121.48 ha) sí presentó algún cambio en el tipo de cobertura.

Un cambio drástico se presentó en Pastizal, dado que de conformar 1,904.65 ha iniciales se transformaron en 1,725.73 ha de Agricultura de temporal y 23.28 ha quedaron Desprovistas de vegetación (Tabla 14). Por otro lado, 155.63 ha volvieron a la cobertura de Bosque, lo cual indica revegetación del ecosistema y es un impacto positivo para la provisión de servicios ecosistémicos.

A partir de la tabla anterior se generó la matriz jerarquizada por formación vegetal (véase Tabla 15) para establecer diferencias de valor y trabajar con la información disponible. Dicha matriz muestra los tipos de vegetación y usos de suelo reagrupados como lo señala la Tabla 15.

Es importante mencionar que para la elaboración de la Tabla 15 se requirió agrupar las clases de cobertura por formación vegetal de acuerdo con el sistema clasificatorio jerár-

quico usado en la cartografía del Inventario Forestal Nacional 2000-2001 [20], debido a que la información existente en literatura no se encuentra detallada a nivel de subcomunidad vegetal, comunidad vegetal, ni tipo de vegetación. Cabe destacar que este método se enfoca en las diferencias en cantidad de superficie que presenta cada tipo de cobertura en el periodo dado, mas no analiza los posibles cambios en ubicación geográfica de cada una, lo cual puede ser planteado como objetivo para estudiarse en otra investigación.

Valor del impacto del cambio de uso del suelo a los servicios ecosistémicos

Se obtuvo el valor del impacto a cada servicio ecosistémico elegido causado por el cambio de uso de suelo. Para obtener el valor total se consideraron los costos implicados por el impacto como son Pérdida de ingreso y Costo por rehabilitación del ecosistema para recuperar su capacidad de generar servicios. Cabe mencionar que en la investigación se trabajó con los importes que representan los

Tabla 16. Valores del impacto a servicios ecosistémicos por cambio de uso del suelo.
Fuente: Elaboración propia.

Servicio ambiental	Valor del impacto
Captura de carbono	\$ 47,190,040.83
Captación de agua	\$ 2,323,637.38
Control erosión	\$ 317,134.79
Otros costos implicados	
Rehabilitación del ecosistema	\$ 47,346,037.73
Pérdida de ingreso	\$ 494,533.72
Total	\$ 97,671,384.45

Tabla 15. Matriz Destino-Procedencia sintetizada por formación vegetal.
Fuente: Elaboración basada en clasificación de [20].

Procedencia/ Destino	Cultivos	Bosques	Otros tipos de vegetación
Cultivos	795.6104	28.0247	0.0000
Bosques	476.0221	2691.4456	1.9448
Pastizal	1725.7383	155.6323	23.2866

servicios ambientales mas no con las cantidades de masa o volumen en que estos se producen. La Tabla 16 resume los resultados obtenidos.

Según la tabla anterior el valor más alto obtenido fue del impacto al servicio ecosistémico de captura de carbono, el valor más bajo determinado fue el de control de erosión y el valor intermedio, sin embargo, muy bajo en comparación con el de captura de CO² fue de captación de agua.

El valor relativamente elevado de la captura de carbono se debe al gran volumen en toneladas de carbono por hectárea que el bosque puede almacenar y así mismo perder mediante deforestación. En contraparte, el precio promedio por aprovechamiento de cada metro cúbico de agua en México 17.83 pesos (menos de 1 dólar), por lo que el valor del impacto a la captación de agua es bajo.

El concepto Pérdida de ingreso es el más bajo, semejante al valor de control de erosión, debido principalmente a que este concepto únicamente aplica en la superficie disminuida de bosque (294.30 ha), pues así aplica en México el mecanismo de pago por servicios ambientales. En contraste, el costo por concepto de rehabilitación del ecosistema es el valor más alto de todos, debido a que representa un monto alto por hectárea (\$15,664.00 pesos) y a la gran superficie a rehabilitar de 3,022.60 ha de las 5,897.70 ha que conforman el área de estudio.

De acuerdo con el alcance del presente trabajo, se evalúan solamente los impactos primarios y circunscritos al área de estudio, es decir, no se consideran por ejemplo los impactos culturales ni las afectaciones regionales o globales que puedan ocurrir.

La principal aportación de este estudio es que la valoración se realizó en referencia a un fenómeno y a un estado inicial y final del ecosistema como lo representa el cambio de uso del suelo: espacial y temporal, ya que diversos estudios presentan el valor de servicios ecosistémicos de un sitio sin línea base u otra referencia. Además, se trabajó

con distintos tipos de cobertura del suelo en la misma área de estudio, lo cual es escaso de encontrar, pues la mayoría de los estudios se enfocan en un solo tipo.

CONCLUSIONES

Este estudio permite conocer el valor general del impacto ambiental, debido al cambio de uso del suelo que es cercano a los 100 millones de pesos para el periodo evaluado de 44 años en una superficie cercana a 6,000 hectáreas, es decir, cada año se perdieron 2.21 millones de pesos en promedio. El servicio de mayor influencia en la pérdida es la captura de carbono donde la cobertura cambió de un bosque a otra. En referencia a la hipótesis, se determinó que la degradación ambiental provocada por el cambio de uso del suelo en el ecosistema del Cerro de Patamban en Tangancícuaro de Arista, Michoacán de Ocampo, sí puede ser cuantificada económicamente para contar con una referencia local de valor, útil en la toma de decisiones en el estrato social y gubernamental para fomentar sistemas sustentables de manejo de los recursos naturales.

AGRADECIMIENTOS

Al Conacyt, al convenio de investigación de la Maestría en Valuación de Bienes entre la Universidad Autónoma de Querétaro y el Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

REFERENCIAS

[1] ACUERDO por el que se dan a conocer las zonas de disponibilidad que corresponden a las cuencas y acuíferos del país para el ejercicio fiscal 2017, en términos del último párrafo del artículo 231 de la Ley Federal de Derechos vigente. Diario Oficial de la Fede-



ración. 24 de marzo del 2017. [Online]. Disponible: <http://www.dof.gob.mx/index.php?year=2017&month=03&day=24>

[2] P. Balvanera, y H. Cotler, Acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta ecológica número especial 84-85*, pp. 8-15, 2007.

[3] BANXICO. Serie histórica diaria del tipo de cambio peso-dólar, "Tipo de cambio peso dólar desde 1954". [En línea]. Disponible en <http://www.banxico.org.mx/SielInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadro&idCuadro=CF373#>

[4] CONAFOR. (2014). Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Michoacán 2014. México: SEMARNAT-CONAFOR.

[5] R. Costanza, R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K Limburg, S. Naeem, R. O'Neill, J. Paruelo, R. Raskin, P. Sutton y M. van den Belt, *The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital*. *Nature*, vol. 387, no. 15, pp. 253-260.

[6] H. Cotler, C. A. López y S. Martínez-Trinidad ¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? *Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México*. *Investigación Ambiental*, vol. 3, no. 2, pp. 31-43, 2011.

[7] CSERGE. Annexes 3-6. Economic value of carbon sequestration, watershed protection, value of pharmaceuticals from Mexico's forests, existence value; Draft report to World Bank Latin America and the Caribbean-Country Department II. Mexico Forestry and Conservation Sector Review. Substudy of economic valuation of forests. Center for Social and Economic Research on the Global Environment, 1993.

[8] Dirección de Producción y Sanidad Animal FAO. *Ganadería y deforestación. Políticas Pecuarias 03. América Latina*, pp. 1-7, 2007.

[9] Dirección Nacional de Ordenamiento Ambiental y Conservación de la Biodiversidad. El avance de la frontera agropecuaria y sus consecuencias. Publicación de la Jefatura de Gabinete de Ministros. Argentina, 2008.

[10] Flores, N. *Valoración de bienes y servicios ecosistémicos, como indicador del ordenamiento ecológico del territorio en la cuenca del Río Duero, Michoacán*. Tesis doctoral en proceso. Documento sin publicar.

[11] Galicia, L. y García-Romero, A. Degradación de los recursos forestales en México. Academia Mexicana de las Ciencias. México, pp. 1-13, 2015.

[11] INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, 2010.

[12] INEGI. Compendio de información municipal de los Estados Unidos Mexicanos 2010, Tangancícuaro, Michoacán de Ocampo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, 2010b.

[13] INEGI. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V (capa unión), escala: 1:250000. 2ª ed. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, 2013.

[14] INEGI. (2017). Precios e inflación > Índice nacional de precios al consumidor > Mensual > Índice > Índice general y por objeto del gasto Índice general a/ (Base segunda quincena de diciembre 2010=100) [En línea]. Available: <http://www.inegi.gob.mx/>

[15] Lambert, A. *Valoración económica de los humedales: un componente importante de las estrategias de gestión de los humedales a nivel de cuencas fluviales*. Publicación Oficina Ramsar. Irán, pp. 1- 11, 2003.

[16] Ley Federal de Derechos 2017. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación, diciembre del 2016. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105138/Ley_Federal_de_Derechos.pdf

[17] Mendoza-González, G. *Land use change and effects on the value of ecosystem services along the coast of the gulf of Mexico*. *Ecological economics*, no. 82, pp.23-32, 2010.

[18] Montes- León, M. A., Uribe-Alcántara, E. M. y García- Celis, E. *Mapa nacional de*

erosión potencial. Tecnología y Ciencias del Agua. Ingeniería hidráulica en México, vol. 2, no. 1, pp. 5-17, 2011.

[19] Osorio, J.D. y Correa, F. *Valoración económica de costos ambientales: marco conceptual y métodos de estimación. Semestre económico*, vol. 7, no. 13, pp. 160-193, 2004.

[20] Palacio, J.L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, J., Takaki-Takaki, F., Victoria, A., Luna-González, L. y Gómez-Rodríguez, G. *La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 43, pp. 183-203, 2000.

[21] Palacio, V. *Tierras agrícolas de alta productividad frente al mercado de tierras urbano. Laberinto*, no. 10, México, pp. 1-12, 2002.

[22] Reglas de operación del Programa Nacional Forestal 2017. Decimocuarta sección. Comisión Nacional Forestal. Diario Oficial de la Federación, diciembre de 2016b. [Online]. Available: http://www.conafor.gob.mx/apoyos/index.php/inicio/app_apoyos#/detalle/2017/68

[23] Soil Conservation Service. *National engineering handbook. Section 4. Hydrology*. U. S. Department of Agriculture. Washington, DC, USA, 1972.

[24] Torres-Rojo. *Potencial de México para la producción de servicios ambientales. INE- CIDE. Gaceta Ecológica*, no. 63, pp. 40-59, 2002.

USGS. *United States Geological Survey imagen Sentinel. marzo 2017 [imagen de satélite]*. [Online]. Available: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

EFECTO DEL RIEGO, TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTAL SOBRE COMPUESTOS FENÓLICOS Y LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE EN ORÉGANO

Effect of irrigation, environmental temperature and humidity on
phenolic compounds and antioxidant activity in oregano

María Isabel Nieto Ramírez, Juan Fernando García Trejo,
Ana Angélica Feregrino Pérez, Ramón Gerardo Guevara González,
Benito Parra Pacheco.

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
isabelnieto33@gmail.com

RESUMEN

El orégano (*Lippia graveolens*) es una planta usada principalmente en la medicina tradicional como antimicrobiano y en la gastronomía como condimento. Las propiedades terapéuticas por las que se caracteriza son conferidas debido a metabolitos secundarios como los fenoles y flavonoides. La concentración de estos compuestos puede ser influenciada por las condiciones de cultivo como el tipo de riego, la temperatura y la humedad del ambiente que representan un estrés abiótico. Por ello, el objetivo de este trabajo fue comparar el riego, la temperatura y humedad del ambiente en el orégano (*Lippia graveolens*), para cumplirlo se obtuvieron plantas de orégano comerciales, de las cuales se colocaron 14 plantas en invernadero y 14 plantas en cielo abierto, teniendo dos sistemas de riego: a) agua con solución nutritiva y b) agua residual acuícola. Además, se monitoreo la temperatura de los dos sistemas de cultivo.

En cada planta se determinó de manera espectrofotométrica la concentración de fenoles, flavonoides totales y la capacidad antioxidante. Los resultados presentaron las concentraciones máximas de compuestos fenólicos en las plantas cultivadas en invernadero a temperaturas entre 22 y 17 °C, regadas con agua residual acuícola. Por otra parte, las concentraciones máximas de flavonoides se presentaron en las plantas cultivadas en campo a una temperatura entre 45 y 11°C, regadas con agua residual acuícola. La capacidad antioxidante máxima se mostró en las plantas cultivadas en invernadero, regadas con agua con solución nutritiva. En conclusión, existe un efecto por el tipo de riego, teniendo un incremento en los compuestos fenólicos cuando las plantas son regadas con agua residual acuícola. Además, los diferentes cambios de temperatura y humedad ambiental afectan considerablemente la concentración de compuestos fenólicos en plantas de orégano.

Palabras clave: bio, biosíntesis, cultivo, fenoles, flavonoides, metabolitos secundarios.

ABSTRACT

Oregano is a plant mainly used in traditional medicine as an antimicrobial and as a condiment in gastronomy. Secondary metabolites like phenols and flavonoids provide this plant with medicinal properties. The concentration of these compounds could be influenced by abiotic stress (culture conditions as irrigation, environmental temperature and humidity). In this work, irrigation, environmental temperature and humidity were compared with phenols, flavonoids and antioxidant activity production in oregano. The plants were bought and separated in two different cultures; greenhouse and field crop, with 14 plants in each. Additionally, each culture had two irrigations types, first, with fertilizer water and second aquaculture residual water. Also, ambient temperature and relative humidity were monitored in each culture.

Total phenols, flavonoids and antioxidant activity were determined by spectrophotometric methods. The highest phenols concentration was obtained in plants culture in greenhouse at 22 to 17 °C, irrigated with aquaculture residual water. The highest flavonoids concentration was obtained in plants cultured in field crop at 45 to 11 °C, irrigated with aquaculture residual water. The highest antioxidant activity was found in plants cultured in greenhouse, irrigated with fertilized water. In conclusion, phenolic compound concentration increased in plants irrigated with aquaculture residual water. In addition, different environmental temperature and humidity affect phenolic compound concentrations in oregano.

Keywords: biosynthesis, culture, flavonoids, phenols, secondary metabolites

INTRODUCCIÓN

El orégano es una planta aromática y se denomina así a más de 40 especies de diferentes familias [1], [2]. Se encuentra principalmente en lugares con clima muy variado, pero principalmente en climas áridos y



semiáridos [3], [4]. Se usa comúnmente como condimento y actualmente es cotizado por la industria cosmética, alimenticia y farmacéutica [5]. Por sus propiedades medicinales, se utiliza como tratamiento contra enfermedades respiratorias, diabetes, desordenes menstruales y como antimicrobiano, principalmente [5], [6], [7]. *Lippia graveolens* contiene en su aceite esencial metabolitos secundarios como el carvacrol, el timol y sus precursores como γ -terpineno y *p*-cimeno [8]. La concentración en conjunto de estos compuestos es de 59.8 mg/g en peso seco de acuerdo con algunos autores [9]. Estos metabolitos están clasificados como compuestos fenólicos y flavonoides, entre otros, que le confieren las propiedades medicinales importantes a la planta. Estudios recientes han demostrado que los metabolitos secundarios en el orégano (*Lippia graveolens*) tienen un efecto protector contra rayos UV [10]. Además, se demostró [11] que el carvacrol puede ser usado como un tratamiento contra el daño renal debido a la supresión del estrés oxidativo e inflamación generada.

Estos compuestos se producen en la planta de acuerdo con las necesidades de la misma, es decir, los compuestos fenólicos ayudan a contrarrestar el estrés oxidativo, mientras que los flavonoides protegen a la planta contra patógenos [12]. Por otro lado, se sabe que las condiciones ambientales como temperatura, humedad relativa, radiación e incluso el riego pueden causar cambios en la producción de los compuestos activos en las plantas [13]. Se determinó la concentración de compuestos fenólicos y flavonoides en *Sasa quelpaertensis* durante diferentes estaciones del año [14]. Ante ello, los resultados presentaron una disminución en la concentración de compuestos específicos tales como el ácido *p*-cumárico y tricina entre junio y octubre. Además, el contenido total de fenoles y flavonoides incrementó gradualmente en el mes de octubre obteniendo la concentración más alta durante diciembre.

México es el segundo productor de orégano a nivel mundial [15]. Su cultivo se realiza

principalmente en los estados de Chihuahua, Durango, Querétaro, Tamaulipas, Jalisco, Zacatecas, Coahuila, Hidalgo y Baja California [4]. En la actualidad, existen paquetes tecnológicos para el manejo del orégano, cuyo fin es el aporte innovador sobre prácticas silviculturales [16]. El manejo descrito en estos manuales o paquetes tecnológicos refieren las buenas prácticas de labranza y manejo del cultivo como la temperatura, humedad relativa, pH del suelo y las condiciones de riego requeridos para el desarrollo correcto de la planta [4], [17].

Por la alta demanda de esta especie, se han estudiado condiciones de cultivo que puedan mejorar la producción. Flores *et al.* [18] realizaron pruebas en un cultivo de orégano a diferentes porcentajes de humedad en suelo, resultando que la humedad 2/3 de la capacidad de campo del suelo es la mejor para el rendimiento de la planta. Por otro lado, Teraza *et al.* [19] lograron incrementar el contenido de carvacrol, principal compuesto del orégano, al cultivar la planta en altas radiaciones. De acuerdo con esto el objetivo de este trabajo es comparar las condiciones de cultivo sobre la producción de fenoles, flavonoides totales y su capacidad antioxidante en orégano (*Lippia graveolens*).

METODOLOGÍA

Materiales y Métodos

Para la experimentación de este trabajo, se obtuvieron comercialmente 28 plantas de orégano y se colocaron 14 plantas en invernadero y 14 en cultivo a cielo abierto. Se aclimataron por 5 días en las condiciones de cada sistema de cultivo. También se realizaron dos tipos de riego en cada cultivo a capacidad de campo de 2/3 por las mañanas y las tardes. Uno de los sistemas de riego se llevó a cabo con agua con solución nutritiva y otro con agua residual acuícola. Se monitoreó la temperatura ambiental y la humedad relativa por medio de

sensores automatizados. Además, se determinó la calidad del agua para cada sistema de riego. El diseño experimental fue factorial de 2x2, es decir, dos tipos de cultivo y dos tipos de riego. La Figura 1 expone los pasos generales para la realización de este trabajo.

La calidad del agua se determinó por análisis espectrofotométricos. El análisis de nitritos ($\text{NO}_2\text{-N}$) fue por el método de diazotización (Método HACH 8507, 2010; adaptado de USEPA, 1979), nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$) mediante el método de reducción de cadmio (método HACH 8171, 2010) y fósforo total (FT) por el método de molibdovanadato (Método HACH 8048, 2010; adaptado de USEPA Standard Method 4500-P for Wastewater).

La determinación de los compuestos activos se llevó a cabo después de cada elicitación. Primero se realizó una extracción por el

método descrito por Hassan *et al.* (2011). Las determinaciones de los compuestos fenólicos se realizaron por el método de Folin-Ciocalteu descrito por Singleton y Rossi (1965), los flavonoides totales por el método de 2-aminoetilfenilborato y la capacidad antioxidante se determinó por el método DPPH y FRAP. Las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro DR6000 a las absorbancias indicadas por cada método.

El análisis estadístico que se realizó fue ANOVA de una sola vía con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Los resultados se procesaron en el paquete estadístico STATGRAPHICS centurión XV. Las figuras con los resultados de temperatura, humedad relativa, compuestos fenólicos, flavonoides, capacidad antioxidante DPPH y FRAP se presentan con el error estándar de la media.



Figura 1. Diagrama experimental del cultivo de orégano en diferentes condiciones



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El monitoreo de la temperatura se muestra en la Figura 2. Los resultados mostraron una variación de la temperatura en el cultivo a cielo abierto, donde se tuvo una temperatura máxima de 45 °C y una mínima de 1.6 °C. Por otro lado, las temperaturas registradas dentro del invernadero fueron menos drásticas, teniendo una temperatura máxima de 22 °C y una mínima de 17 °C. El comportamiento de la temperatura sirve como un criterio para seleccionar el tipo de cultivo que, consideramos, aumenta el contenido de compuestos fenólicos, así como su capacidad antioxidante en cada planta. Este parámetro es una condición ambiental que puede afectar el contenido de compuestos fenólicos [20]. Además, se ha

demostrado que la temperatura ambiental incrementa el contenido de ácidos fenólicos en plantas de lechuga [21].

Los resultados del monitoreo de la humedad relativa se presentan en la Figura 3. Estos resultados se comportaron de manera similar a los de la temperatura, al tener oscilaciones del porcentaje de humedad relativa en el cultivo a cielo abierto a diferencia del cultivo en invernadero. El porcentaje de humedad relativa máximo en el cultivo de campo fue de 68.4% y mínimo de 19.4%.

Las determinaciones de la calidad de agua mostraron, como se esperaba, mayor concentración de nutrientes en el riego de agua con solución nutritiva. Teniendo una concentración de nitratos casi doble a la obtenida en el agua residual acuícola, además

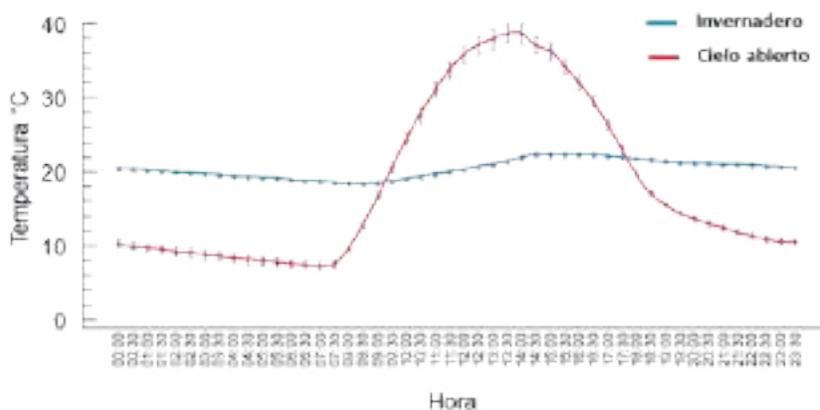


Figura 2. Temperatura ambiental registrada en los dos tipos de cultivo

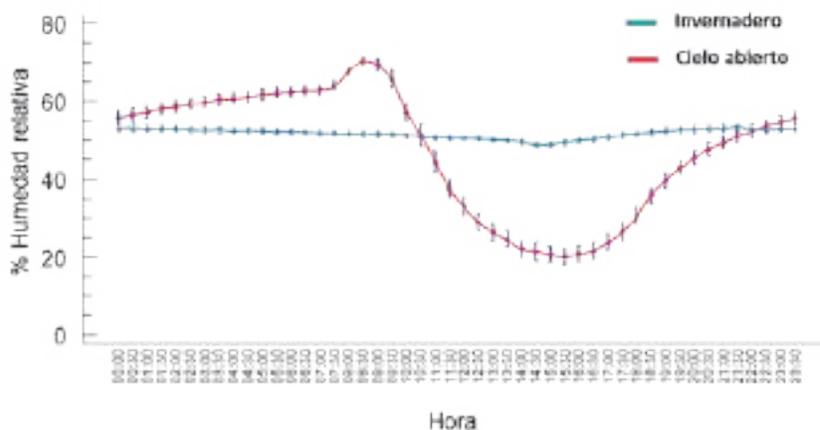


Figura 3. Porcentaje de humedad relativa registrada en los dos tipos de cultivo del orégano

la concentración de fósforo en el agua residual fue 5 veces más baja que la concentración obtenida en la solución nutritiva. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Yavuzcan *et al.* [22], donde la concentración de estos nutrientes es menor en el agua de cultivo de peces. Estos resultados se exhiben en la Tabla 1.

Tabla 1. Concentraciones de los nutrientes medidos en cada sistema de riego

Tipo de riego	Solución nutritiva	Agua residual acuícola
Nitratos mg/L	215.175	118.375
Nitritos mg/L	1.341	0.321
Fósforo mg/L	69.45	14.35

La concentración de fenoles totales máxima se obtuvo cuando las plantas fueron cultivadas en invernadero a temperatura controlada entre 20 y 17 °C, regadas con agua residual acuícola. Además, se observó una disminución de la concentración de estos compuestos respecto al tiempo de cosecha, es decir, en la segunda cosecha después de 28 días de exposición a las condiciones ambientales mencionadas y al tipo de riego. Por otra parte, la concentración de fenoles se mantiene igual para el último día de cosecha en cualquier tipo de riego aplicado. El incremento de la concentración de fenoles en las plantas de orégano fue contrario a los que se han obtenido en plantas de lechuga, es decir, el experimento realizado sobre el efecto de las condiciones ambientales sobre la concentración de compuestos fenólicos en plantas de lechuga demostró que la concentración más alta de estos compuestos fue cuando las plantas se cultivaron en condiciones de temperaturas altas a diferencia de las condiciones obtenidas en invernadero [21]. Este tipo de resultados nos sugieren que el efecto de la temperatura sobre los compuestos fenólicos depende de la especie de planta, ya que para algunas especies resulta un efecto positivo y para otras un efecto negativo. Por otro lado, el alto contenido de compuestos

fenólicos en las plantas de orégano bajo las condiciones de riego con agua residual acuícola tiene relación con la cantidad de nutrientes que se les administró. Por otro lado, la concentración de estos compuestos se ve afectada por el sistema de riego con menor cantidad de nutrientes. Estos resultados se deben a que las plantas de orégano no requieren una alta concentración de nutrientes minerales y se pueden cultivar en suelos con alta concentración de materia orgánica [23]. La Figura 4 presenta las concentraciones de fenoles obtenidas en el orégano.

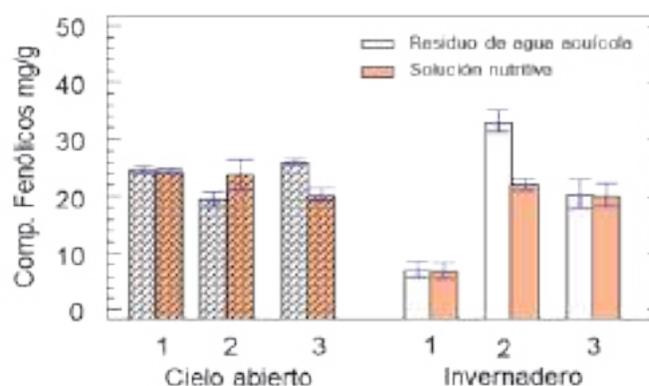


Figura 4. Concentración de fenoles totales (mg/g eq. Ác. Gálico/g) determinada en las plantas de orégano cultivadas a diferentes condiciones. Los resultados se expresan en error estándar a 1, 14, 28 días de muestreo

Como se puede observar en la Figura 5, las plantas de orégano cultivadas en campo y regadas con agua residual acuícola, mostraron la concentración de flavonoides totales máxima. Estos resultados no pueden indicar que el efecto obtenido en la concentración de flavonoides se debe a los factores de cultivo como la temperatura ambiental y la humedad relativa, así como la deficiencia de nutrientes por parte del sistema de riego aplicado. De acuerdo con lo reportado por Petinatti *et al.* [13], estos factores estresantes obtenidos en el cultivo sí pueden tener un efecto sobre los compuestos evaluados.

Por otro lado, la concentración de flavonoides se ve afectada en invernadero sin importar el tipo de riego aplicado, es decir, en



la primera cosecha de muestra se observa un incremento en la concentración cuando las plantas son regadas con agua residual acuícola, a diferencia de la última cosecha, donde se obtuvo el incremento de los flavonoides en las plantas regadas con fertilizante. Estos resultados sugieren que el conjunto de factores nutricionales y ambientales como la temperatura y la humedad ambiental afectan la concentración de ciertos compuestos como los flavonoides. De acuerdo con Zhang *et al.* [24], la humedad ambiental influye en la acumulación de ciertos flavonoides como el ácido ferúlico, epicatequina e inclusive se sugiere que altos niveles de humedad ambiental pueden incrementar la concentración de pigmentos en la manzana.

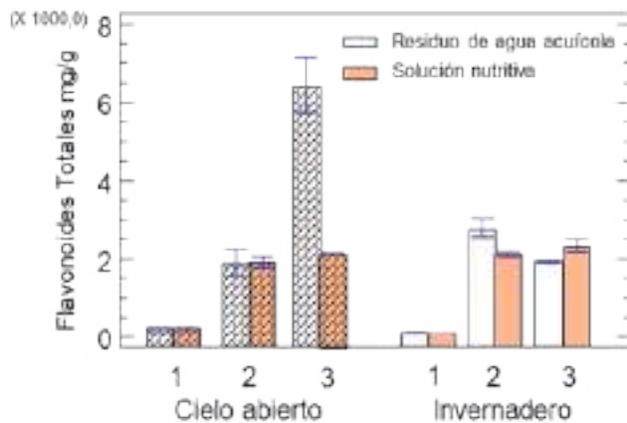


Figura 5. Concentración de flavonoides totales (mg eq. Catequina/g) determinada en las plantas de orégano cultivadas a diferentes condiciones. Los resultados se expresan en error estándar a 1, 14, 28 días de muestreo.

De acuerdo con el efecto de cada sistema de riego, los resultados mostraron un efecto positivo sobre los compuestos fenólicos y flavonoides en las plantas regadas con agua residual acuícola. Esos resultados sugieren que la baja concentración de nutrientes puede ser un factor estresante que promueva la biosíntesis de compuestos fenólicos. Además, Teles *et al.* [23] demostraron que las plantas de orégano no demandan una concentración de nutrientes, sugiriendo cultivar este tipo de plantas con altas concentraciones de materia orgánica.

Los resultados de la capacidad antioxidante por el método DPPH se presentan en la Figura 6. La capacidad antioxidante máxima se obtuvo en las plantas cultivadas en campo donde se obtuvieron temperaturas entre 45 y 11 °C. También, se observó un efecto del sistema de riego al tener la concentración más alta en las plantas regadas con agua residual acuícola. Por otra parte, se observa un comportamiento común en los dos sistemas de cultivo: la capacidad antioxidante incrementa en la primera cosecha de muestra cuando las plantas son regadas con solución nutritiva, pero para la segunda cosecha se obtiene una capacidad antioxidante elevada en las plantas regadas con agua residual acuícola. Estos resultados demuestran que el tiempo de exposición del riego es importante para determinar en qué momento se debe cosechar. Asimismo, se atribuye este efecto por los cambios de temperatura de ambos sistemas de cultivo. Además, de acuerdo con Kulisic *et al.* [25] el porcentaje de inhibición medio de la concentración de fenoles en el orégano es de 0.4, es decir, la concentración g/L para el 50% de inhibición es de 0.4. Este resultado es menor al que se obtuvo en cada uno de los tratamientos, es decir, el tipo de cultivo (humedad relativa y temperatura ambiental) y el riego afectan positivamente la capacidad antioxidante por la donación de hidrógeno (método DPPH).

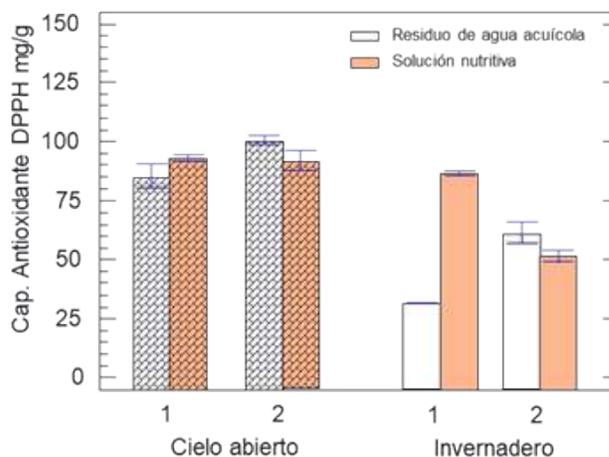


Figura 6. Capacidad antioxidante determinada por el método DPPH (mg eq. Trolox/g) en las plantas de orégano cultivada en diferentes condiciones. Los resultados se expresan en error estándar a 14, 28 días de muestreo.

La determinación de la capacidad antioxidante por el método de FRAP se realiza para evaluar el poder reductor de los compuestos fenólicos, así como de los flavonoides o cualquier compuesto que tenga esta actividad. Este método se determinó por la reducción del ion hierro (Fe^{3+} a Fe^{2+}) [26]. De acuerdo con esta determinación las plantas cultivadas en campo con oscilaciones de temperatura entre 45 y 11 °C y regadas con agua residual acuícola obtuvieron la capacidad antioxidante máxima. Sin embargo, no se observan diferencias significativas entre los dos tipos de riego. Por otro lado, se observa que la capacidad antioxidante tiende a incrementar en relación al tiempo de cultivo, es decir, entre más tiempo esté la planta sometida bajo el sistema de riego con agua residual acuícola, más puede seguir incrementando su capacidad antioxidante. La capacidad antioxidante más alta para este método resultó al día 28 de la experimentación.

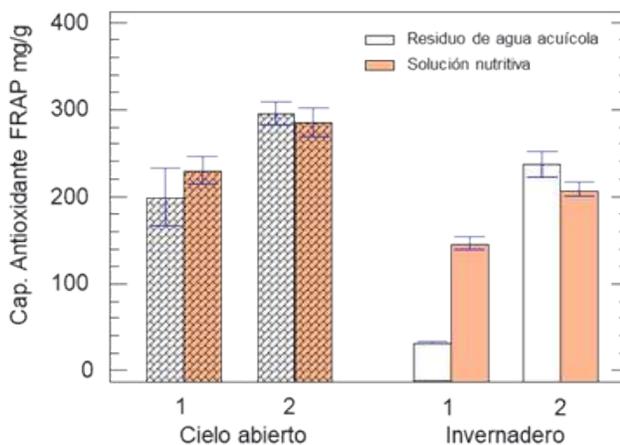


Figura 7. Capacidad antioxidante determinada por el método FRAP (mg eq. Trolox/g) en las plantas de orégano cultivadas bajo diferentes condiciones. Los resultados se expresan en error estándar a 14 y 28 días de muestreo

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, existe un efecto sobre la biosíntesis de compuestos fenólicos e incluso sobre la biosíntesis de flavonoides. Además, la capacidad antioxidante de estos compuestos depende de las condiciones ambientales a las que se

someten las plantas. Los mejores resultados de biosíntesis se presentan en las plantas cultivadas en condiciones oscilantes de temperatura y humedad relativa. El tipo de riego aplicado demostró ser un factor de impacto sobre la producción de los compuestos fenólicos. También se observó un efecto en el tiempo de exposición de las plantas a cada tipo de tratamiento.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto FOMIX CONACYT 2013-2015 "sistema productivo sustentable orientado a la seguridad alimentaria de poblaciones rurales del estado de Querétaro" por el apoyo de beca para estudios de licenciatura. De la misma manera, al laboratorio de bioingeniería de la Facultad de Ingeniería, campus Amazcala, de la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo académico.

REFERENCIAS

- [1] C. Huerta, "Orégano mexicano: Oro vegetal. Biodiversitas, vol. 3(15), pp. 8-13, 1997. [Online] Available: <http://www.biodiversidad.gob.mx/Biodiversitas/Articulos/biodiv15art2.pdf>
- [2] J. Rzedowski and G. R Calderón, Verbenaceae. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 100. Pátzcuaro, Michoacán, México: Instituto de Ecología, A. C. Centro Regional del Bajío, 2002.
- [3] C. Huerta, "Orégano mexicano. Oro vegetal," *Revista Biodiversitas*, vol. 15(30-38), 2002.
- [4] G. E. E. Villavicencio, A. Cano Pineda and G. C. X, *Metodología para determinar las existencias de orégano (Lippia graveolens H.B.K) en rodales naturales de Parras de la Fuente, Coahuila*. Saltillo, Coahuila: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2010.
- [5] J. F. Morton, *Atlas of medicinal plants of middle America: Bahamas to Yucatán*. Springfield: Charles C. Thomas, 1981.



- [6] C. M. Compadre, R. A. Hussain, I. León and R. G. Enríquez, "Volatile Constituents of *Montanoa tomentosa* and *Lippia graveolens*," *Planta Médica*, vol. 53(05), pp. 495-496, 1987. doi: 10.1055/s-2006-962781
- [7] X. A. Domínguez, V. H. Sánchez, M. Suárez, J. H. Baldas and M. R. González, "Chemical constituents of *Lippia graveolens*," *Planta Médica*, vol. 55(208), 1989.
- [8] K. Baser, "The Turkish *origanum* species," *Oregano, the Genera Origanum and Lippia*. London and New York: Taylor and Francis, pp. 109-126, 2002.
- [9] L. Z. Lin, S. Mukhopadhyay, R. J. Robbins and J. M. Harnly, "Identification and quantification of flavonoids of Mexican oregano (*Lippia graveolens*) by LC-DAD-ESI/MS analysis," *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 20, pp. 361-369, 2007.
- [10] A. M. García-Bores, A. M. Espinoza-González, A. Reyna-Campos, S. Cruz-Toscano, J. C. Benítez-Flores, C. T. Hernández-Delgado, S. Flores-Maya, M. Urzúa-Meza, I. Peñalosa-Castro, C. L. Céspedes-Acuña, y J. G. Avila-Acevedo, "*Lippia graveolens* photochemopreventive effect against UVB radiation-induced skin carcinogenesis," *Journal of photochemistry & photobiology, B: Biology*, vol. 167, pp. 72-81, 2017.
- [11] I. Potočnjak and R. Domitrović, "Carvacrol attenuates acute kidney injury induced by cisplatin through suppression of ERK and PI3K/Akt activation," *Food and Chemical Toxicology*, vol. 98, pp. 251-261, 2016.
- [12] A. Ávalos and C. E. Pérez-Urria, "Metabolismo secundario de plantas," *Reduca (Biología). Serie Fisiología Vegetal*, vol. 2(3), pp. 119-145, 2009.
- [13] D. Petinatti, S. Petinatti, M. Niehues y N. Pepporine, "Exogenous influences on plant secondary metabolite levels," *Animal Feed Science and Technology*, vol. 176, pp. 5-16, 2012.
- [14] H. C. Ko, J. Y. Lee, M. G. Jang, H. Song and S.-J. Kim, "Seasonal variations in the phenolic compounds and antioxidant activity of *Sasa quelpaertensis*," *Industrial Crops and Products*, vol. 122, pp. 506-512, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.031>
- [15] E. García-Pérez, F. F. Castro-Álvarez, J. A. Gutiérrez-Urbe and S. García-Lara, "Revisión de la producción, composición fitoquímica y propiedades nutraceuticas del orégano mexicano," *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 3, pp. 339-353, 2012.
- [16] CONAFOR, Fichas de información comercial de productos forestales. Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal, SEMARNAT. México, D.F, 2007.
- [17] X. Aguillar-Murillo, G. Valle-Meza, G. González-Rosales and M.-A. B, *Guía de cultivo de orégano*. La Paz, Baja California Sur, México, 2013.
- [18] H. A. Flores, J. A. Hernández, J. I. López, L. M. Valenzuela, M. Martínez and M. R.H., "Producción y extracción de aceite de orégano (*Lippia graveolens* Kunth) bajo cultivo en la comarca lagunera," *Revista Mexicana de Ciencia Forestal*, vol. 2, pp. 113-120, 2011.
- [19] W. Tezara, I. Coronel, A. Herrera, G. Dzib, K. Canul-Puc, L. M. Calvo-Irabién and G.-M. M., "Photosynthetic capacity and terpene production in populations of *Lippia graveolens* (Mexican oregano) growing wild and in a common garden in Yucatán peninsula," *Industrial Crops and products*, vol. 57, pp. 1-9, 2014.
- [20] J. Santos, M. Oliveira, E. Ibáñez and M. Herrero, "Phenolic profile evolution of different ready-to-eat baby leaf vegetables during storage," *Journal of Chromatography A*, vol. 1327, pp. 118-131, 2014.
- [21] O. Sytar, M. Zivcak, K. Bruckova, M. Brestic, I. Hemmerich, C. Rauh and I. Simko, "Shift in accumulation of flavonoids and phenolic acids in lettuce attributable to changes in ultraviolet radiation and temperature," *Scientia Horticulturae*, vol. 239, pp. 193-204, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.020>
- [22] R. L. Yavuzcan, J. Pirhonen, E. Mente, D. Domínguez and G. Parisi, "Fish Welfare

in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces-A Review," *Water*, vol. 13(9), 2017.

[23] S. Teles, J. A. Pereira, L. Muniz, R. Malheiro, S. Santiago, A. M. Lucchese y S. F., "Organic and mineral fertilitation influence on biomass and essential oil production, composition and antioxidant activity of *Lippia origanoides* H.B.K.," *Industrial Crops and products*, vol. 59, pp. 169-176, 2014.

[24] M. Zhang, G. Zhang, Y. You, C. Yang, P. Li and F. Ma, "Effects of relative air humidity on the phenolic compound's contents and coloration in the 'Fuji' apple (*Malus domestica* Borkh.) peel," *Scientia Horticulturae*, vol. 201, pp. 18-23, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.017>

[25] T. Kulisic, A. Radonic, V. Katalinic y M. Milos, "Use of different methods for testing antioxidative activity of oregano essential oil," *Food Chemistry*, vol. 85, pp. 633-640, 2004.

[26] E. E. Muñoz-Velázquez, K. Rivas-Días, M. G. F. Loarca-Piña, S. Mendoza-Díaz, R. Reynoso-Camacho and M. Ramos-Gómez, "Comparación del contenido fenólico, capacidad antioxidante y actividad antiinflamatoria de infusiones herbales comerciales," *Revista Nacional de Ciencias Agrícolas*, vol. 3-1, pp. 481-495, 2012.

DETECCIÓN DE ÁREAS DE PAVIMENTO EN IMÁGENES AÉREAS OBTENIDAS A TRAVÉS DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) UTILIZANDO FILTRO DE GABOR

Detection of pavement areas in aerial images obtained from
unmanned aerial vehicles (UAV) using Gabor filter

Silvia Patricia Salas Aguilar, Omar Chávez Alegría,
Donato Andrés Flores Espinoza

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
silvia_06_05@hotmail.com

RESUMEN

Este artículo presenta la detección de áreas de pavimento en imágenes aéreas capturadas por medio de un vehículo aéreo no tripulado comercial y utilizando para la segmentación el filtro de Gabor del *software* MATLAB, el cual realiza la segmentación de acuerdo con la textura. Primeramente se llevaron a cabo los vuelos para la captura de las imágenes, después el ortomosaico para mostrar el total de estudio así como la altura de vuelo que fue de 45.6 metros, después se seleccionaron algunas imágenes que tenían pavimento y otros objetos para hacer una comparación de la segmentación con un método manual y así calcular el área del pavimento con el procesamiento de imagen por medio del filtro de Gabor, teniendo como resultado el análisis de cinco imágenes diferentes con un error promedio de 3.16% entre ambos métodos.

Palabras clave: procesamiento de imágenes, filtro de Gabor, segmentación, MATLAB, UAV.

ABSTRACT

This paper presents the detection of pavement areas in aerial images captured by commercial unmanned aerial vehicle, using the Gabor filter of the MATLAB *software* for segmentation. The Gabor filter performs the segmentation according to the texture. First, flights were made to capture the images and the orthomosaic map was formed to show the total area of study; the flight height was 45.6 meters. Some images that contained pavement and other objects were selected afterwards to make a comparison of the segmentation between a manual method to calculate the pavement area and the image processing through the Gabor filter, resulting in the analysis of five different images with an average error of 3.16% between both methods.

Keywords: image processing, Gabor filter, segmentation, MATLAB, UAV.

INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados son un desarrollo tecnológico que facilita la adquisición de imágenes. La mayoría de estos presentan generalmente los mismos componentes de diseño, pero con diferentes características de operación que han sido cambiadas a lo largo del tiempo. A través de la literatura se encuentra información reciente y detallada de la utilización de estos sistemas y de los análisis históricos de estos equipos y cámaras [12]. Estos sistemas se conocen con diferentes nombres y acrónimos, por ejemplo, UAV (Unmanned Aerial Vehicle), RPAS (Remotely Piloted Aerial System), UAS (Unmanned Aerial System) o simplemente como drone [1].

Inicialmente, los sistemas UAV fueron usados para operaciones militares de reconocimiento de vuelos aéreos enemigos en los años cincuenta, con el objetivo de no poner en riesgo a los pilotos humanos [7]. Hoy en día, los sistemas UAV son utilizados para diversas aplicaciones, por ejemplo, para la vigilancia del tráfico urbano, el monitoreo de zonas agrícolas y forestales, el servicio de emergencias y desastres naturales, entre otros [14]. Por otra parte, algunos autores los emplean para monitorear deslizamientos horizontales y verticales de tierra en algunas zonas [6], [8], [15], [16], por lo que también pueden utilizarse para el monitoreo topográfico de áreas costeras [4]. En otros casos de estudio reciente, se inspeccionan algunos edificios y se identifican las grietas a través de las imágenes obtenidas con los sistemas UAV [3] [11]. De la misma manera, estas tecnologías han permitido tener acceso a ciertos tipos de información satelital a la cual se le puede asignar una posición geográfica, por ejemplo, la obtención de imágenes satelitales, bases de datos, navegadores GPS, entre otros, facilitando procedimientos para obtener y analizar la información a través de las imágenes de la superficie terrestre [9]. En [13] se realiza una investigación donde se hace un análisis histórico de la tecnología de los vehículos aéreos



no tripulados, así como la evolución y avance tecnológico de los equipos y las cámaras. Es así que se puede decir que actualmente los UAV han sido una herramienta que facilita la solución de diversas áreas de ingeniería con la ventaja de obtener datos desde un punto de vista aéreo de altitud baja, con alta precisión, en menos tiempo y a bajo costo [12].

Ahora bien, una imagen es definida como una función bidimensional $f(x,y)$ donde x y y son coordenadas espaciales, y la amplitud de f en cualquier par de coordenadas es llamado como la intensidad de la imagen en cualquier punto. El término de nivel de grises se refiere a la intensidad de las imágenes monocromas, mientras que las imágenes de color son la combinación de tres imágenes monocromas individuales (RGB) [5]. Las imágenes son consideradas como herramientas visuales que representan los objetos de la superficie terrestre; cada elemento llamado píxel, que contiene una imagen, tiene un valor asociado a una variable dada. El procesamiento de imágenes aéreas es el procedimiento que se le da a las imágenes mediante un ordenador. Estos procedimientos pueden ir de un nivel bajo como la corrección en la cual se disminuye el ruido o distorsiones, a un nivel medio como la segmentación o a un nivel alto de procesamiento como el reconocimiento de los objetos del terreno.

La segmentación subdivide una imagen en regiones dependiendo del problema que se esté resolviendo, con el objetivo de simplificar la representación de una imagen a otra más

significativa que facilite el proceso de análisis [5]. Los algoritmos de segmentación se basan en propiedades como la discontinuidad y la similitud. La primera tiene el objetivo de dividir la imagen de acuerdo con los cambios en su intensidad, por ejemplo en los bordes, mientras que la segunda propiedad se enfoca en que la división se base en las similitudes de cada uno de los píxeles de una región con el resto de la región en cuanto a alguna característica. Existen diferentes métodos para realizar la segmentación de las imágenes: detección de bordes, umbralización y basado en regiones [11] [10]. Estos métodos han sido estudiados y utilizados en la mayoría de los procedimientos de procesamiento digital.

Las funciones de Gabor fueron propuestas por primera vez por D. Gabor en acústica como método de análisis de señales en 1946. Estas funciones son paquetes de onda con una envolvente gaussiana, cuyas anchuras en ambos dominios minimizan el producto de incertidumbre. Los filtros de Gabor se han empleado en el procesamiento digital de imágenes, bajo el principio de análisis de textura que se conoce como enfoque de filtrado multicanal, en el cual se usan estadísticas simples de valores de grises como característica de textura. De la misma manera, el filtro de Gabor es un filtro paso banda que otorga información de las frecuencias espaciales de las imágenes para señales unidimensionales, así como su orientación. La forma general del filtro de Gabor se define por la siguiente ecuación.

$$h(x, y, \theta_k, \sigma_x, \sigma_y) = e^{-\frac{1}{2}(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2})} * e^{i(2\pi f + X_{\theta_k})} \quad \text{con } k=1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Donde

$$X_{\theta_k} = x * \cos(\theta_k) + y * \text{sen}(\theta_k)$$

$$Y_{\theta_k} = x * \text{sen}(\theta_k) + y * \cos(\theta_k)$$

f = la frecuencia sinusoidal plana

m = la cantidad de orientaciones

θ_k = la k -ésima orientación del filtro de Gabor

σ_x y σ_y = las desviaciones estándar de la envolvente Gaussiana en los ejes x y y .

Para utilizar el filtro de Gabor son necesarios dos parámetros: la longitud de onda y la orientación del filtro, en el que el primero son unidades en píxeles y el segundo en grados; los valores de orientación para la eficiencia computacional son 0, 45, 90 y 135°. Y para la longitud de onda de una matriz de imagen con un ancho de "N" número de píxeles, donde N es una potencia de 2 los valores de frecuencia son $(Nc/4) \sqrt{2}$, lo que garantiza que la banda de paso del filtro tenga la frecuencia radial más alta y caiga dentro de la matriz de la imagen.

Diversos estudios han utilizado el filtro de Gabor para el análisis de imágenes. En cuanto a ello, se puede utilizar el filtro de Gabor en conjunto con los códigos BSIF para el reconocimiento de las características de la palma de la mano, usando orientaciones de 0° y 90°, y longitudes de onda de 5 y 10 píxeles [17]. En otros estudios se realiza la segmentación automática de las arterias coronarias usando el filtro de Gabor y la umbralización basada en la optimización multiobjetivo, usando ángulos de orientación de 0° y 45°, y longitudes de onda de 5, 10 y 20 píxeles [2]. En [15] se realizó la identificación de matrículas de vehículos a través del filtro de Gabor, primeramente, teniendo detectada la placa del vehículo y después la extracción del número de placa, probado con 718 imágenes y teniendo una detección de 97.9% correcta y 2.1% de error.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta para este artículo se muestra en la Figura 1.

El primer paso consiste en determinar la ruta del vuelo en la zona de estudio (Figura 2), indicando la altura con la cual se realizará la operación y teniendo en cuenta los objetos que puedan interrumpir el vuelo como las antenas de comunicación, los árboles y los espectaculares de la zona. Para la captura de imágenes con drones se deben considerar algunos aspectos previos: el equipo que se va a utilizar, la altu-

ra de la captura de las imágenes, la zona de despegue y de aterrizaje, condiciones climáticas, etcétera. Para este estudio se empleará el equipo Phantom 3 Pro que tiene una cámara de 12.4 megapíxeles.

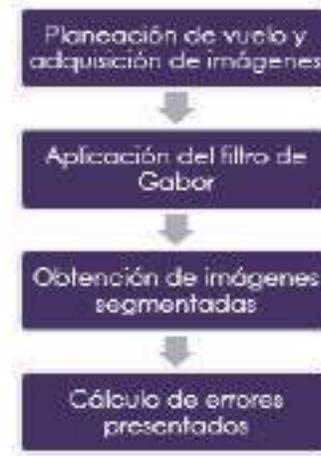


Figura 1. Metodología



Figura 2. Área de vuelo dentro del municipio de Querétaro

Figura 2. Área de vuelo dentro del municipio de Querétaro

El siguiente paso es la aplicación del filtro de Gabor que se encuentra dentro de los códigos del *software* MATLAB y puede ser aplicado a las imágenes, modificando algunas variables debido a que la precisión depende del valor de la longitud de onda y de la orientación de la imagen. En el método de segmentación con el filtro Gabor, se identifican regiones con base en en la similitud de las texturas. A continuación, se describen los pasos para la segmentación:



1. Convertir la imagen a escala de grises
2. Asignar una variable independiente para el tamaño de columnas y filas de la imagen
3. Calcular la longitud de onda mínima y máxima para obtener la longitud de onda de la imagen
4. Asignar valores para el ángulo de orientación
5. Realizar el filtro de Gabor y calcular la magnitud de respuesta para el filtro
6. Asignar una variable para las matrices del número de columnas y filas (x , y)
7. Realizar una matriz *meshgrid* basada en las coordenadas de los vectores filas (x) y columnas (y).
8. Enlazar las matrices como un conjunto de características a lo largo de una dimensión. En este caso el valor de la dimensión sería 3 y las matrices serían la resultante del filtro de Gabor y las coordenadas de filas y columnas.
9. Calcular el número de píxeles de la imagen a través de una variable en la cual se multiplica el número de filas por el número de columnas de la imagen.
10. Con la función *reshape*, redimensionar o cambiar la forma de la matriz del conjunto de características y el número de píxeles, dejando el tamaño de la nueva dimensión con [] para que se calcule automáticamente, de modo que la cantidad de elementos de número de píxeles coincida con la cantidad de elementos del conjunto de características.
11. Con la función *bsxfun*, normalizar las características para que sean de media cero, primero restando el promedio o media de la columna de los elementos de la matriz en sí y segundo dividiendo la matriz entre la desviación estándar.
12. Después se procede a visualizar los componentes principales de los datos sin procesar para tener una idea de cómo son las características de magnitud de Gabor, donde las filas corresponden a las observaciones y las columnas a las variables.
13. Redimensionar nuevamente la matriz, ahora todas las filas de los principales componentes con la primera columna de la matriz.
14. En el siguiente paso, la única información previa asumida en este ejemplo es la cantidad de distintas regiones de textura de la imagen que se segmenta. Se repite el agrupamiento de k-means

cinco veces para evitar mínimos locales al buscar medios que minimicen la función objetivo. Además, en este punto se convierte la matriz en una imagen de color RGB con el fin de visualizar las regiones etiquetadas. La función *label2rgb* determina el color que se asigna a cada objeto en función del número de objetos en la matriz.

15. Por último, devolver una matriz de ceros, con la misma clase, dispersión y complejidad. Se asigna una variable que es igual al número de regiones a segmentar y, con la función *repmat*, se organizan las copias de la matriz en cada dimensión

El proceso de segmentación por el método de Gabor se lleva a cabo a través de la división de regiones y de acuerdo con la textura dentro de la imagen. Es por esto que dependiendo de la imagen, existe un margen de error. Para este método se ha hecho la evaluación de diez imágenes para calcular el error promedio al aplicar el filtro de Gabor para segmentación de imágenes aéreas. Este proceso se realiza en el *software* Image J, donde se calcula manualmente el área de pavimento y el área de lo que no es pavimento dentro de la imagen real, y se compara con el área que se considera pavimento y no pavimento después del proceso de segmentación a través del Filtro Gabor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cubrir el área de estudio se propuso dividir la captura de imágenes en cuatro vuelos, debido a que la duración máxima de las baterías de este equipo es de 23 minutos y uno solo no sería suficiente para abarcar toda el área. Después de haber hecho el levantamiento, se obtuvieron 588 imágenes mostradas en la Figura 3, con una altitud media de vuelo de 45.6 metros y una resolución de las imágenes de 1.7 cm/pix y 0.157 km² de superficie cubierta.

En el siguiente paso se realizó una selección de algunas imágenes, a las cuales se les aplicó el filtro de Gabor para analizar el error de segmentación. Se realizó por dos regiones

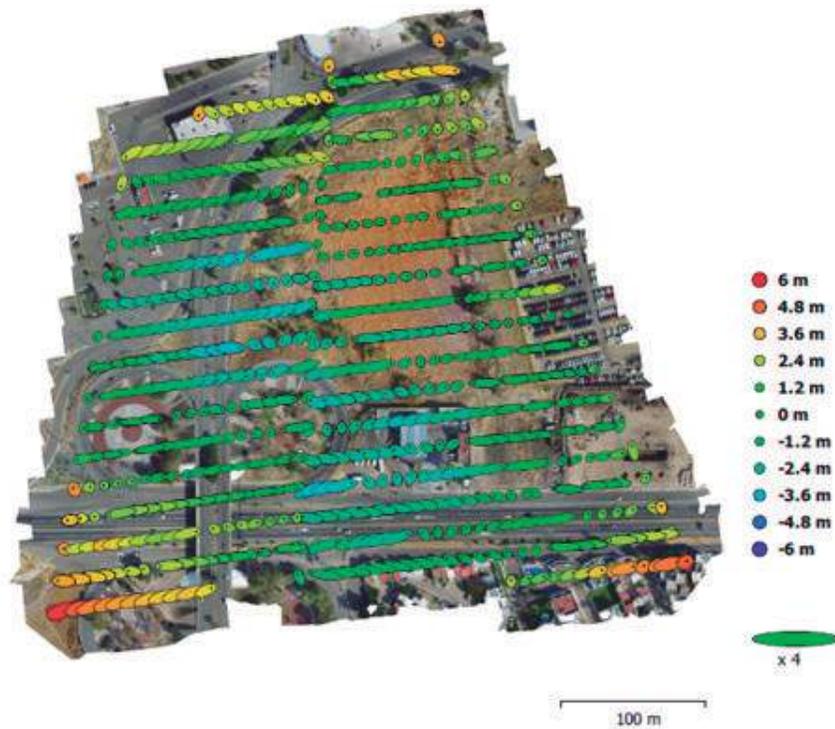


Figura 3. Posicionamiento de las cámaras y estimación de errores. El color representa el error en Z, y la forma y tamaño de la elipse indican el error en XY.

para identificar dentro de la imagen las áreas pavimentadas y todo lo que no es pavimento. Las imágenes segmentadas comparadas con las originales se presentan en las Figuras 4, 5, 6, 7 y 8. Cabe mencionar que la aplicación del filtro por medio del código en MATLAB se lleva a cabo para cada imagen, debido a que es un procesamiento largo que toma tiempo y depende también del tamaño de la imagen, por lo cual como primer paso se hace una reducción del 25% del tamaño original, teniendo imágenes con menor número de píxeles que facilitan el proceso.

Después del proceso en MATLAB se realizó una segmentación manual para hacer una comparación numérica entre la aplicación del filtro de Gabor, considerando el área total de pavimento y lo que se logra segmentar con el filtro para tener como resultado el porcentaje de error del proceso de segmentación. Los resultados de esta comparación se presentan en la Tabla 1.

En la Figura 4 se puede observar que se realiza mejor la segmentación debido a que se encuentran edificios y pavimento, y las textu-

ras de éstos son diferentes. Ambos se encuentran en dos regiones diferentes y es por esto que se tiene un error de 2.56%.

La Figura 6 muestra cómo casi toda el área de pavimento queda segmentada por medio del filtro, sin embargo, el error con respecto a la segmentación manual es de 4.99%, similar a este caso es la figura 5, en la cual no se logra segmentar parte de lo que no es pavimento debido a la similitud entre la textura del pavimento y la del acotamiento. Es ahí donde se presentan mayores errores ya que seguramente se considera dentro de la región de textura de pavimento cuando realmente no lo está, es por esto que el error de segmentación en esta imagen es el mayor con 5.16%. La Figura 7 es la imagen con menor error obtenido, debido a que los objetos presentados en la imagen son pavimento, vehículos y vegetación, los cuales tienen texturas muy distintas. En esta imagen se tiene un 0.72% de error de segmentación. En la Imagen 8, además del pavimento, se observan edificios y vegetación, por lo cual el error presentado entre la técnica manual y la aplicación del filtro es de 2.36%.



Figura 4. Imagen 1 a) Imagen original b) Imagen segmentada



Figura 5. Imagen 2 a) Imagen original b) Imagen segmentada



Figura 6. Imagen 3 a) Imagen original b) Imagen segmentada



Figura 7. Imagen 4 a) Imagen original b) Imagen segmentada



Figura 8. Imagen 5 a) Imagen original b) Imagen segmentada

Tabla 1. Resultados de segmentación pavimento filtro de Gabor

	Área total (m)	Área pavimento medido manualmente (m)	Área segmentada pavimento (m)	Error (%)
Imagen 1	3799.345	2514.331	2611.407	2.56%
Imagen 2	4762.275	3817.862	4063.367	5.16%
Imagen 3	2888.152	1864.95	1720.898	4.99%
Imagen 4	2888.152	2,135.44	2114.508	0.72%
Imagen 5	4989.22	3609.145	3491.158	2.36%
			Promedio de error	3.16%



CONCLUSIONES

En este artículo se describe y analiza otra aplicación útil de los sistemas aéreos no tripulados. La adquisición de información a través de estos equipos demuestra tener alta resolución y ofrece otras ventajas como la facilidad de adquirir imágenes aéreas en menor tiempo y de manera segura. Es necesario mencionar la importancia de la implementación de estos sistemas debido a que ofrecen información georreferenciada y con una buena precisión geográfica, conjuntamente, son equipos cada vez más comunes y, por tanto, se pueden encontrar de manera económica.

El pavimento puede ser detectado con la aplicación del filtro de Gabor en las imágenes aéreas de manera exitosa, considerando que el error obtenido en las imágenes de prueba es menor del 5%, así mismo este tipo de análisis se puede realizar para otros estudios, ya que utilizar este filtro no es tan común para los procesos de segmentación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por su apoyo durante toda esta investigación, así como al laboratorio de mecánica de suelos y resistencia de materiales de la Universidad Autónoma de Querétaro por la proporción del equipo UAV para realizar este estudio.

REFERENCIAS

[1] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial system for photogrammetry and remote sensing: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 92, pp. 79-97, 2014.

[2] I. Cruz, F. Oloumi, R. Rangayyan, J.C. Aviña and A.A. Hernández, "Automatic segmentation of coronary arteries using Gabor filters and thresholding based on multiobjec-

tive optimization," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 25, pp. 76-85, 2016.

[3] C. Eschmann, C.M. Kuo, C.H. Kuo and C. Boller, "Unmanned Aircraft Systems for Remote Building Inspection and Monitoring," *6th European Workshop on Structural Health Monitoring*, pp. 1-8, 2012.

[4] J. Gonçalves and R. Henriques, "UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 104, pp. 101-111, 2015.

[5] R. C. Gonzalez, R. E. Woods and S. L. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*. Estados Unidos: Editorial Gatesmark Publishing, 2009.

[6] A. Lucieer, S. M. Jong and D. Turner, "Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography," *Progress in Physical Geography*, vol. 38, no. 1, pp. 97-116, 2014.

[7] F. Nex, and F. Remondino, "UAV for 3D mapping applications: a review," *Applied Geomatics*, vol. 6, no. 1, pp. 1-15, 2013.

[8] U. Niethammer, M. James, S. Rothmund, J. Travelletti, and M. Joswig, "UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results," *Engineering Geology*, vol. 128, pp. 2-11, 2011.

[9] V. Olaya, *Sistemas de Información Geográfica*. España: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014.

[10] N. S. Palomino and U. C. Román, "Técnicas de Segmentación en Procesamiento digital de Imágenes," *Revista de Ingeniería de sistemas e informática*, vol. 6, no. 2, pp. 9-16, 2009.

[11] F. C. Pereira and C. E. Pereira, "Embedded Image Processing Systems for Automatic Recognition of Cracks using UAVs," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no.10, pp. 16-21, 2015.

[12] H. Ping Hu, W. Bin Wu and Q. Lin Tan, "Application of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing for Geological Disaster Reconnaissance Along Transportation Lines: A Case Study," *Applied Mechanics and Materials*, pp. 2376-2379, 2012.

[13] A. Samad, N. Kamaruizaman, , M.H. Asyraf, T.M. Aslamiah, and K.H. Afendy, "The Potential of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Civilian and Mapping Application", 3rd International Conference on System Engineering and Technology, pp. 19-20, 2013.

[14] S. Siebert and J. Teizer, "Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system," Automation in Construction, vol.41, pp. 1-14, 2014.

[15] V. Tadic, M. Popovic and P. Odry, "Fuzzified Gabor filter for license plate detection", Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 48, pp. 40-58, 2016.

[16] D. Turner, A. Lucieer and S. M. Jong, "Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)," Remote sensing, vol. 7, pp. 1736-1757, 2015.

[17] A. Younesi and M. A. Chehel, "Gabor Filter and Texture based Features for Palm-print Recognition," International Conference on Computational Science, vol. 108, pp. 2488-2495, 2017.

EFECTO DE EXTRUSIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS EN BOTANAS DE TERCERA GENERACIÓN ENRIQUECIDAS CON PROTEÍNA VEGETAL

The Effect of Extrusion on the Physicochemical Properties of third generation
snacks enriched with vegetal protein

L. M. Ávalos-Esparza, M. Gaytán-Martínez, M. de la L. Reyes-Vega,
E. Morales-Sánchez, M. Contreras-Padilla, J. O. Valencia-Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
monthse_10@hotmail.com

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el efecto del las variables de procesamiento de extrusión como temperatura de la zona A y de la zona B del extrusor (80-120 °C), contenido de humedad (50-55%) y contenido de garbanzo (25-25%), sobre las propiedades fisicoquímicas de extrudidos con proteína vegetal como índice de expansión, densidad aparente y dureza, a través del uso de un diseño factorial fraccionado. Se observó que hubo efecto de todas las variables sobre las propiedades fisicoquímicas de los extrudidos y se encontró que, para el índice de expansión, las mejores condiciones de procesamiento fueron 100 °C en la zona A, 110 °C en la zona B, 60% de humedad y 25% de garbanzo, mientras que, para la densidad aparente, las mejores condiciones de procesamiento fueron 100 °C en la zona A, 110 °C en la zona B, 50% de humedad y 25% de garbanzo. La textura se vio afectada por la temperatura, humedad y cantidad de garbanzo. Las características deseables como alta expansión, baja densidad aparente y dureza se obtuvieron a altas temperaturas de procesamiento, alta humedad y baja concentración de garbanzo. El experimento factorial fraccionado permitió reducir el tamaño del experimento para posteriores investigaciones.

Palabras clave: diseño e innovación, extrusión, botanas, tercera generación, trigo, garbanzo

ABSTRACT

In this research, the effect of extrusion processing variables, (temperature of zone A and zone B of the extruder, (80-120 °C), moisture content (50-55%) and chickpea content (25-25%), on the physicochemical properties of extruded products with vegetable protein were evaluated, (expansion index, bulk density and hardness), using a fractional factorial design. It was observed that there was an effect of all the variables on the physicochemical properties of

the extrudates. It was found that, for the expansion index, the best processing conditions were 100 °C for the zone A, 110 °C for the zone B, 60% of moisture content and 25% of chickpea, while, for bulk density, the best processing conditions were 100 °C for the zone A, 110 °C for the zone B, 50% of moisture content and 25% of chickpea, moreover, the texture was affected by temperature, moisture content and amount of chickpea. The desirable characteristics (high expansion, low bulk density, and hardness) were obtained at high processing temperatures, high moisture and low concentration of chickpea. The fractional factorial experiment allowed to reduce the size of the experiment for further investigations.

Keywords: Design and innovation, extrusion, snack, third-generation, wheat, chickpea.

INTRODUCCIÓN

En el mercado se elabora una amplia variedad de botanas, entre las que se encuentran las botanas de tercera generación, conocidas como "productos semielaborados" o "pellets", que tienen la ventaja de conservar su calidad sin deterioro durante largos periodos, además de que requieren menor espacio de almacenamiento [1]. Actualmente la industria de botanas presenta una tendencia en su procesamiento, cuya finalidad es aumentar el valor nutrimental, mediante la adición de componentes funcionales y nutraceúticos como pudieran ser las leguminosas [2].

El garbanzo es una de las leguminosas más importantes en México [3], debido a que es buena fuente de minerales, tiene grasas esenciales, altos contenidos de fibra y es una importante fuente de proteína con aminoácidos esenciales [4]. Otra fuente importante de proteína es la soya, cuyos subproductos pueden contener hasta 90% de proteína [5], de buena calidad y bajo costo [6].

Sin embargo, añadir ingredientes alternativos con altos contenidos de proteína en las formulaciones de las botanas, puede afectar



la textura, expansión y aceptabilidad general del producto extruido, como es el caso de las botanas [7], [8], [9]. Ante ello, la tecnología de extrusión permite cambiar la textura y las características estructurales de los productos [8]. Este proceso involucra la aplicación de altas temperaturas en tiempos cortos (HTST), que convierte la masa de harinas de cereales y leguminosas en un fluido de muy alta viscosidad [10], permite conservar componentes como fibra, minerales y otros compuestos funcionales, y reduce microorganismos en los materiales de origen [1], [11].

En un estudio realizado por Aguilar [12], se optimizó un proceso de extrusión para la obtención de pellets expandidos a base de almidón de papa, maíz con alto contenido de proteína y harina de soya, utilizando un extrusor de tornillo simple, con tres zonas de calentamiento. Los autores obtuvieron mayor índice de expansión cuando la temperatura de barril estuvo en un rango de temperatura de 123 a 140 °C y la humedad entre 27 y 31%. Chaiyakul [7] observó que la adición de proteínas de maíz a un extrudido de almidón de arroz redujo la expansión y extensibilidad de los productos, además de que la dureza estuvo influenciada por la cantidad de proteína añadida.

Conforme a lo anterior, este trabajo tiene como objetivo determinar el efecto de las variables del proceso de extrusión como el contenido de garbanzo, la humedad de alimentación y la temperatura de procesamiento sobre las propiedades fisicoquímicas relacionadas con la obtención de expandidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

La harina de trigo comercial, utilizada en este estudio, contenía 5 g/100 g de humedad, 10 g/100 g de proteína, 1 g/100 g de grasa, 4 g/100g de fibra, 3 g/100 g de ceniza y 77 g/100 g de carbohidratos. Se utilizó harina de garbanzo (Nuevo León, México) que conte-

nía 13 g/100 g de humedad, 20 g/100 g de proteína, 7 g/100g de grasa, 15 g/100 g de fibra, 4 g/100g de ceniza y 41 g/100g de carbohidratos. Los extrudidos se desarrollaron en CICATA-IPN, Querétaro.

Diseño experimental

Se aplicó un diseño factorial fraccionado, con cuatro variables independientes, temperatura de extrusión en zona A (X_1), temperatura de extrusión en zona B (X_2), contenido de humedad del material de alimentación (X_3) y cantidad de garbanzo (X_4). Las variables dependientes que se midieron fueron índice de expansión, densidad aparente dureza. Se realizaron 15 tratamientos, cada uno por duplicado (véase Tabla 1).

Proceso de extrusión

El proceso de extrusión se realizó con un extrusor de tornillo simple (CICATA-IPN, Qro., patente MX/a/2007/016262) con una relación L/D=21 mm, una longitud de canal de 18 mm y una profundidad de canal de 3 mm. El extrusor cuenta con dos zonas de calentamiento, con un dado de acero inoxidable y una ranura rectangular de 2 mm de ancho por 10 mm de largo, facilitado por CICATA-Unidad Querétaro. Las temperaturas en las zonas de calentamiento se manejaron entre 80 y 120 °C, mientras que la velocidad del tornillo fue de 5 rpm.

Una vez extrudido el material, se cortó en cuadros de aproximadamente 1.5x1.5 cm. Las piezas se deshidrataron en un secador Excalibur de nueve bandejas, (modelo 2900ECB, California, Estados Unidos) a 52 °C durante 24 h para obtener los pellets.

Proceso de expansión

Los pellets extrudidos se expandieron en una máquina Sunbeam (modelo FPSBPP7052) que funciona con una turbina que genera aire caliente a una velocidad de 2 m/s, a 280 °C durante 30-50 s de exposición al flujo turbulento.

Tabla 1. Diseño experimental con variables codificadas utilizadas para producir botanas extrudidas expandidas.

Tratamiento	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	+1	-1	+1	-1
2	+1	+1	-1	+1
3	-1	+1	+1	-1
4	+1	-1	+1	+1
5	+1	+1	-1	+1
6	+1	+1	+1	-1
7	-1	+1	+1	+1
8	-1	-1	+1	+1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	-1
11	-1	+1	-1	-1
12	+1	-1	-1	-1
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

X₁=Temperatura zona A; X₂=Temperatura zona B; X₃=Humedad del material de alimentación;
X₄=Contenido de garbanzo

Índice de expansión

El índice de expansión (IE) se determinó utilizando el método reportado por Penfield y Campbell [19]. La determinación se basa en el volumen desplazado de semilla de mijo, por los *pellets* expandidos y sin expandir. El IE se determinó restando el volumen inicial, es decir, el volumen de la semilla desplazada por los *pellets* sin expandir, al volumen final, es decir, el volumen de la semilla desplazada por los *pellets* expandidos, y dividiendo éste entre el volumen inicial. El proceso se realizó por duplicado para cada tratamiento.

Densidad aparente

La densidad aparente (DA) se determinó mediante el método de desplazamiento de volumen. Se pesó la cantidad de extrudidos necesarios para llenar un recipiente de 250 ml. Los extrudidos se añadieron aleatoriamente al recipiente y el recipiente se agitó varias veces durante el llenado. Para encontrar la densidad aparente del producto, se dividió

el peso de los extrudidos entre su volumen, los resultados se registraron en kg/m³.

Dureza

La dureza de los extrudidos se determinó usando un texturómetro TA.XT plus (de Alemania), con una sonda cónica de 30° (TA-17). La dureza (en Newtons) se determinó midiendo la fuerza máxima requerida para romper las muestras. Se realizaron 6 repeticiones de cada tratamiento.

Diseño y análisis estadístico

Las variables independientes evaluadas fueron la temperatura de la zona A (X₁), temperatura de la zona B (X₂), contenido de humedad del material de alimentación (X₃) y cantidad de garbanzo (X₄), los niveles de variación fueron 80, 90 y 100 °C, 100, 110 y 120 °C, 50, 55 y 60% y 25, 30 y 35%, respectivamente. Se realizó un análisis factorial fraccionado para encontrar los factores más significativos del proceso de elaboración de extrudidos con



garbanzo. La significancia del modelo se justificó mediante el análisis de la varianza (prueba F), y el efecto del índice de expansión se observó a través de la metodología de superficie de respuesta.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se determinó el efecto de las variables del proceso de extrusión, temperatura de extrusión de zona A (X_1) y zona B (X_2), contenido de humedad del material de alimentación (X_3) y cantidad de garbanzo (X_4), sobre los parámetros fisicoquímicos de las botanas de tercera generación con garbanzo.

Efecto de las variables de extrusión sobre el índice de expansión de los extrudidos

Los valores de índice de expansión (IE) de los extrudidos estuvieron en el rango de 0.12 a 0.62 (véase Tabla 2). El modelo de predicción utilizado explicó el 88% de la variación total ($p \leq 0.000$) para los valores del IE (véase Tabla 3). En la Figura 1, se observa que las variables de temperatura de zona A, zona B, humedad y cantidad de garbanzo influyen sobre el IE de las botanas de tercera generación.

Se observó que el IE aumentó ligeramente al incrementar la temperatura de la zona A de calentamiento por encima de los 90 °C, y mantener la temperatura de la zona B

Tabla 2. Diseño factorial fraccional con valores de variables independientes y dependientes de los extrudidos expandidos

Tratamiento	Variables independientes				Variables dependientes		
	X_1	X_2	X_3	X_4	IE	D _{Ap} (kg/m ³)	Dureza (N)
1	100	110	60	25	0.62±0.08	633.79±103.39	38.06±8.25
2	100	120	50	35	0.12±0.02	816.24±14.61	34.84±9.37
3	80	120	60	25	0.25±0.09	721.64±30.52	44.88±8.75
4	100	110	60	35	0.46±0.12	651.11±44.88	35.09±7.65
5	100	120	50	35	0.25±0.06	748.76±6.84	48.69±10.40
6	100	120	60	25	0.47±0.05	641.67±14.71	42.00±8.71
7	80	120	60	35	0.14±0.06	815.91±20.52	26.05±11.76
8	80	110	60	35	0.20±0.07	727.39±36.23	22.28±9.73
9	80	110	50	35	0.15±0.10	742.98±26.75	30.90±5.87
10	100	110	50	25	0.44±0.09	609.19±32.13	37.99±5.13
11	80	120	50	25	0.30±0.05	713.98±30.69	36.32±8.17
12	80	110	50	25	0.15±0.06	738.83±70.44	30.64±9.99
13	90	115	55	30	0.34±0.04	684.41±12.80	35.44±7.89
14	90	115	55	30	0.35±0.06	682.40±22.05	31.54±5.72
15	90	115	55	30	0.33±0.03	689.34±43.13	36.37±8.35

IE=Índice de expansión; D_{Ap}=Densidad aparente; D=Dureza.
Los valores se muestran como la media ± la desviación estándar.

Tabla 3. Análisis de varianza para las variables respuesta analizadas

Variable respuesta	r ²	r ² ajustada	r ² predicha	Valor F	Valor P
IE	0.88	0.81	0.63	12.84	0.000
DAp	0.81	0.70	0.38	7.34	0.000
D	0.68	0.48	0.20	3.53	0.009

IE = Índice de expansión; DAp = Densidad aparente; D=Dureza. (*P > 0.05).

por debajo o igual a 115 °C. El IE disminuyó cuando incrementó la cantidad de harina de garbanzo en los diferentes tratamientos. Resultados similares fueron reportados por algunos autores que adicionaron diferentes fuentes de proteína como soya desengrasada y harina de garbanzo, a botanas directamente expandidas y obtuvieron como resultado de su adición productos menos expandidos y de mayor densidad aparente y dureza [8] [13].

Los gráficos de superficie (Figura 1) muestran el efecto combinado de las condiciones de extrusión respecto al IE. La Ecuación 1 de regresión en unidades codificadas es:

$$IE = -23.12 + 0.1805X_1 + 0.1722X_2 + 0.1006X_3 + 0.1698X_4 - 0.0004X_1 X_1 - 0.0009X_1 X_2 + 0.0005X_1 X_3 - 0.0006X_1 X_4 - 0.0011X_2 X_3 - 0.0009X_2 X_4 - 0.0002X_3 X_4 \quad (1)$$

Donde

X₁ = Temperatura zona A

X₂ = Temperatura zona B

X₃ = Humedad del material de alimentación

X₄ = Contenido de garbanzo.

Yovchev *et al.* [14] estudiaron la influencia de los parámetros de extrusión en las propiedades físicas de productos directamente expandidos, de garbanzo y cebada. Los autores mencionan que, para los extrudidos de garbanzo, la expansión se vio principalmente afectada por el contenido de humedad y la temperatura del dado, mientras que para los extrudidos de cebada los factores

que tuvieron efecto significativo en la expansión fueron la humedad y velocidad de tornillo. Los autores concluyen que la expansión podría aumentar, proporcionalmente con la temperatura y el contenido de humedad del material de alimentación.

Otros autores [15] estudiaron el efecto de extrusión a baja humedad sobre la expansión y otros factores, de un producto directamente expandido, a base de aislado de proteína de chícharo. Los productos se procesaron a humedades de entre 26 y 35%, y temperaturas de barril de entre 130 y 170 °C, pero obtuvieron mayor expansión a temperatura intermedia (140 a 150 °C) y baja humedad (26%), contrario a los resultados del presente estudio, sin embargo, las condiciones de trabajo reportadas fueron para botanas de segunda generación.

Nascimento, Calado y Carvalho [16] determinaron el efecto de la temperatura de extrusión y del contenido de grano gastado resultante de la manufactura de cerveza (BSG) sobre las propiedades físicas y las características de textura de extrudidos de arroz, directamente expandidos. La expansión se redujo cuando aumentó el contenido de BSG, lo cual se atribuye a la composición del grano, principalmente al alto contenido de proteína (21.78 g) y al bajo contenido de almidón (10.81 g), debido a que este último es el principal componente, y responsable de la expansión por sus propiedades de gelatinización [17], además de que contribuye a otras características del producto final como la dureza, crujencia, entre otras [18].

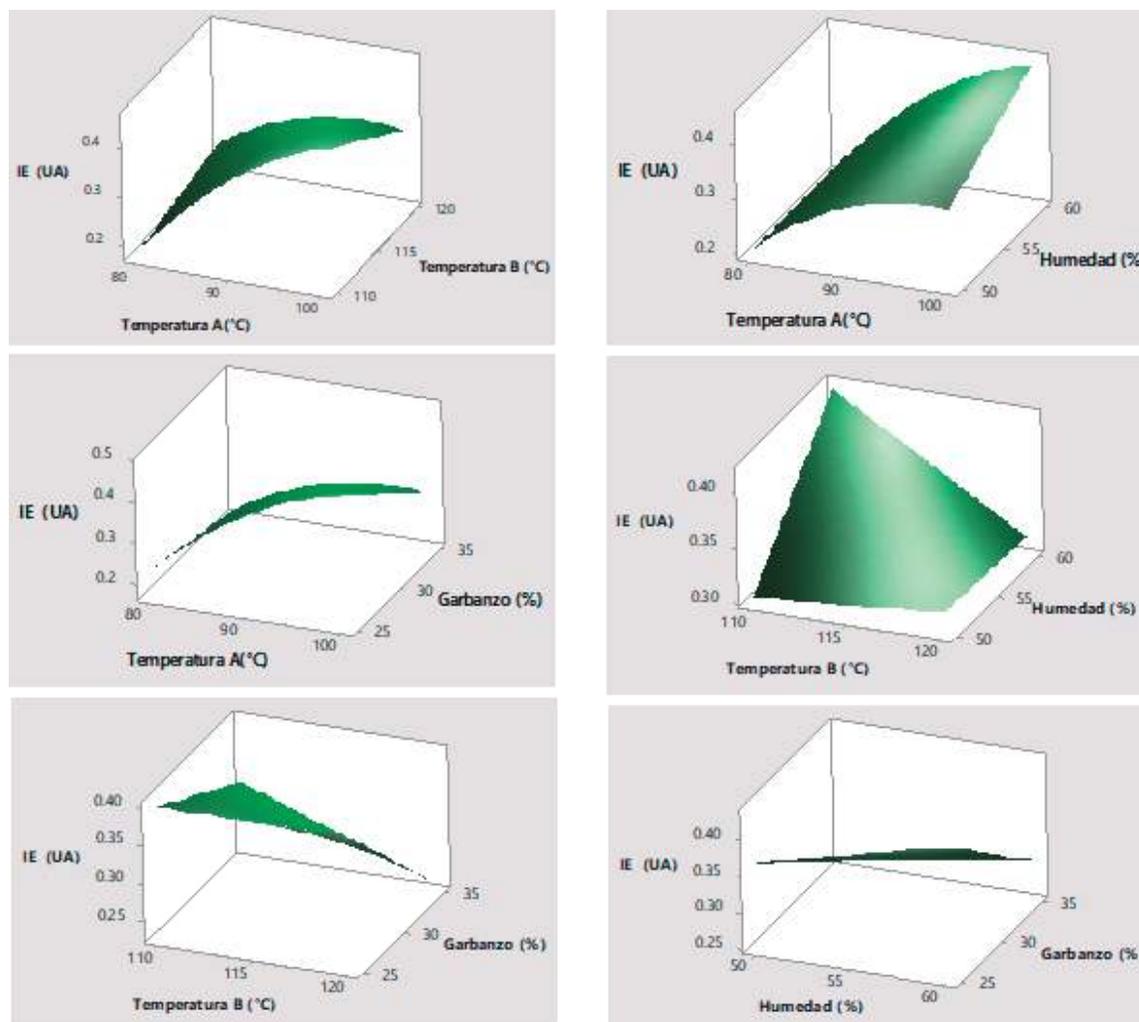


Figura 1. Diagrama de superficie para los efectos combinados de las variables dependientes sobre el índice de expansión (IE) de los extrudidos.

Efecto de las variables de extrusión sobre la densidad aparente de los extrudidos

Los valores de densidad aparente (DAP) de los extrudidos estuvieron en el rango de 609.19 a 816.24 kg/m³ (véase Tabla 2). El modelo de predicción utilizado explicó el 81% de la variación total ($p \leq 0.000$) para la DAP (véase Tabla 3). Se observó que existen diferencias significativas entre los tratamientos sobre la densidad aparente.

La densidad aparente de los extrudidos aumentó cuando también lo hizo la cantidad de harina de garbanzo. Bastos-Cardoso *et al.* [10] reportan que la incorporación de fibra y

proteína en los extrudidos da como resultado productos de mayor densidad aparente, por lo que los resultados del presente trabajo pueden atribuirse al efecto de la proteína del garbanzo. Sharma *et al.* [20] señalan que si el calor no es suficiente (baja temperatura de extrusión) o la humedad del material de alimentación es alta el producto obtenido es más denso y menos expandido, sin embargo, otros estudios indican que el aumento de densidad puede atribuirse al aumento de la gelatinización del almidón a consecuencia del aumento de la temperatura de procesamiento [21]. La densidad de los extrudidos indica la expansión y la estructura de células y poros en los mismos.

En este trabajo, se observa que las condiciones de procesamiento como la humedad de alimentación y temperatura, y materias primas en la formulación como la harina de garbanzo afectan directamente sobre la densidad de los extrudidos. Algunos autores han reportado que temperaturas altas de procesamiento ($> 135\text{ }^{\circ}\text{C}$) pueden influir sobre la degradación del almidón, lo que proporcionará productos con alta densidad aparente y baja expansión [1], [21], [22], [23], [24].

Efecto de las variables de extrusión sobre la densidad aparente de los extrudidos

Los valores de dureza de los extrudidos estuvieron en el rango de 22.28 a 48.69 N (véase Tabla 2). El modelo de predicción utilizado explicó el 68% de la variación total ($p \leq 0.009$) para la dureza (véase Tabla 3). Se observa que existen diferencias significativas entre los tratamientos. La máxima dureza se observó cuando la cantidad de garbanzo fue de 35%.

La fuerza máxima indica la dureza de los extrudidos. El incremento de la cantidad de harina de garbanzo en las formulaciones aumentó la dureza del producto, misma que se relaciona con la expansión, debido a que a medida que el producto se vuelve más duro tiende a expandirse menos [13]. Los extrudidos con menor dureza resultaron quebradizos, es decir, que la fuerza de ruptura aumentó debido a las condiciones de procesamiento. Por otro lado, el incremento de la dureza con respecto a la temperatura puede atribuirse al grado de gelatinización y degradación del almidón [23].

CONCLUSIONES

Se utilizó un experimento factorial fraccionado para reducir selectivamente el tamaño del experimento y evaluar el efecto de las posibles combinaciones de las variables de interés. Se observó que las propiedades fisicoquímicas evaluadas se vieron afectadas por las variables de procesamiento. A medida que aumentó la

cantidad de garbanzo añadido, se redujo la expansión de los extrudidos, aumentando la densidad aparente y la dureza. Las temperaturas que permitieron obtener un mejor grado de expansión fueron 100 y $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, en las zonas A y B, respectivamente, con un 60% de humedad. Para posteriores trabajos, se fijó la cantidad de garbanzo a 25%, de acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo, para la optimización del experimento y el mejoramiento de la calidad de los extrudidos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo económico brindado durante el periodo del programa de maestría. A la Universidad Autónoma de Querétaro, mi alma máter, por la oportunidad de emprender y finalizar mis estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- [1] C. Delgado-Nieblas, E. Aguilar-Palazuelos, A. Gallegos-Infante, N. Rocha-Guzmán, J. Zazueta-Morales and J. Caro-Corrales, "Characterization and Optimization of Extrusion Cooking for the Manufacture of Third-Generation Snacks with Winter Squash (*Cucurbita moschata* D.) Flour," *Cereal Chemistry*, vol. 89, no. 1, pp. 65-72, ene. 2012.
- [2] M. Lizárraga-Ramírez, E. Aguilar-Palazuelos, J. Zazueta-Morales, C. Delgado-Nieblas, C. Ordorica-Falomir, N. Jacobo-Valenzuela, I. Camacho-Hernández and V. Limón-Valenzuela, *Características Fisicoquímicas y Microestructurales de Botanas Directamente Expandidas por Extrusión Adicionadas de Calabaza (*Cucurbita moschata* D)*, Sonora, 2013.
- [3] P. Ortega-Murrieta, G. Fierros-Leyva, I. Padilla-Valenzuela, V. Valenzuela-Herrera and J. Acosta-Gallegos, "Blanoro, nueva variedad de garbanzo blanco de grano extra grande para exportación," *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 7, no. 1, 2016.



- [4] C. Fares and V. Menga, "Chapter 41-Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Fortification of Cereal-Based Foods to Increase Fiber and Phytochemical Content," in *Wheat and Rice in Disease Prevention and Health*. San Diego: Academic Press pp. 533-546, 2014.
- [5] L. Chen, J. Chen, J. Ren and M. Zhao, "Modifications of soy protein isolates using combined extrusion pre-treatment and controlled enzymatic hydrolysis for improved emulsifying properties," *Food Hydrocolloids*, vol. 25, no. 5, pp. 887-897, jul. 2011.
- [6] Y. Yang, Z. Wang, R. Wang, S. Xiaonan, B. Qi, F. Han, Y. Li and L. Jiang, "Secondary Structure and Subunit Composition of Soy Protein In Vitro Digested by Pepsin and Its Relation with Digestibility," *BioMed Research International*, vol. 2016, pp. 1-11, ene. 2016.
- [7] S. Chaiyakul, K. Jangchud, A. Jangchud, P. Wuttijumnong and R. Winger, "Effect of extrusion conditions on physical and chemical properties of high protein glutinous rice-based snack," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 42, no. 3, pp. 781-787, abr. 2009.
- [8] S. Korkerd, S. Wanlapa, C. Puttanlek, D. Uttapap and V. Rungsardthong, "Expansion and functional properties of extruded snacks enriched with nutrition sources from food processing by-products," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 561-570, ene. 2016.
- [9] G. Shirani and R. Ganesharane, "Extruded products with Fenugreek (*Trigonella foenum-graecium*) chickpea and rice: Physical properties, sensory acceptability and glycaemic index," *Journal of Food Engineering*, vol. 90, no. 1, pp. 44-52, ene. 2009.
- [10] I. Bastos-Cardoso, J. Zazueta-Morales, F. Martínez-Bustos and Y. Kil-Chang, "Development and Characterization of Extruded Pellets of Whole Potato (*Solanum tuberosum* L.) Flour Expanded by Microwave Heating," *Cereal Chemistry*, vol. 84, no. 2, pp. 137-144, mar. 2007.
- [11] J. D. J. Berrios, M. Cámara, M. E. Torija and M. Alonso, "Effect of Extrusion Cooking and Sodium Bicarbonate Addition on the Carbohydrate Composition of Black Bean Flours," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 26, no. 2, pp. 113-128, jun. 2002.
- [12] E. Aguilar-Palazuelos, J. Zazueta-Morales, E. N. Harumi, and F. Martínez-Bustos, "Optimization of extrusion process for production of nutritious pellets", *Food Science and Technology*, vol. 32, no. 1, pp. 34-42, mar. 2012.
- [13] S. Faiz-Ul-Hassan, S. Mian-Kamran, B. Masood-Sadiq and S. Muhammad, "Development of protein, dietary fiber, and micronutrient enriched extruded corn snacks", *Journal of Texture Studies*, vol. 48, no. 3, pp. 221-230, oct. 2016.
- [14] A. Yovchev, A. Stone, S. Hood-Niefer, and M. Nickerson, "Influence of the extrusion parameters on the physical properties of chickpea and barley extrudates," *Food Science and Biotechnology*, vol. 26, no. 2, pp. 393-399, abr. 2017.
- [15] S. M. Beck, K. Knoerzer and J. Arcot, "Effect of low moisture extrusion on a pea protein isolate's expansion, solubility, molecular weight distribution and secondary structure as determined by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)", *Journal of Food Engineering*, vol. 214, pp. 166-174, dic. 2017.
- [16] T. A. Nascimento, V. Calado and C. W. P. Carvalho, "Effect of Brewer's spent grain and temperature on physical properties of expanded extrudates from rice," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 79, pp. 145-151, jun. 2017.
- [17] L. Day and B. G. Swanson, "Functionality of Protein-Fortified Extrudates", *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 12, no. 5, pp. 546-564, sep. 2013.
- [18] J. Panak Balentić, J. Babić, A. Jozinović, D. Ačkar, B. Miličević, B. Muhamedbegović, and D. Šubarić, "Production of third-generation snacks", *Croatian Journal of Food Science and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 98-105, may 2018.
- [19] M. P., Penfield and A. M. Campbell. 1990. *Experimental food science*. 3rd ed. San Diego: Academic Press. [Online]. Available: <https://trove.nla.gov.au/version/21202680>
- [20] M. Sharma, D. N. Yadav, D. Mridula and R. K. Gupta, "Protein Enriched Multigra-

in Expanded Snack: Optimization of Extrusion Variables", *Proceedings of the National Academy of Science India Section B: Biological Sciences*, vol. 86, no. 4, pp. 911-920, dic. 2016.

[21] E. Y. Lee, K. I. Lim, J. Lim, and S.-T. Lim, "Effects of Gelatinization and Moisture Content of Extruded Starch Pellets on Morphology and Physical Properties of Microwave-Expanded Products," *Cereal Chemistry*, vol. 77, no. 6, pp. 769-773, nov. 2000.

[22] L. Giolo Taverna, M. Leonel, and M. Mischan, "Changes in physical properties of extruded sour cassava starch and quinoa flour blend snacks," *Food Science and Technology Camp.*, vol. 32, pp. 826-834, dic. 2012.

[23] X. Ruiz-Armenta, J. Zazueta-Morales, E. Aguilar-Palazuelos, C. Delgado-Nieblas, A. López-Díaz, I. Camacho-Hernández, R. Gutiérrez-Dorado and F. Martínez-Bustos, "Effect of extrusion on the carotenoid content, physical and sensory properties of snacks added with bagasse of naranjita fruit: optimization process," *CyTA - Journal of Food*, vol. 16, no. 1, pp. 172-180, ene. 2018.

[24] X. Tovar-Jiménez, J. Caro-Corrales, C. Gómez-Aldapa, J. Zazueta-Morales, V. Limón-Valenzuela, J. Castro-Rosas, J. Hernández-Ávila and E. Aguilar-Palazuelos, "Third generation snacks manufactured from orange by-products: physicochemical and nutritional characterization," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 52, no. 10, pp. 6607-6614, oct. 2015.

OPTIMIZACIÓN ESTADÍSTICA DE UN POLVO PARA PREPARAR UNA BEBIDA ALTA EN FIBRA A PARTIR DE BAGAZO DE MANGO (*Mangifera indica* L., VARIEDAD MANILA)

Statistical optimization of a powder to prepare a high fiber beverage from
mango bagasse (*Mangifera indica* L., Manila variety)

Alma Karen Burgos-Araiza, Marcela Gaytán-Martínez

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
lg.karenburgos@gmail.com

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo optimizar la formulación de un polvo para preparar una bebida alta en fibra. La fuente de fibra utilizada fue bagazo de mango (*Mangifera indica* L., variedad Manila), considerado un subproducto de la industria despulpadora de mango. Para el desarrollo del producto se usó un diseño factorial 3^3 , donde las variables independientes fueron los porcentajes (0.5, 1 y 2%) de goma xantana (XG), carboximetilcelulosa (CMC) y dióxido de silicio (SD). Las variables de respuesta fueron viscosidad, índice de sedimentación, sólidos solubles y color. Con los resultados obtenidos, se optimizó la formulación buscando una mínima viscosidad y mínimo índice de sedimentación, dando como resultado una formulación con 0.5% XG, 0.5% CMC y 0.5% SD, con una $R^2 = 0.85$. La formulación optimizada de la bebida (OB) tuvo un contenido de fibra dietética total del $40.90 \pm 0.19\%$, de la cual $15.03 \pm 1.12\%$ es fibra soluble. Los resultados demuestran que el análisis de superficie de respuesta es una herramienta adecuada y práctica para la optimización de productos alimenticios, además, el bagazo de mango tiene potencial como fuente de fibra para el desarrollo de bebidas.

Palabras clave: bebida, fibra, bagazo de mango, optimización estadística, superficie de respuesta.

ABSTRACT

The objective of the present study was to optimize the formulation of a powder to prepare a high fiber beverage. The source of fiber used was mango bagasse (*Mangifera indica* L., Manila variety), considered a by product of the mango pulping industry. A 3^3 factorial design was used for the development of the product, where the independent variables were the percentages (0.5, 1 and 2%) of xanthan gum (XG), carboxymethylcellulose (CMC) and sili-

con dioxide (SD). The response variables were: viscosity, sedimentation index, soluble solids and color. With the results obtained, the formulation was optimized looking for a minimum viscosity and minimum sedimentation index, resulting in a formulation with 0.5% XG, 0.5% CMC and 0.5% SD, with an $R^2 = 0.85$. The optimized formulation of the beverage (OB) had a total dietary fiber content of $40.90 \pm 0.19\%$, of which $15.03 \pm 1.12\%$ is soluble fiber. The results show that response surface analysis is an adequate and practical tool for the optimization of food products; In addition, mango bagasse has potential as a source of fiber for the development of beverages.

Keywords: beverage, fiber, mango bagasse, statistical optimization, surface response.

INTRODUCCIÓN

El mango (*Mangifera indica* L.) es considerado el fruto tropical primario más cultivado en el mundo. En cuanto a ello, México es el quinto productor de mango a nivel mundial [1], con una producción promedio de 58 mil toneladas en el 2016 [2]. Entre las variedades más cultivadas en el país se encuentra el mango manila [3].

En la industria alimentaria, el mango es procesado para obtener gran variedad de productos como pulpas para elaborar jugos o néctares, dulces, conservas, jaleas, salsas, encurtidos, helados, e incluso, fruta deshidratada a manera de botana [4]. En el proceso de obtención de la pulpa, son desechados: la cáscara (15-20%), el hueso (20-60%) y el bagazo, considerados subproductos del mango que equivalen del 40 al 60% del total del producto, lo que representa grandes porcentajes de pérdidas económicas y contaminación al medio ambiente [5].

El bagazo de mango (MB) se define como la porción fibrosa que se encuentra unida al hueso y distribuida en la pulpa del fruto [6], y cuenta con un considerable potencial para el



desarrollo de productos, pues es rico en gran cantidad de compuestos bioactivos como fibra dietética con un $33.12 \pm 1.60\%$, de la cual el $19.43 \pm 1.35\%$ corresponde a fibra insoluble y el $13.68 \pm 0.32\%$ a fibra soluble [7].

Existen diferentes métodos estadísticos de diseños de experimentos para optimizar parámetros respuesta sin o con ciertas restricciones para mínimos o máximos. Algunos de los métodos conocidos son superficie de respuesta, central compuesto, factorial con tres niveles, Box-Behnken y Draper-Lin (fraccionado). Dentro de estos, uno de los más utilizados en la optimización para desarrollo de productos alimenticios es el de superficie de respuesta. Este método también se ha utilizado para optimizar procesos de extracción, secado, escaldado, hidrólisis enzimática y clarificación, así como la producción de metabolitos microbianos [8]. Dentro de las investigaciones en las que se ha usado este método, se han optimizado las características fisicoquímicas de emulsiones de bebidas de aceite de nuez [9], de *snacks* de camarón y maíz [10], de amaranto [11], de un *snack* de moringa extruido rico en hierro [12], de una bebida a base de una mezcla de aditivos y polvo de cacao [13], de una galleta de trigo, soja y cúrcuma [14], y de una premezcla de multigranos para elaborar galletas altas en fibra y proteína [15], entre otras.

Por ello, de acuerdo con la literatura, se propone utilizar la metodología de superficie de respuesta para optimizar el concentrado en polvo para preparar una bebida alta en fibra, pues a partir de este método se pueden predecir las condiciones o interacciones óptimas entre las variables respuesta analizadas, para maximizar o minimizar las variables independientes y predecir las condiciones ideales del desarrollo [16]. Aunado a esto, y a pesar del importante contenido de fibra, antioxidantes y compuestos fenólicos, el MB no ha sido aprovechado como ingrediente para elaborar bebidas, aunque sí se ha utilizado en confitería funcional [7]. Es por esto, que el objetivo del presente estudio fue optimizar estadísticamente un concentrado en

polvo para preparar una bebida alta en fibra, a partir del método de superficie de respuesta y del bagazo de mango (*Mangifera indica* L., variedad Manila).

METODOLOGÍA

Materia prima: bagazo de mango manila

El bagazo de mango (*Mangifera indica* L. variedad Manila) fue proporcionado por una empresa despulpadora y productora de jugos, ubicada en San Juan del Río, Querétaro, México. El material fue colectado en bolsas de plástico, almacenado en recipientes y congelado a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ para los estudios posteriores.

Desarrollo del concentrado en polvo

Para el desarrollo de la bebida, se llevó a cabo un diseño de experimento factorial 3^3 , en el que las variables independientes fueron los porcentajes de goma xantana (XG) (0.5, 1 y 2%), carboximetilcelulosa (CMC) (0.5, 1 y 2%) y dióxido de silicio (SD) (0.5, 1 y 2%). Las variables de respuesta evaluadas fueron viscosidad, índice de sedimentación, sólidos disueltos ($^{\circ}\text{Brix}$), y determinación de color en los parámetros L (luminosidad), C (croma) y H (matiz). Las cantidades de uso de los aditivos se establecieron con base en la NOM-218-SSA1-2011 y el Codex Alimentarius 192-1995 [17], [18]. Las formulaciones utilizadas para el diseño de experimentos se muestran en la Tabla 1.

Preparación de la muestra para análisis

El bagazo se deshidrató a $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un deshidratador (Excalibur 9-try Delux, model #39000, USA). Se pulverizó en un molino (KRUPS GX4100, México) hasta obtener un tamaño promedio de partícula de $128.28 \pm 0.99\text{ }\mu\text{m}$. Para la preparación de la bebida, el bagazo en polvo se mezcló con CMC, XG y SD, según el diseño de experimento (véase Tabla 1), hasta obtener una mezcla homogénea. Posterior-

mente se mezcló con agua purificada en una relación 1:25 (concentrado en polvo:agua) por 2 minutos hasta homogeneizar.

La cantidad utilizada de bagazo de mango aseguró la inclusión de 8 g de fibra dietética por porción (500 ml), con el objetivo de que la bebida fuera una fuente de fibra dietética para un adulto de 19 a 50 años [19] y de que aporte al menos el 20% de la Ingesta Diaria Recomendada (IDR).

Caracterización fisicoquímica de la bebida

Viscosidad

Se utilizó un reómetro Anton Paar modelo MCR101 (número de serie 80689904, Austria) con una geometría ST24-2D/2V/2V-30. Las condiciones de medición fueron 2 minutos, a 25 °C con una velocidad constante de 160 minutos⁻¹. La viscosidad se reportó en centipoises (cP). Cada medición se realizó por triplicado.

Índice de sedimentación

Se tomó como base la metodología propuesta por [20], con algunas modificaciones. Se prepararon 50 ml de bebida (nivel inicial) en una probeta y después de dos horas se registró la sedimentación. El porcentaje de sedimentación se estableció como la relación del nivel inicial y final de cada muestra. Cada medición se realizó por triplicado.

Sólidos disueltos

Se realizó con base en la metodología propuesta por [21]. Se utilizó un refractómetro de mano de la marca CMS Metrology. La medición se realizó a una temperatura de 26 ± 1 °C. Cada medición se realizó por triplicado.

Determinación de color

Se realizó siguiendo la metodología propuesta por [22] con un colorímetro de pre-

cisión de la marca High-Quality Colorimeter (modelo NH310 de 8 mm). Los valores que se determinaron fueron luminosidad (L), croma (C) y matiz (H), de acuerdo con el sistema de color de la CIE [23]. Para determinar, se utilizaron 20 ml de muestra que se vertieron en un recipiente transparente. La medición de color se realizó a una distancia de 0.5 cm entre el lente y la superficie de la muestra. Cada medición se realizó por triplicado.

Además, de acuerdo con [24] se calculó el valor de diferencial de color (ΔE , Ecuación 1) para la bebida con MB en contraste con un concentrado en polvo comercial para preparar bebidas, comparando además los valores de L, C y H.

$$\Delta E *_{LCH} = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta C^2 + \Delta H^2} \quad (1)$$

Optimización de la bebida

Con base en los resultados obtenidos del diseño factorial 3³, se encontró que una viscosidad alta se considera un parámetro sensorial negativo para la bebida de BM. Por tal razón, se procedió a realizar una optimización de la formulación. La optimización se llevó a cabo mediante un análisis de regresión factorial usando viscosidad y sedimentación como variables respuesta, dado que fueron los factores que tuvieron un efecto significativo sobre el modelo de superficie de respuesta obtenido. Para seleccionar la mejor formulación se establecieron valores mínimos de viscosidad e índice de sedimentación con una deseabilidad mayor a 85%.

Caracterización química de la bebida optimizada

Se determinó la composición proximal de la bebida optimizada, analizando el contenido de humedad (método 925.10), cenizas (método 942.05), proteínas (método 920.15), lípidos (método 920.39), carbohidratos (se calcu-



ló por diferencia) y fibra dietética total (soluble e insoluble) (método 941.43), de acuerdo con las metodologías propuestas por la AOAC 2002. Los azúcares reductores se determinaron por el método DNS [25].

Análisis estadístico

El número de tratamientos estudiados se estableció para el ajuste de un modelo de primer orden. Los resultados del análisis factorial aleatorio 33 se evaluaron en el paquete estadístico de Minitab 17. Las variables independientes evaluadas fueron concentración de CMC (0.5, 1 y 2%), goma xantana (0.5, 1 y 2%) y dióxido de silicio (0.5, 1 y 2%). La significancia del modelo se justificó mediante el análisis de la varianza (prueba F), y el efecto de las variables fueron observadas a través de los gráficos de superficie de respuesta.

Respecto a la optimización para la bebida, para seleccionar la mejor formulación se tomaron en cuenta dos variables respuesta: viscosidad e índice de sedimentación. Se realizó un análisis de regresión lineal donde se consi-

deraron valores mínimos para estas variables respuesta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de los aditivos sobre las formulaciones

Viscosidad

En la Figura 1 se muestran los gráficos de superficie de respuesta para viscosidad que se obtuvieron a partir de las 27 formulaciones del diseño factorial 33. Se observa la influencia de la interacción entre CMC y XG sobre la viscosidad de la bebida a diferentes concentraciones de SD, debido a que la adición de SD no mostró efecto significativo sobre estas variables. Las mezclas presentaron valores experimentales de viscosidad que van desde los 32.84 ± 0.49 cP (fórmula 1: 0.5% CMC, 0.5% XG y 0.5% SD) hasta los 157.50 ± 0.89 cP (fórmula 26: 2% CMC, 2% XG y 1% SD). La CMC y la XG tuvieron un efecto significativo sobre la viscosidad ($p < 0.01$), al igual

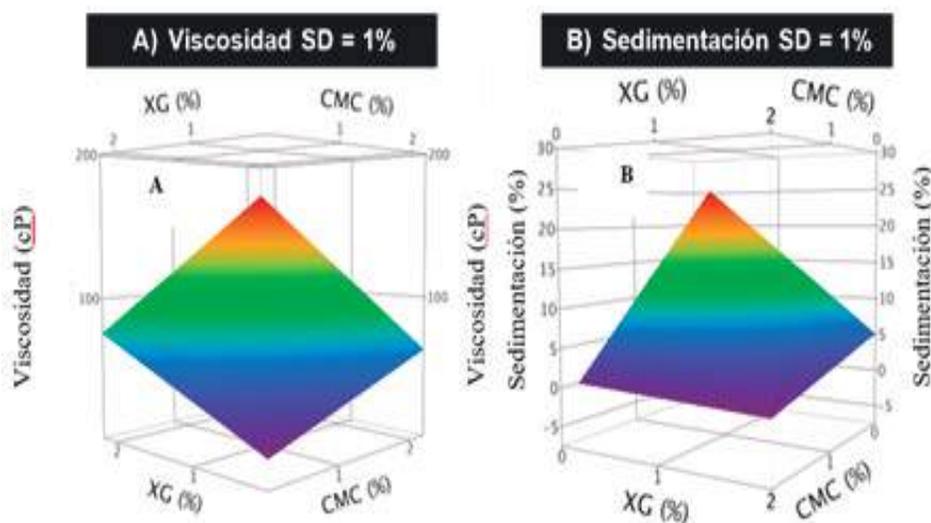


Figura 1. Diagramas del análisis de superficie de respuesta que muestran A) la interacción entre CMC y goma xantana al 1% de dióxido de silicio para la viscosidad y B) índice de sedimentación. Solo el gráfico para 1% de SD se incluye como una representación del comportamiento, ya que la variación de % de SD no tuvo un efecto significativo sobre la viscosidad y el índice de sedimentación.

que la interacción CMC con XG. Se vislumbró que a mayor proporción de gomas (CMC y XG), la viscosidad aumentó. De manera similar, [26] reportaron que la adición de CMC incrementa la viscosidad de una leche sabor frambuesa en forma lineal, dependiente de la concentración de CMC. Por otra parte, [27] mencionan un aumento de viscosidad al incrementar la cantidad de XG en jugos de frutas y bebidas lácteas, debido a la estructura química de las moléculas, en particular, las de CMC que adsorben a las partículas del concentrado en polvo durante la agitación mecánica, formando un revestimiento que las protege, evitando agregaciones o floculaciones [28]. Por otra parte, [29] encontraron que las mezclas con XG aumentan la viscosidad, ya que su peso molecular es mayor y aumentan las fuerzas de repulsión electrostática, lo cual aporta una mayor estabilidad, manteniendo la viscosidad del producto.

De acuerdo con [30], las bebidas con valores de viscosidad entre 51-350 cP se consideran néctar/similar a jarabe. Dado que el polvo para la bebida desarrollada era para obtener un agua saborizada, se descartaron aquellas formulaciones con un valor de viscosidad > 51 cP.

Índice de sedimentación

En la Figura 1 se muestra el gráfico de superficie de respuesta del índice de sedimentación para 1% de SD. Se observó que a mayor cantidad de CMC y XG, el índice de sedimentación disminuyó significativamente ($p < 0.01$), en cambio, el SD no tuvo un efecto significativo sobre este parámetro ($p > 0.01$). También se vislumbró un efecto de interacción entre CMC y XG ($p < 0.01$). El menor índice de sedimentación fue del $0.33 \pm 0.58\%$ y el mayor del $27.67 \pm 0.58\%$. Al respecto, un alto porcentaje de sedimentación de partículas se considera una característica que influye negativamente en la aceptación de los productos [31]. De acuerdo con nuestros resultados, la menor sedimentación se logró con 1-2% CMC y 2% de XG. Otro estudio, donde se analizó el comportamiento

de una bebida con semillas de albahaca, reporta valores menores de CMC (0.25-0.5%) para mantener partículas en suspensión, minimizar la sedimentación y dar estabilidad a lo largo del tiempo [32]. Por su parte, [33] en un análisis de un jugo de sandía, encontraron que la XG (0.1-0.2 g/100g) aumenta la homogeneidad, lo que genera que las partículas se mantengan suspendidas, mejorando la estabilidad y minimizando la sedimentación de la bebida.

Por su composición química, la CMC y la XG tienen la propiedad de estabilizar y emulsificar mezclas, pues ayudan a que las partículas del polvo queden suspendidas en el agua, lo que proporciona una apariencia homogénea [32], [34]. Sin embargo, es necesario controlar la cantidad añadida de hidrocoloides debido a que altas concentraciones provocan floculación [35].

Sólidos disueltos

Los valores de la determinación de sólidos disueltos ($^{\circ}$ Brix) estuvieron en un rango de 2.40 ± 0.10 a 3.03 ± 0.06 $^{\circ}$ Bx (véase Tabla 1). No se encontraron diferencias significativas entre las formulaciones, a excepción de la formulación 5 que tuvo el valor más bajo (2.40 ± 0.10). De acuerdo con el análisis estadístico no se observó un efecto significativo de CMC o XG sobre esta variable. Los sólidos disueltos indican la cantidad de sólidos disueltos en un líquido, en particular, de sacarosa [36], [37]. Por tanto, se considera un indicador del contenido de sacarosa en bebidas [38]. Las formulaciones de la bebida a base de BM evaluadas, tuvieron valores significativamente menores a los encontrados en un jugo y néctar comercial (10.6 ± 0.01 y 12.17 ± 0.06 , respectivamente). Lo anterior muestra que los productos comerciales tienen una mayor cantidad de sólidos disueltos y por lo tanto un mayor contenido de sacarosa.

Determinación de color

La determinación de color se realiza como una prueba de calidad, pues el color es un



factor que influye directamente en la aceptación del producto por parte del consumidor [39]. De acuerdo con los resultados obtenidos para color, el valor promedio para L (luminosidad) fue 46.55 ± 0.78 , para C (croma) fue 22.61 ± 0.77 y para H (matiz) fue 58.12 ± 0.89 (véase Tabla 1). No se encontraron diferencias significativas entre las muestras por efecto de la adición de CMC, XG o SD, lo que indica que las variaciones en las concentraciones de los aditivos no afectan el color de las muestras. Se calculó el valor de la variación total de

color (ΔE) para encontrar diferencias entre las formulaciones de la bebida a base de MB contra un polvo comercial para preparar bebidas ($L=46.28 \pm 2.94$, $C=26.74 \pm 0.76$, $H=62.08 \pm 0.91$). El resultado global fue $\Delta E^*=5.72$, lo que indicó que sí existía diferencia de color. Los resultados por parámetro tuvieron valores de $\Delta L^*=+0.27$, $\Delta C^*=-4.13$ y $\Delta H^*=-3.96$ en la comparación, lo que indicó que la bebida desarrollada es más clara ($+\Delta L^*$), con menor saturación de color ($-\Delta C^*$) y con un color menos amarillo ($-\Delta H^*$) que el comercial.

Tabla 1. Efecto de las variables independientes sobre los sólidos disueltos (°Brix) y color de la bebida

Formulación	CMC	XG	SD	Sólidos disueltos (°Brix)	Color		
	(%*)	(%*)	(%*)		L	C	H
1	0.5	0.5	0.5	2.93±0.06	46.63±0.49	22.74±0.77	58.42±0.06
2	0.5	0.5	1	2.97±0.06	46.85±0.79	23.64±0.34	59.02±0.68
3	0.5	0.5	2	3.00	45.71±0.27	22.05±0.45	59.51±0.15
4	0.5	1	0.5	2.97±0.06	47.21±0.04	23.49±0.99	57.50±0.29
5	0.5	1	1	2.40±0.10	47.56±1.12	23.64±0.42	57.52±0.72
6	0.5	1	2	2.97±0.06	47.27±0.23	23.51±0.08	57.08±0.20
7	0.5	2	0.5	3.03±0.06	46.99±0.84	23.49±0.55	57.36±0.44
8	0.5	2	1	3.00	46.94±0.84	22.55±0.63	58.80±0.51
9	0.5	2	2	3.00	45.72±0.13	21.39±0.12	58.85±0.12
10	1	0.5	0.5	3.03±0.06	45.10±0.54	22.08±0.41	59.83±0.46
11	1	0.5	1	3.00	45.65±0.30	22.01±0.68	58.93±0.08
12	1	0.5	2	3.00	46.26±0.37	22.14±0.67	58.22±1.16
13	1	1	0.5	3.00	48.19±0.33	21.21±0.04	56.06±0.26
14	1	1	1	3.03±0.06	45.96±0.02	21.88±0.65	59.28±0.26
15	1	1	2	3.00	45.64±1.54	21.62±0.12	58.91±1.33
16	1	2	0.5	2.93±0.06	47.07±0.46	22.68±0.84	57.84±0.74
17	1	2	1	3.00	47.69±0.50	23.49±0.08	57.20±0.46
18	1	2	2	2.93±0.06	46.49±0.50	22.79±0.23	57.56±0.41
19	2	0.5	0.5	2.90±0.1	45.15±4.69	22.73±2.31	57.41±0.87
20	2	0.5	1	3.00	47.26±1.18	23.28±1.08	57.62±0.67
21	2	0.5	2	2.97±0.06	46.44±0.20	22.86±0.07	58.43±0.18
22	2	1	0.5	3.00	46.80±0.66	23.20±0.27	58.02±0.48
23	2	1	1	2.97±0.06	47.13±1.11	22.98±0.81	57.20±0.68
24	2	1	2	2.93±0.06	46.31±0.55	22.12±0.46	58.69±0.59
25	2	2	0.5	3.00	45.72±1.26	21.12±0.33	58.66±1.12
26	2	2	1	2.97±0.06	46.77±1.07	23.38±0.50	57.17±0.73
27	2	2	2	2.97±0.06	46.41±0.76	22.38±0.26	58.12±0.54

*Porcentaje calculado con base en el contenido de bagazo de mango, tomando éste como el 100%. La concentración utilizada del polvo para preparar la bebida fue de 0.04g/mL. CMC= Carboximetilcelulosa, XG= goma xantana y SD= dióxido de silicio. L= luminosidad, C= croma y H= matiz.

Optimización de la formulación para elaborar la bebida

De acuerdo con la ecuación obtenida, la combinación de 0.5% CMC, 0.5% XG y 0.5% SD tuvo el menor índice de sedimentación y viscosidad con una $R^2=0.85$. Los valores predichos de viscosidad e índice de sedimentación se muestran en la Tabla 2, así como los valores que se obtuvieron de manera experimental para esta formulación. No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre estos valores y el experimental, lo que indica que el modelo utilizado tuvo un buen ajuste y poder de predicción.

Tabla 2. Efecto de las variables independientes sobre los sólidos disueltos (°Brix) y color de la bebida

Parámetro	Valor predicho	Valor experimental	T de student (valor P)
Viscosidad	34.64±2.08 cP	32.84±0.49 cP	0.4053
Índice de sedimentación	23.75±1.83%	23.67±0.58%	0.9459
Los valores predichos y experimentales corresponden a la bebida optimizada 572 (0.5% CMC, 0.5% XG y 0.5% SD), donde se minimizaron los parámetros de viscosidad e índice de sedimentación. El valor de R2 de la ecuación de optimización estadística para los parámetros fue de 0.85.			

Caracterización de la formulación para elaborar la bebida optimizada

Los resultados del análisis proximal de la bebida optimizada (0.5% CMC, 0.5% XG y 0.5% SD; OB) se muestran en la Tabla 3. La FAO establece una ingesta promedio diaria de fibra dietética de 30 g, basado en una ingesta de 2000 kcal para mujeres y hombres adultos de 19 a 70 años [19]. Se puede destacar que, de acuerdo con el contenido de fibra dietaria total (40.90 ± 0.19%), la bebida optimizada se puede considerar un concentrado en polvo para preparar una bebida con alto contenido

en fibra, que proporciona como mínimo el 20% del valor diario de referencia [40], es decir, al menos 6 g de fibra dietaria total por porción. Además, es un producto sin azúcar añadida, pues en su formulación se utilizó Stevia como sustituto de azúcar. Además, respecto al contenido de fibra, cabe resaltar que, el ratio de fibra soluble:insoluble fue de 1:1.72, lo cual es importante pues por lo general, en los productos altos en fibra, la proporción de fibra insoluble es mucho mayor.

Tabla 3. Análisis proximal de la bebida optimizada final y

Compuesto	Bebida optimizada (%)
Humedad	8.04±0.34
Cenizas	2.71±0.08
Lípidos	1.55±0.07
Proteínas	4.74±0.04
Carbohidratos de los cuales:	82.94±0.32
Azúcares	30.40±2.27
Fibra de la cual:	40.90±0.19
Soluble	15.03±1.12
Insoluble	25.87±0.54
La formulación correspondiente a la bebida optimizada final fue 0.5% CMC, 0.5% XG, 0.5% SD y 1.6 g/L stevia.	

Un grupo de investigadores desarrolló una bebida láctea de sandía donde el contenido máximo de fibra logrado fue del 5% [31]. En otras investigaciones se reporta el uso del β -glucano como fuente de fibra en bebidas en diferentes proporciones: 0, 2.5 y 5 g [41]; 4 a 8 g [42] y 10.2 g [43]. En relación a residuos de la agroindustria, [44] reportaron que se han desarrollado bebidas de distintas fuentes como granos y frutas, pectina de distintas fuentes, β -glucano y celulosa de raíz de remolacha. [45] desarrollaron dos bebidas a partir de lino y chía, con 8.8 g de fibra.



CONCLUSIONES

En la investigación, se empleó el modelo de superficie de respuesta para observar el efecto de la interacción de las concentraciones de goma xantana (XG), carboximetilcelulosa (CMC) y dióxido de silicio (SD) sobre 4 variables de respuesta (viscosidad, índice de sedimentación, sólidos disueltos y color), así como para la optimización de un concentrado en polvo para preparar una bebida alta en fibra. En general, sólo la viscosidad y el índice de sedimentación fueron parámetros que se vieron afectados significativamente por la variación en los niveles de concentración de los aditivos (XG y CMC). La formulación con mínima viscosidad y mínimo índice de sedimentación fue aquella con 0.5% de cada uno de los aditivos (XG, CMC y SD). Además, el modelo matemático de predicción obtenido fue adecuado, de acuerdo con la concordancia entre los valores predichos y los experimentales, mostrando un buen ajuste.

El concentrado en polvo para preparar una bebida a partir de bagazo de mango tuvo una alta concentración de fibra ($40.90 \pm 0.19\%$), lo que demuestra que el bagazo de mango tiene potencial como ingrediente funcional para el desarrollo de bebidas altas en fibra. Este subproducto de la agroindustria del procesado de mango ha sido muy poco estudiado, por lo que, este trabajo sería uno de los primeros reportes que destacan los beneficios del MB en el desarrollo de productos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación y al Centro de Investigación de Ciencias Aplicadas y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional ubicado en Querétaro por permitir el uso de sus laboratorios para el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

[1] FAO, "Perspectivas a plazo medio de los productos básicos agrícolas, frutas tropicales," *Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*, 2005.

[2] SAGARPA, "Cuarto informe de labores 2015-2016," ago. 2016.

[3] H. M. Krieger, E. G. Soria, M. T. de la G. Carranza and J. P. G. Farías, "Análisis econométrico de las ventas de pulpa de mango de frozen pulps de México SA de CV," *Pistas Educativas*, vol. 38, no. 124, jul. 2017.

[4] G. L. Diaz-Gómez y M. P. Bernal-Celemín, *Modelo de gestión de capacidades logísticas en la cadena de suministro agroindustrial frutícola en Bogotá, Cundinamarca*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2016.

[5] A. Cruz, M. Guamán, M. Castillo, P. Glorio y R. Martínez, "Fibra dietaria en subproductos de mango, maracuyá, guayaba y palmito," *Revista Politécnica*, vol. 36, no. 2, sep. 2015.

[6] M. A. Henrique, H. A. Silvério, W. P. Flauzino Neto, y D. Pasquini, "Valorization of an agro-industrial waste, mango seed, by the extraction and characterization of its cellulose nanocrystals," *Journal of Environmental Management*, vol. 121, pp. 202-209, may 2013.

[7] L. A. Herrera-Cazares et al., "Mango-bagasse functional-confectionery: vehicle for enhancing bioaccessibility and permeability of phenolic compounds," *Food and Function*, vol. 8, no. 11, pp. 3906-3916.

[8] M. Yolmeh and S. M. Jafari, "Applications of Response Surface Methodology in the Food Industry Processes," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 413-433.

[9] M. Homayoonfal, F. Khodaiyan and M. Mousavi, "Modelling and optimising of physicochemical features of walnut-oil beverage emulsions by implementation of response surface methodology: Effect of preparation conditions on emulsion stability," *Food Chemistry*, vol. 174, pp. 649-659, may. 2015.

- [10] O. K. Topuz, N. Gokoğlu, K. Jouppila, y S. Kirjoranta, "Development of Extruded Shrimp-Corn Snack Using Response Surface Methodology," *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 17, no. 2, pp. 333-343, mar. 2017.
- [11] F. Mumtaz, "Effect of additives on quality of amaranth snack: Application of response surface methodology," *Food Science & Technology*, jun. 2015.
- [12] K. Vivek, P. Singh, y R. Sasikumar, "Optimization of Iron Rich Extruded Moringa oleifera Snack Product for Anaemic People Using Response Surface Methodology (RSM)," *Journal Food Processing and Technology*, vol. 7, p. 639, dic. 2016.
- [13] E. C. Loo Kung, A. Tesén Arroyo, y J. Valdez Arana, "Optimization of the general acceptability through affective tests and response surface methodology of a dry cacao powder mixture-based beverage," *Scientia Agropecuaria*, vol. 4, pp. 191-197, ago. 2013.
- [14] G. O. Adegoke, A. O. Oyekunle, y M. O. Afolabi, "Functional biscuits from wheat, soya bean and turmeric (curcuma longa): optimization of ingredients levels using response surface methodology," *Research Journal of Food and Nutrition*, vol. 1, no. 1, pp. 13-22, nov. 2017.
- [15] K. A. Kumar, G. K. Sharma, M. A. Khan, y A. D. Semwal "Optimization of Multigrain Premix for High Protein and Dietary Fibre Biscuits Using Response Surface Methodology (RSM)," *Food and Nutrition Sciences*, vol. 6, pp. 747-756, jun. 2015.
- [16] I. Rodríguez Amado, D. Franco, M. Sánchez, C. Zapata, y J. A. Vázquez, "Optimization of antioxidant extraction from Solanum tuberosum potato peel waste by surface response methodology," *Food Chemistry*, vol. 165, pp. 290-299, may 2014.
- [17] NOM-218-SSA1-2011. NORMA Oficial Mexicana NOM-218-SSA1-2011. Productos y servicios. Bebidas saborizadas no alcohólicas, sus congelados, productos concentrados para prepararlas y bebidas adicionadas con cafeína. Especificaciones y disposiciones sanitarias. Métodos de prueba. Poder ejecutivo, Secretaría de Salud, feb-2012.
- [18] FAO/OMS, Codex Alimentarius, Normas Internacionales de los Alimentos, 1995.
- [19] BH. Bourges, E. Casanueva and J. L. Rosado, *Recomendaciones de Ingestión de Nutrimientos para la Población Mexicana, Bases Fisiológicas*. México: Médica Panamericana, 2009.
- [20] A. Matalanis and D. J. McClements, "Hydrogel microspheres for encapsulation of lipophilic components: Optimization of fabrication & performance," *Food Hydrocolloids*, vol. 31, no. 1, pp. 15-25, may 2013.
- [21] O. Ozarda, A. B. Demirköz and M. Özdemir, "Sensory characteristics and antioxidant capacity of red raspberry extract as a preservative in fruity flavoured beverages," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 52, no. 10, pp. 6687-6694, oct. 2015.
- [22] R. Fernández-Vázquez, C. M. Stinco, D. H. Vila, F. J. Heredia, C. Chaya and I. M. Vicario, Internal preference mapping of milk-fruit beverages: Influence of color and appearance on its acceptability, *Food Science and Nutrition*, vol. 6, no. 1, pp. 27-35, oct. 2017.
- [23] X-Rite, Guía para entender la comunicación del color, 2002.
- [24] J. T. Guimarães et al., "Physicochemical changes and microbial inactivation after high-intensity ultrasound processing of prebiotic whey beverage applying different ultrasonic power levels," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 44, pp. 251-260, jun. 2018.
- [25] K. S. Başkan, E. Tütem, E. Akyüz, S. Özen, y R. Apak, "Spectrophotometric total reducing sugars assay based on cupric reduction," *Talanta*, vol. 147, pp. 162-168, ene. 2016.
- [26] F. Abedi, A. M. Sani and H. Karazhiyan, "Effect of some hydrocolloids blend on viscosity and sensory properties of raspberry juice-milk," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 51, no. 9, pp. 2246-2250, sep. 2014.



- [27] H. M. Cho and B. Yoo, "Rheological Characteristics of Cold Thickened Beverages Containing Xanthan Gum-Based Food Thickeners Used for Dysphagia Diets," *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, vol. 115, no. 1, pp. 106-111, ene. 2015.
- [28] G. E. Ibrahim et al., "Effect of clouding agents on the quality of apple juice during storage," *Food Hydrocolloids*, vol. 25, no. 1, pp. 91-97, ene. 2011.
- [29] C. V. Brandenstein, M. Busch Stockfisch and M. Fischer, "Sweetness and other sensory properties of model fruit drinks: does viscosity have an impact?" *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 95, no. 4, pp. 809-818, sep. 2014.
- [30] Z. Vickers et al., "Relationships Among Rheological, Sensory Texture, and Swallowing Pressure Measurements of Hydrocolloid-Thickened Fluids," *Dysphagia*, vol. 30, no. 6, pp. 702-713, dic. 2015.
- [31] D. Saxena, S. K. Chakraborty, L. Sabikhi and D. Singh, "Process optimization for a nutritious low-calorie high-fiber whey-based ready-to-serve watermelon beverage," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 960-967, feb. 2015.
- [32] A. Hajmohammadi, M. K. Pirouzifard, M. Shahedi, y M. Alizadeh, "Enrichment of a fruit-based beverage in dietary fiber using basil seed: Effect of Carboxymethyl cellulose and Gum Tragacanth on stability," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 74, pp. 84-91, 2016.
- [33] S. Aghajanzadeh, A. M. Ziaifar, y M. Kashaninejad, "Influence of thermal treatment, homogenization and xanthan gum on physicochemical properties of watermelon juice: A response surface approach," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 85, pp. 66-74, nov. 2017.
- [34] C. J. M. Cardozo, C. A. J. Castañeda and C. S. S. Ripoll, "Development of mango (*Mangifera indica* L.) energy drinks," *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 70, no. 1, pp. 8115-8121, ene. 2017.
- [35] L. Xu, G. Xu, T. Liu, Y. Chen and H. Gong, "The comparison of rheological properties of aqueous welan gum and xanthan gum solutions," *Carbohydrate Polymers*, vol. 92, no. 1, pp. 516-522, ene. 2013.
- [36] A. Baccouche, M. Ennouri, I. Felfoul and H. Attia, "A physical stability study of whey-based prickly pear beverages," *Food Hydrocolloids*, vol. 33, no. 2, pp. 234-244, dic. 2013.
- [37] Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y alcoholera, Central Motzorongo, Fideicomiso Ingenio Atencingo, y Fideicomiso Ingenio Casasano, "NMX-F-436-SCFI-2011 industria azucarera y alcoholera -determinación de grados Brix en jugos de especies vegetales productoras de azúcar y materiales azucarados-método del refractómetro," Secretaría de Economía, 2011.
- [38] S. Maireva, T. Usai and S. Manhokwe, "The Determination of Adulteration in Orange Based Fruit Juices," *Midl. State University Department of Food Science, Nutrition*, vol. 2, no. 5, may 2013.
- [39] P. Valencia and J. A. Alulema Leiva, "Influencia del color en el comportamiento de consumo de bebidas. Universidad San Francisco de Quito, Quito, 2015.
- [40] FAO, Directrices para el uso de declaraciones nutricionales y saludables, 1997.
- [41] M. Lyly, K.-H. Liukkonen, M. Salmenkallio-Marttila, L. Karhunen, K. Poutanen, y L. Lähteenmäki, "Fibre in beverages can enhance perceived satiety," *European Journal of Nutrition*, vol. 48, no. 4, pp. 251-258, jun. 2009.
- [42] S. Pentikäinen et al., "Enrichment of biscuits and juice with oat β -glucan enhances postprandial satiety," *Appetite*, vol. 75, pp. 150-156, abr. 2014.
- [43] K. R. Juvonen et al., "Viscosity of oat bran-enriched beverages influences gastrointestinal hormonal responses in healthy humans," *Journal Nutrition*, vol. 139, no. 3, pp. 461-466, mar. 2009.
- [44] S. K. Sharma, S. Bansal, M. Mangal, A. K. Dixit, R. K. Gupta and A. K. Mangal, "Utilization of Food Processing By-products as Dietary, Functional, and Novel Fiber: A Review," *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 56, no. 10, pp. 1647-1661, jul. 2016.

[45] V. Vuksan *et al.*, "Comparison of flax (*Linum usitatissimum*) and Salba-chia (*Salvia hispanica* L.) seeds on postprandial glycemia and satiety in healthy individuals: a randomized, controlled, crossover study," *European Journal of Clinical Nutrition*, vol. 71, no. 2, pp. 234-238, feb. 2017.

EFFECTO DEL EXTRACTO ETANÓLICO DE DIFERENTES ÓRGANOS DE LA PLANTA DEL CHILCUAGUE (*Heliopsis longipes*) EN GORGOJO (*Sitophilus granarius*)

Effect of the ethanolic extract of different organs of the chilcuague plant
(*Heliopsis longipes*) on weevil (*Sitophilus granarius*)

Ixchel Parola-Contreras, Juan Antonio Valencia-Hernández,
Nallely Solano-Álvarez, Ramón G. Guevara-González

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
ix.parola@gmail.com

RESUMEN

Las plagas en los cultivos son un problema al que se enfrentan los agricultores constantemente, inclusive cuando ya se ha cosechado y es necesario almacenar el producto. Los que se conocen comúnmente como gorgojos son una plaga de almacenamiento de granos que siguen siendo difíciles de controlar, debido a que la mayoría de los productos que se comercializan son muy tóxicos para quien los aplica y en muchos casos tienen un alto grado residual. De ahí que surge la necesidad de generar nuevos productos a base de compuestos alternativos que sean menos tóxicos para el ser humano y más amigables con el ambiente.

Durante este proyecto se evaluaron diferentes órganos de la planta, así como dos poblaciones de chilcuague de diferentes localidades de colecta. El resultado obtenido fue una mortalidad casi del 100% para el macerado de planta con procedencia de Concá. La propuesta de este trabajo es que macerados de diferentes partes de la planta de chilcuague son utilizables como un producto anti-gorgojos en almacenes de granos.

Palabras clave: macerado, plagas, granos, planta nativa, raíz, gorgojo

ABSTRACT

Pests in crops are a problem that farmers are constantly faced with, even when fields have already been harvested and it is necessary to store the product; those that are commonly known as weevils are a pest of grain storage and are still difficult to control, since most of the products that are marketed are very toxic for those who apply them and in many cases with residuality. Hence the need to generate new products based on alternative compounds that are less toxic and friendly with the environment.

Meanwhile in this project, different organs of the plant were evaluated; as well as, two

chilcuague plants from different locations. In conclusion, the result obtained was a mortality of almost 100% with the macerate of the plant from Concá. The proposal of this work is that macerates from different parts of the chilcuague plant are usable as an anti-weevil product in grain stores.

Keywords: macerates, pests, grains, native plant, root, weevil,

INTRODUCCIÓN

Los principales estados productores de grano en México son Sinaloa, Tamaulipas, Jalisco, Chiapas, Sonora, Querétaro, Guanajuato y Michoacán. En el año 2016 se reportó para el estado de Querétaro una producción de 31,347 toneladas, de entre las cuales se encuentran cebada, maíz, frijol y garbanzo [1].

La postcosecha es el conjunto de procesos técnicos y operativos que engloban desde el acopio de los granos hasta su comercialización, cuyo funcionamiento permite garantizar la conservación de granos para satisfacer la demanda del consumidor derivada de la dieta humana y por la previsión de resguardarlo para su aprovechamiento racional. Esta conservación del producto debe darse en óptimas condiciones fisicoquímicas y de salubridad [2].

A nivel internacional, las pérdidas postcosecha en granos almacenados promedian el 5%, sin embargo, en los países subdesarrollados estos porcentajes se incrementan hasta en un 30%. Para nuestro país estas pérdidas van en el orden de 10 a 30% [3, 4]. Entre otros factores, las pérdidas postcosecha se deben a la presencia de agentes bióticos como son aves, barrenador, gorgojo, gusano, hongos, palomilla, picudo y roedores. La pérdida reportada por el gorgojo (dentro del cual entra el picudo) es de 18.04% [5]. Hay aproximadamente 250 especies de insectos que dañan a los granos y sus productos durante el almacenamiento [6]. Hernández y Carballo [4] estiman que la pérdida de producción to-



tal de maíz, trigo y frijol oscila entre 5 y 25%. Los insectos de importancia económica que afectan los granos son palomillas de los graneros, palomillas de las harinas, coleópteros barrenadores, taladros y gorgojos [2]. Se estima que el daño por *Sitophilus granarius* es de 13% a nivel mundial.

En México, se registran alrededor de 25 especies de insectos que infestan semillas y granos almacenados, reduciendo la calidad fisiológica y física de la semilla y afectando la economía de los pequeños productores, en particular, de los de temporal [7]. *Sitophilus granarius*, también conocido como picudo, gorgojo de los graneros o gorgojo del trigo, ataca principalmente almacenamientos de arroz, avena, cebada, centeno, maíz, mijo, trigo y cereales quebrados. *Sitophilus granarius* [8] ronda preferentemente en áreas templadas y frías, mide de 3 a 4 mm de largo, es de color café oscuro casi negro y su tórax está densamente cubierto por depresiones ovaladas. Las hembras hacen perforaciones con las mandíbulas, dejan un huevo en su interior y sus larvas causan el principal daño, ya que consumen el endospermo y dejan un hueco [9].

El control del gorgojo puede ser físico, químico, biológico y agroecológico. Dentro de los controles químicos se encuentran los compuestos organofosforados, derivados del fósforo. Uno de estos compuestos es el fosfuro de hidrógeno o fosfina (PH_3) que es la sustancia activa que actúa como fumigante, se desprende de las tabletas de fosfuro de aluminio (AIP) en contacto con el agua del medio ambiente [10]. El gas fosfina tiene la capacidad de penetrar los empaques y productos, y así eliminar los diferentes estados de desarrollo de los insectos, a diferencia de los insecticidas, que no penetran los granos y no controlan los huevos, larvas ni pupas, de ahí la importancia de los fosfuros de aluminio y magnesio [11]. Sin embargo, los controles químicos tienen efectos negativos en los seres humanos debido a su alta capacidad de bioacumulación y la residualidad prolongada.

Este gas al liberar el compuesto volátil y liposoluble de tipo mitocondrial en concen-

traciones menores a 0.3 ppm puede detectarse por su olor, alterando el funcionamiento del impulso nervioso [12]. Los efectos en la salud humana a bajas dosis (0.02-1 ppm) son vértigo, tos, irritación pulmonar, náuseas, entre otros [13]. Es por esto, que el uso de productos naturales derivados de plantas es una alternativa viable económicamente, biodegradable y que cuida el equilibrio de los ecosistemas. Como control agroecológico se han empleado extractos de algunas plantas como *Pisum sativum*, *Vicia faba*, *Chenopodium ambrosioides*, *Argemone ochroleuca* y *Peumus boldus* [7].

El chilcuague es una planta endémica de la Sierra Gorda ubicada en los estados de Guanajuato, Querétaro y San Luis Potosí. Entre sus nombres comunes se conocen: chilcuán, pelitre, raíz de oro y raíz azteca por el sabor picante de la raíz [14]. La raíz de *H. longipes* es de importancia alimenticia, farmacéutica y medicinal para tratar enfermedades respiratorias y bucales. De la misma manera, al ser un anestésico local neutraliza la acidez estomacal y estimula el sistema inmunológico, desparasitante y desinflamante [15] por su contenido de azúcares, flavonoides, terpenos y alcanidas como la afinina. Las hojas tienen esteroides, terpenos y flavonoides [16]. La afinina (N-isobutil - 2,6,8 - dectrienoamida) destaca por su actividad insecticida, bactericida y fungicida [17], es un compuesto muy similar al piretro que se extrae de las flores de *Chrysanthemum cinerariaefolium* [18] y muestra el mismo grado de acción paralizante y de toxicidad contra insectos como la mosca doméstica (*Musca domestica*) [19], el lepidóptero *Diaphania hyalinta*, el díptero *Aedes aegypti* (vector del dengue), el mosquito vector del paludismo (*Anopheles albimanus*) [20, 21] y el gorgojo del frijol (*Acanthoscelides octectus* Say) [22]. La densidad letal media es de 234.09 ppm en el caso de ninfas de *Bactericera cockerelli* (Sulc.) (Hemiptera: Triozidae) [23]. Esta alcanida tiene aplicaciones como antimicrobiano [24], bacteriostático [25], fungicida agrícola [26], fungicida [27, 28], molusquicida [29] y larvicida [30].

El objetivo del presente artículo fue evaluar la acción bioinsecticida del extracto etanólico de diferentes órganos de *H. longipes* sobre adultos de *Sitophilus granarius* para determinar su potencial como insecticida natural en el manejo de esta plaga. El trabajo se realizó en el campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro. El diseño experimental utilizado en la investigación fue completamente al azar con 7 tratamientos y 3 repeticiones. Se realizaron muestreos a las 24 y 72 h para evaluar la mortalidad de los insectos.

METODOLOGÍA

La investigación se realizó durante 2018 en el Laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Ingeniería del campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, ubicado en El Marqués, Querétaro, México (20.703333, -100.26583). El clima del sitio experimental es un clima predominante templado semiseco.

Toma de muestra de planta de chilcuague

Se utilizaron plantas de chilcuague (véase Figura 1), cultivadas en invernadero por un año, obtenidas de dos diferentes regiones: Xichú, Guanajuato y Jalpan de Serra, Querétaro. Las plantas de chilcuague se separaron en tres partes: raíz, parte aérea (tallo, hojas y nervaduras) y flor. Cada una de estas secciones de planta se trituró en trozos pequeños.



Figura 1. Imagen que contiene flores y follaje de planta de chilcuague de un año en etapa de floración.

Macerados de diferentes partes de la planta

Las plantas de chilcuague se dividieron en tres partes: raíz, parte aérea (tallo, hojas y nervaduras) y flor (véase Figura 2). Cada una de estas secciones de planta se trituró en trozos pequeños, los cuales se colocaron en matraces Erlenmeyer, se les agregó un volumen de 400 ml de etanol, se dejaron reposar en oscuridad por 48 h y transcurrido el tiempo se filtró el líquido.



Figura 2. A) Extracto etanólico de flor Xichú de chilcuague, B) Extracto etanólico de hojas y tallos de chilcuague.

Aplicación de macerados en tratamientos con gorgojos

Se colectaron gorgojos en granos de cebada infestados, se colocaron 30 insectos por frascos y se aplicaron los diferentes tratamientos por aspersión (1 ml de macerado por unidad experimental). Los tratamientos aplicados fueron control (control químico), blanco (etanol grado alimenticio), raíz Xichú (raíz X), planta Xichú (planta X), flor Xichú (flor X), raíz Concá (raíz C), planta Concá (planta C), y flor Concá (flor C). Después de 24 h se cambió la tapa por una malla para permitir la aeración y se contaron los gorgojos sobrevivientes. Los insectos se contaron a las 24 y 72 h para calcular la tasa de mortalidad por tratamiento. Todos los tratamientos estuvieron a temperatura de 20-25° C.



Observación de daños a gorgojos

Después de transcurrir las 24 y 72 h se observaron los gorgojos muertos de cada tratamiento bajo un microscopio estereoscópico (Leica-DM500) con una ampliación visual de 5x, tomando como insectos muertos aquellos que no respondían ante un estímulo físico (Figura 3).

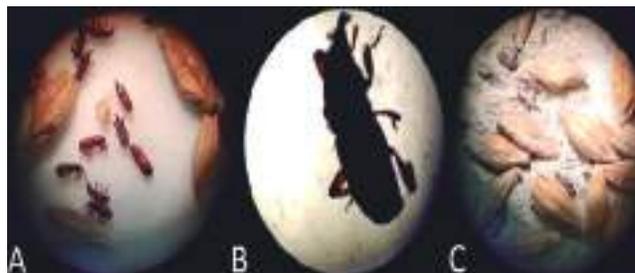


Figura 3. A) *Sitophilus granarius* a las 72 h. B) Acercamiento de *Sitophilus granarius*. C) *Sitophilus granarius* a las 72 h (Control- fluoruro de aluminio).

Diseño experimental

Se utilizaron 7 tratamientos con 3 repeticiones y una unidad experimental de 30 insectos en un diseño completamente al azar. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía por Tukey para parámetros individuales con un nivel de significancia de $p < 0.05$, utilizando el paquete estadístico Graph Pad PRISM software, versión 7.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para determinar si el extracto etanólico de la raíz, follaje y flores de chilcuague tienen efecto larvicida contra gorgojos, se expusieron adultos a los extractos de los órganos del chilcuague durante 72 h. Los resultados muestran que el extracto etanólico causa que mueran los gorgojos, cabe mencionar que su efectividad depende del órgano de la planta. La primera observación se realizó a las 24 h, donde se encontró un porcentaje de mortalidad del 100% para los tratamientos control químico y raíz C, y 99% para la planta C. Dichos trata-

mientos obtuvieron una diferencia significativa con el tratamiento raíz X en el porcentaje de mortalidad del 47% (véase Figura 4).

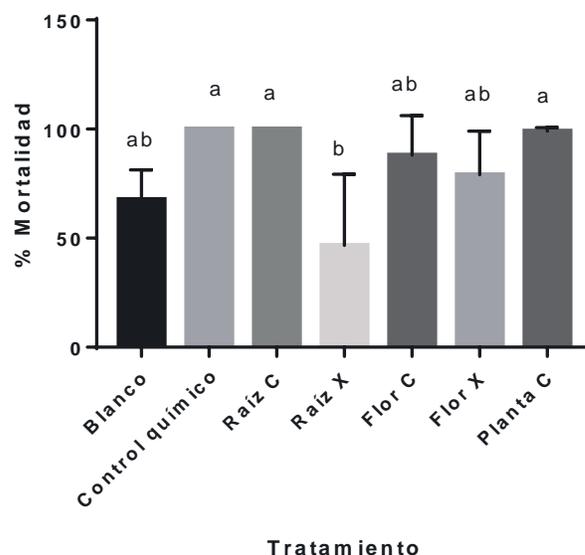


Figura 4. Resultados del porcentaje de mortalidad a las 24 h después de la aplicación con los diferentes tratamientos: control (fluoruro de aluminio), blanco (etanol), raíz Xichú (raíz X), planta Xichú (planta X), flor Xichú (flor X), raíz Concá (Raíz C), planta Concá (planta C) y flor Concá (Flor C).

La segunda observación se realizó a las 72 h, de acuerdo con el tiempo recomendado en el que hace efecto el fosforo de aluminio, el cual ya había causado la muerte del 100% de los insectos a las 24 h. Entre los tratamientos de control químico, raíz C, flor C y planta C no se observó alguna diferencia significativa, sin embargo, dichos tratamientos sí tienen una diferencia con respecto a la flor de Xichú y al blanco. La diferencia del porcentaje de mortalidad en el tratamiento con Planta C, con respecto al blanco, fue de 45.7% de mortalidad (véase Figura 5). Para los estadísticos de las Figuras 4 y 5 no se tomó en cuenta el blanco absoluto (insectos sin tratamiento alguno) debido a que en ambos casos fue menor al 10%, mostrando una diferencia significativa con respecto a todos los demás tratamientos.

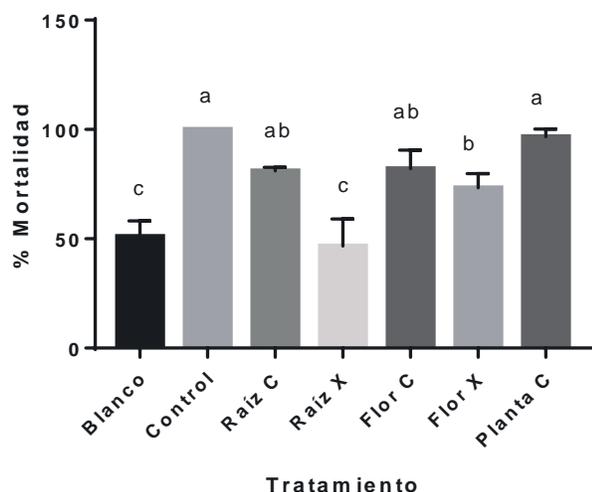


Figura 5. Resultados del porcentaje de mortalidad a las 72 h después de la aplicación con los diferentes tratamientos: control (fluoruro de aluminio), blanco (etanol), raíz Xichú (raíz X), planta Xichú (planta X), flor Xichú (flor X), raíz Concá (raíz C), planta Concá (planta C) y flor Concá (flor C).

En las observaciones a 24 y 72 h no se encontró una diferencia significativa entre los tratamientos blanco y raíz X. Por otro lado, la flor de Xichú es el único tratamiento de chilcuague que presenta una diferencia significativa con respecto al control químico, lo que indica que el contenido de metabolitos en la planta de la población de Xichú es menor que los metabolitos contenidos en la planta de la localidad de Concá. No obstante, los tratamientos de raíz, planta y flor de Concá presentan una diferencia significativa con respecto al blanco y no muestran diferencia significativa con el control, ni entre tratamientos, lo que indica que los metabolitos, la afinina u otros metabolitos, no sólo se encuentran en la raíz como lo mencionan Hernández *et al.* [15], sino también en los demás órganos de la planta.

Al no tener diferencia significativa los tratamientos de la planta de la localidad de Concá, con respecto al control químico, se sugiere que los macerados tienen mayor efecto insecticida ante *Sitophilus granarius*, coincidiendo con lo reportado por Hernández *et al.* [20], quienes encontraron un efecto de la raíz del chilcuague contra insectos

como la mosca doméstica (*Musca domestica*), el lepidóptero *Diaphania hyalinta*, el díptero *Aedes aegypti* (vector del dengue) y el mosquito vector del paludismo (*Anopheles albimanus*). Así se le atribuye a la afinina ser el mayor compuesto insecticida en la raíz de chilcuague y se le confiere las propiedades curativas y nocivas en plagas [31]. También fue observada una alta toxicidad en la mosca doméstica (*Musca domestica*) de extractos de éter de petróleo de otras especies de *Helipopsis* americanas [32]. Además, la intensa actividad insecticida de la afinina fue detectada en ensayos de inhibición de la actividad nerviosa del cerco de la cucaracha americana o roja (*Periplaneta americana*), en dosis 3.8 más tóxicas que el lindano [33]. El extracto crudo de la raíz de chilcuague ha mostrado su actividad insecticida en larvas del gusano de la nariz (*Oestrus ovis*) que ocasiona la enfermedad de rinitis-sinusitis parasitaria en ovinos y caprinos [34].

La Figura 6 muestra la diferencia de mortalidad que hay entre tratamientos y entre las dos mediciones que se tomaron (a las 24 y 78 h), donde se observó que el porcentaje de mortalidad disminuye para el blanco (de 68% a 51%), raíz C (de 100% a 81%), flor C (de 88% a 82%), flor X (de 79% a 73%) y planta C (de 99% a 97%), lo cual se debe al efecto anestésico tanto del etanol como de la afinina. Por lo que el uso de extractos de plantas es una técnica recuperada para el control de plagas en semillas y granos por los principios activos, que sean biodegradables y manteniendo el equilibrio en los ecosistemas [7], tal cual se muestra en los resultados de esta investigación. Asimismo, la estructura de la afinina sugiere que el enlace insaturado 2E en la amida parcialmente reducida es la que confiere la actividad insecticida, al igual que los dobles enlaces de las posiciones 6Z y 8E [15].

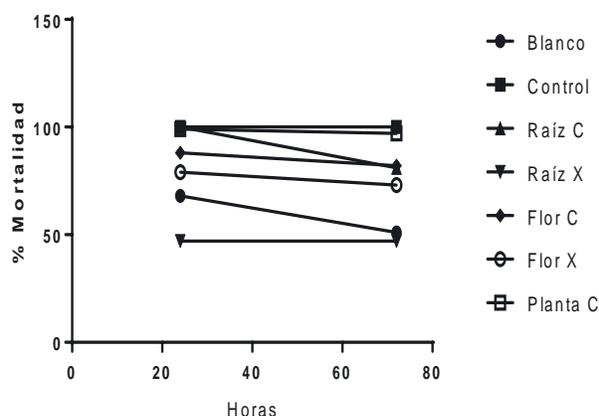


Figura 6. Comparación de los porcentajes de mortalidad a las 24 y 72 h después de la aplicación con los diferentes tratamientos: control (fluoruro de aluminio), blanco (etanol), raíz Xichú (raíz X), planta Xichú (planta X), flor Xichú (flor X), raíz Concá (raíz C), planta Concá (planta C) y flor Concá (flor C).

CONCLUSIONES

El extracto de chilcuague de los órganos de la planta como raíz, follaje y flor es una opción para el control del gorgojo (*Sitophilus granarius*) en la etapa de postcosecha de granos, debido a que los macerados de dicha planta pueden lograr una mortalidad de la plaga del 99% sin residualidad y sin causar daños en las personas que lo aplican ni en el medio ambiente. Es importante llevar a cabo una evaluación de la planta para identificar a aquellas poblaciones con una alta cantidad de metabolitos, ya que no todas las plantas contienen la misma concentración de estos, como con las plantas que proceden de Xichú. Se requiere realizar trabajos de investigación que le den continuidad a este proyecto como pruebas analíticas para la detección e identificación de los metabolitos del control del insecto en los tratamientos de extractos etanólicos de diferentes órganos de las plantas de Concá.

REFERENCIAS

[1] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, "Reportes: avance de siembras y cosechas. Resumen por cultivo", 2018.

[Online]. Available: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenDelegacion.do.

[2] R. Martínez Ruiz, G. E. Rojo Martínez, C. García Gutiérrez y B. Ramírez Valverde, *Tecnologías de Granos y Semillas*, México: Universidad Autónoma Indígena De México, 2009.

[3] S. García-Lara, C. Espinosa Carrillo y D. J. Bergvinson, *Manual de plagas en granos almacenados y tecnologías alternativas para su manejo y control*, México: CIMMYT, 2007.

[4] J. A. Hernández Guzmán y A. Carballo Carballo, *Almacenamiento y conservación de granos y semillas*. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2018.

[5] B. Gerard, *Poscosecha de granos básicos en el medio rural, Programa de Intensificación Sustentable, Cento Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT)*, 2016. [Online]. Available: <https://www.cimmyt.org/es/intensificacion-sustentable/>

[6] S. Sharma, R. Kooner y R. Arora, "Insect Pests and Crop Losses," in *Breeding Insect Resistant Crops for Sustainable Agriculture*. Singapore: Springer, 2017.

[7] M. Mendoza, G. Rodríguez, L. P. Guevara, E. Andrio, J. A. Rangel, J. G. Rivera y F. Cervantes, "Bioinsecticidas para el control de plagas de almacén y su relación con la calidad fisiológica de la semilla," *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 7, no. 7, pp. 1599-1611, 2016.

[8] C. Linnaeus, *Systema Naturae per Regna Tria Naturae, secundum Classes, Ordines, Genera, Species, cum Characteribus, Differentiis, Synonymis, Locis*. Reformata. Laurentii Salvii: Holmiae, p. 824, 1758.

[9] B. C. Longstaff, "Biology of the grain pest species of the genus *Sitophilus* (Coleoptera: Curculionidae): a critical review," *Protection Ecology*, vol. 2, pp. 83-130, 1981.

[10] M. Reyna Medina, G. F. Vázquez de Anda and J. García Monroy, "Revisión de la intoxicación aguda por fosforo de aluminio," *Crítica y terapia intensiva*, vol. 26, no. 4, pp. 242-246, 2012.

- [11] M. Reyna, A. Vázquez y M. García, "Revisión de la intoxicación aguda por fosforo de aluminio". *Revista de la Asociación Mexicana de Medicina Crítica y Terapia Intensiva*, vol. 26, no. 4, pp. 242-246, 2012.
- [12] D. G. Fernández A., L. C. Mancipe G. and D. C. Fernández A., "Intoxicación por organofosforados,". *Revista Medicina*, vol. 8, no. 1, pp. 84-92, 2010.
- [13] F. Arredondo Trujillo, M. P. Hurtado Pérez and Y. Castañeda Borrayo, "Intoxicación por fosfina en el personal sanitario," *Gaceta Médica de México*, vol. 147, pp. 350-354, 2011.
- [14] V. G. Cilia-López, J. R. Aguirre-Rivera, J. A. Reyes-Agüero and B. I. Juárez-Flores, "Etnobotánica de *Heliopsis Longipes* (Asteraceae: Heliantheae)," *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, vol. 83, pp. 81-89, 2008.
- [15] A. Hernández-Morales, J. L. Arvizu-Gómez, C. Carranza-Álvarez, B. E. Gómez-Luna, B. Alvarado-Sánchez, E. Ramírez-Chávez y J. Molina-Torres, "Larvicidal activity of affinin and its derived amides from *Heliopsis longipes* A. Gray Blake against *Anopheles albimanus* and *Aedes aegypti*," *Journal of Asia-Pacific Entomology*, vol. 18, no.2, pp. 227-231, 2015.
- [16] M. Ríos, "Natural Alkamides: Pharmacology, Chemistry and Distribution," *Drug Discovery Research in Pharmacognosy*, 2012.
- [17] S. González Morales, M. L. Flores López, A. Benavides Mendoza and A. Flores Olivas, «Actividad Inhibitoria del extracto de *Heliopsis longipes* sobre *Fusarium oxysporum* f. sp *lycopersici*," *Revista Mexicana de Fitopatología*, vol. 29, no. 2, pp. 146-153, 2011.
- [18] J. E. Casida, "Pyrethrum Flowers and Pyrethroid insecticides," *Environmental Health Perspectives*, vol. 34, pp. 189-202, 1980.
- [19] M. Jacobson, F. Acree y H. L. Haller, "Correction of the source of "affinin" (N-Isobutyl-2,6,8-decatrienoamide)," *The Journal of Organic Chemistry*, vol. 12, pp. 731-732, 1947.
- [20] A. Hernández-Morales, J. L. Arvizu-Gómez, B. E. Gómez- Luna, E. Ramírez-Chávez, M. d. R. Abraham-Juárez, G. Martínez-Soto and J. Molina-Torres, "Determinación de La Actividad Insecticida de *Heliopsis Longipes* A. Gray Blake, Una Planta Endémica Del Estado de Guanajuato" *Ra Ximhai*, vol. 8, no.3, pp. 111-118, 2012.
- [21] F. Acree and M. Jacobson, "An amide possessing insecticidal properties from the roots of *erigeron affinis* dc," *The journal of organic chemistry*, 2002.
- [22] J. A. Domínguez, D. G. Leal and D. M. A. Viñales, "Síntesis de N-isopropil y N-isobutilamida de algunos ácidos y comparación de su acción insecticida con la afinina," *Ciencia*, vol. 17, 1958.
- [23] M. Beltrán Beache, E. Cerna Chávez, J. C. Delgado Ortiz and Y. M. Ochoa fuentes, "Evaluación de la actividad insecticida de *Heliopsis longipes* (A. Gray) S. F. Blake sobre ninfas de *Bactericera cockerelli* (Sulc.) (Hemiptera: Triozidae)," *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, no 66, pp. 12-15, 2015.
- [24] J. Molina-Torres, A. García-Chávez and E. Ramírez-Chávez, "Antimicrobial properties of natural alkamides traditionally used in Mesoamerica: Affinin and Capsaicin," *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 64, pp. 241-248, 1999.
- [25] J. Molina-Torres, C. J. Salazar-Cabre-ra, C. Armenta-Salinas and E. Ramírez-Chávez, "Fungistatic and Bacteriostatic Activities of Alkamides from *Heliopsis longipes* Roots: Affinin and Reduced Amides," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 52, pp. 4700-4704, 2004.
- [26] R. Salgado-Garciglia, J. Molina-Torres, J. E. López-meza and P. D. Loeza-lara, "Effect of crude extract and bioactive compounds of *Heliopsis longipes* on anthracnose incidence, mycorrhization, and nodulation of bean," *Agrociencia*, vol. 42, pp. 679-688, 2008.
- [27] S. González Morales, M. L. Flores López, A. Benavides Mendoza y A. Flores Olivas, "Actividad Inhibitoria del Extracto de *Heliopsis longipes* Sobre *Fusarium oxysporum* f. sp *lycopersici*," *Revista mexicana de fitopatología*, vol. 29, no.2, pp. 146-153, 2011.
- [28] E. Ramírez-Chávez, L. Lucas-Valdez, G. Virgen-Calleros and J. Molina-Torres, "Actividad fungicida de la afinina y del extracto



crudo de raíces de *Heliopsis longipes* en dos especies de *Sclerotium*," *Agrociencia*, vol. 34, no. 2, pp. 207-215, 2000.

[29] V. G. Cilia-López, J. A. Reyes-Agüero, J. R. Aguirre-Rivera and B. I. Juárez-Flores, "Ampliación de la descripción y aspectos taxonómicos de *Heliopsis longipes* (Asteraceae: Heliantheae)," *Polibotánica*, vol. 36, pp. 1-13, 2013.

[30] A. Hernández-Morales, J.-L. Arvizu-Gómez, B. E. Gómez-Luna, E. Ramírez-Chávez, M. d. R. Abraham-Juárez, G. Martínez-Soto y J. Molina-Torres, "Determinación de la actividad insecticida de *Heliopsis longipes* A. Gray Blake, una planta endémica del estado de Guanajuato," *Ra Ximhai*, vol. 8, no.3, pp. 111-118, 2012.

[31] M. Jacobson, "Constituents of *Heliopsis* Species. III. cis-trans Isomerism in Affinin," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 76, pp. 4606-4608, 1954.

[32] H. Greger, "Alkamides: a critical reconsideration of a multifunctional class of unsaturated fatty acid amides," *Phytochemistry Reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 729-770, 2016.

[33] H. A. Kadir, M. B. Zakaria, A. A. Kechil, and M. D. S. Azirun, "Toxicity and electrophysiological effects of *Spilanthes amella* Murr. extracts on *Periplaneta americana* L.," *Journal of Pesticide Science*, vol. 25, no. 4, pp. 329-335, 1989.

[34] R. A. R. Del Castillo, "Efecto insecticida in vitro de la raíz de chilcúan (*Heliopsis longipes*) sobre las larvas de la mosca *Oestrus ovis*," *Universidad Nacional Autónoma de México*, 1983.

MÉTODOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS PARA LA ESTIMACIÓN DE ATRIBUTOS INTERNOS Y EXTERNOS DE CALIDAD Y MADUREZ DE UN FRUTO-UNA REVISIÓN

Destructive and non-destructive methods for the estimation of internal and external attributes of quality and ripening of a fruit-a review

Lucía Limones-Pérez, Luis Miguel Contreras-Medina

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
lucia.limones.perez@gmail.com

RESUMEN

El color es uno de los principales atributos de un fruto para determinar su calidad y con ello su valor nutricional. A través de la coloración es posible estimar otras características sensoriales tales como el olor y el sabor que éste pueda tener; estas características tienden a determinar la aceptación de los alimentos por parte del consumidor. En esa tesitura, los carotenoides pertenecen a la familia de los pigmentos presentes en las frutas y verduras que son responsables de la coloración amarillo-naranja-rojo de los diversos frutos. Para su cuantificación se han empleado técnicas tanto destructivas como no destructivas, que permiten medir así los atributos internos de las plantas con el objetivo de conocer la calidad interna y externa de un fruto. En consecuencia, el presente trabajo está basado en una descripción de técnicas y su aplicación en la industria agroalimentaria, de tal manera que pueda ser posible llevar a cabo una estimación de la calidad interna y externa del fruto, así como la definición de su etapa de maduración y determinación del tiempo óptimo de cosecha.

Palabras clave: técnicas no destructivas, color, calidad, cosecha, madurez, carotenoides.

ABSTRACT

One of the main attributes of a fruit is the color, it is mainly used for the estimation of quality and nutritional value. Through coloration, it is possible to estimate other sensory characteristics such as smell and flavor that the fruit possesses. Those characteristics strongly intervene in the acceptance of the food by the consumer. On that subject, carotenoids are part of the pigments family present in the composition of a plant or fruit. These compounds are responsible for the yellow-orange-red coloration of mainly fruits. For its quantification both destructive and non-destructive techniques have been applied, to measure the internal attributes

of plants in order to determine the internal and external quality of the fruit. Therefore, the present review will be mainly based on the description of these techniques and how they can be applied in the agri-food industry, in such a way that makes it possible to carry out the estimation and determination of the optimal harvest time.

Keywords: non-destructive techniques, color, quality, harvest, ripening, carotenoids.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), determinar la calidad de un fruto es sumamente complejo, ya que depende de la percepción generada por los sentidos, que lo asocian a experiencias previas de sabor, textura o aroma. Dichas cualidades estarán estrechamente relacionadas con factores como el clima, riego, suelo, variedad, fertilización, etcétera, [1]. Por ende, se deben determinar cuidados específicos durante la etapa de crecimiento del fruto, de lo contrario, pueden surgir defectos morfológicos o fisiológicos que afecten la calidad interna y externa [2].

Gracias a la multiplicidad de tipos de suelos, climas y ecosistemas de México es posible la elaboración de una gran variedad de productos agrícolas, tanto para consumo interno como para exportación en mercados internacionales. Aunado a eso, los productos agrícolas mexicanos gozan de gran demanda debido a su calidad. Para garantizar las cualidades de la producción nacional agrícola, México cuenta con una certificación oficial denominada: "México Calidad Suprema" [3], la cual establece a través de un procedimiento, las pautas que todo tipo de producto agrícola debe cumplir, delimitando las condiciones necesarias y suficientes para que un determinado elemento pueda ser considerado de calidad como: forma, color, textura, olor, condiciones de cultivo, etcétera.



De tal manera que para que un producto pueda ser exportado debe de cumplir con cada una de estas normas, lo que permite así su entrada a los estándares internacionales de calidad. Entre los productos agrícolas de mayor exportación se encuentran el maíz, la caña de azúcar, aguacate, pasto, sorgo, chile verde, tomate, alfalfa, trigo y papa, aportando entre 12-20 mil millones de pesos cada uno a la economía mexicana, a excepción de la caña de azúcar y el maíz, ya que van de 26-72 mil millones de pesos [4]. La calidad de un producto puede determinarse de diferentes maneras tal como se muestra en la Figura 1, cuya evaluación se lleva a cabo a través de métodos subjetivos (como los paneles de degustación) o bien por métodos objetivos (ensayos fisicoquímicos).



Figura 1. Rubros de calidad de un producto agrícola, obtenido de Universidad de Alicante (s.f.)

Usualmente, la manera de determinar si un fruto se encuentra listo para ser cosechado o no se realiza de manera subjetiva: personal experto determina cuándo un fruto está maduro por medio de la cuenta de los días después de su florecimiento o bien por los cambios en su coloración, firmeza y aroma. Estas decisiones suelen tomarse sin conocer los atributos internos que constituyen el fruto y pueden o no cumplir con los criterios de calidad establecidos.

El principal atributo observable durante la maduración de un fruto es el cambio en su coloración. Según algunos estudios, existen ciertas relaciones entre su percepción y otras características sensoriales que intervienen en la aceptación del consumidor con los alimentos, tales como color-sabor, color-olor, color-maduración, etcétera. El cambio de coloración se debe principalmente a tres clases de pigmentos denominados clorofilas (coloración verde), carotenoides (coloración roja-amarilla) y antocianinas (coloración azul-violeta) [6]. Retomando lo previamente expuesto, a través de los cambios en la coloración de un fruto es posible estudiar y analizar la evolución de las distintas etapas de maduración de una planta, así como sus cambios fisiológicos. En cuanto a esto los carotenoides son los más representativos, encontrándose con mayor frecuencia en la naturaleza, donde al menos 700 son conocidos y divididos en dos grandes grupos: los carotenos y las xantofilas [7].

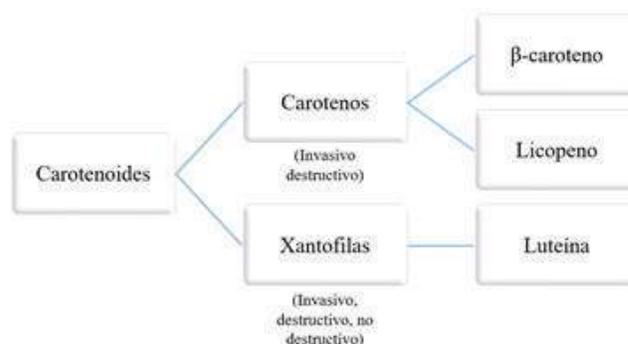


Figura 2. Clasificación de los carotenoides

Dentro del grupo de los carotenos se encuentra el β -caroteno que actúa como sustrato para la síntesis de vitamina A y otorga la pigmentación amarillo-naranja. Un ejemplo de su presencia se encuentra en las papas y en las zanahorias. El licopeno muestra una alta actividad antioxidante contra especies reactivas de oxígeno y otros radicales libres, evitando así la aparición de enfermedades degenerativas [8] y a su vez otorgando la pigmentación roja en frutos como el tomate, la sandía, toronja, fresas, entre otras frutas [9].

Debido a que el cuerpo humano es incapaz de sintetizar por sí mismo carotenoides, pero sí de llevar a cabo su metabolización a vitamina A, la única fuente de ingreso a nuestro cuerpo es por medio de su ingesta, que otorga una alta cantidad de antioxidantes, vitaminas y minerales, los cuales conllevan grandes beneficios a la salud humana como mejora de la vista, salud intestinal, así como reducción en problemas de la piel, infecciones, etcétera [10]. Algunos expertos en neurobiología (Covarrubias, Pomares, Abreu, Ortiz, M. y Aguilar, 2018) vinculan los carotenos, en especial el licopeno, con la prevención de diferentes tipos de cáncer como de pulmón, próstata, tumores, arterosclerosis, entre otros [12]. Además de prevenir ataques cardíacos hasta un 25% [13].

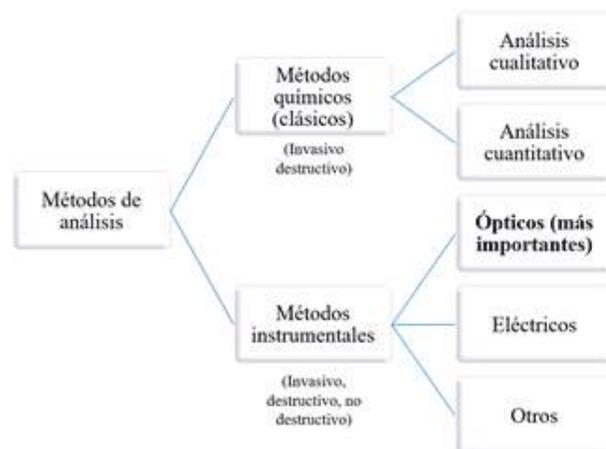
En consecuencia, es de suma importancia contar con frutos de calidad, ya que de ello dependen sus concentraciones de carotenos y otros compuestos. Así mismo, es fundamental pautar los tiempos para que la cosecha sea óptima y para evitar la recolección de frutos cuando éstos se encuentran inmaduros, lo que ocasiona mal sabor, o muy maduros, lo que genera una apariencia pobre y corto tiempo de vida. Al respecto, una forma precisa de determinar si un fruto es de calidad tanto sensorial como nutrimental es por medio de pruebas químicas, con las cuales podemos obtener información acerca del porcentaje de humedad, grasas, proteínas, aminoácidos, triglicéridos, azúcares, vitaminas, etcétera. Para llevar a cabo este tipo de pruebas es necesario tomar una porción de la muestra y prepararla, lo que puede resultar lento y costoso, además de que involucran la destrucción total o parcial de la muestra y requiere que el personal que realice estas mediciones se encuentre capacitado.

Actualmente se han desarrollado técnicas ópticas no destructivas para la estimación de compuestos y determinación del tiempo óptimo de cosecha, entre ellas se encuentra la espectroscopia, imágenes espectrales, imágenes 2D, etcétera. Este resumen se basa principalmente en la descripción de estas

técnicas y cómo han sido aplicadas a la industria agrícola en el estudio de compuestos y sus actividades antioxidantes en diferentes tipos de cultivos. De tal manera que pueda ser posible llevar a cabo una estimación de la calidad interna y externa del fruto, así como la definición de su etapa de maduración para establecer un tiempo óptimo de cosecha.

Métodos de análisis

En los últimos años, algunos investigadores enfocados al área de agricultura de precisión se han enfocado considerablemente en el desarrollo de nuevas técnicas que permitan medir los atributos de diferentes tipos de plantas y frutos, ya sea la morfología de sus hojas o bien sus atributos tanto internos como externos. Estos métodos de análisis se dividen en dos grupos, los métodos químicos, también conocidos como métodos clásicos, y los métodos instrumentales. Estos últimos se enfocan principalmente en los ópticos, ya que permiten la estimación de compuestos y análisis de calidad de diversos alimentos sin la necesidad de destruir el fruto, según sea el caso [5].



no destructivos, modificado de [5].

Entre las frutas que más se han utilizado para el estudio de la relación entre maduración-color o bien, entre color y la presencia de algunos compuestos están los tomates, manza-



nas, fresas, frambuesas, duraznos, nectarinas, mangos, plátanos, naranjas y piñas.

Métodos invasivos y destructivos

Anteriormente, para determinar la calidad de un fruto y su composición química, se llevaban a cabo pruebas químicas que, a pesar de su gran exactitud, requerían de la destrucción total o parcial de la muestra, así como el contar con un laboratorio apto para desarrollarlas. Este tipo de técnicas son comúnmente conocidas como métodos invasivos destructivos, los cuales consisten en separar la parte de interés de una planta para posteriormente analizarla en un laboratorio. El procedimiento para llevarlo a cabo se muestra en la Figura 4.

Este tipo de técnicas son conocidas como métodos sencillos, si se tiene la instrumentación correcta, ya que aportan información de los parámetros globales de los alimentos que usualmente se utilizan para dar a conocer la información nutrimental del fruto o producto, enfocado principalmente en la calidad y procesado del alimento. A continuación, se exponen en la Tabla I el uso de métodos químicos utilizados en [5] para obtener algunos atributos de calidad en alimentos como porcentaje de humedad, cenizas, proteínas tota-

les, azúcares, acidez y fibra total, la cantidad de metales en los alimentos y la cantidad de compuestos tales como clorofila, licopeno y β -caroteno, se muestra al mismo tiempo el motivo por el cual es necesario llevar a cabo estas pruebas para la industria alimentaria.

Algunos investigadores de la Universidad de Nuevo León como Candelas y Guzmán [14], muestran algunas aplicaciones de la cromatografía líquida donde compararon el contenido de licopeno en el jugo de tomate fresco con respecto al obtenido mediante secado por aspersión; seleccionaron un tomate que fue exprimido para conseguir su jugo para así posteriormente deshidratarlo con el propósito de determinar su concentración de licopeno en $\mu\text{g/g}$ tanto en el jugo de tomate como en el polvo. Así mismo se llevó a cabo la optimización del método de HPLC para la determinación de licopeno y β -caroteno en diferentes frutas y verduras [15].

Diversos investigadores de alimentos y de biotecnología de la Universidad de Sonora Bueno-solano como Campas-baypoli *et al.* [17] encontraron que por medio del uso de técnicas de HPLC es posible la cuantificación específica de la vitamina B2, también conocida como Riboflavina, trabajando principalmente con productos derivados de la leche.



Figura 4. Método de preparación de una muestra líquida y sólida, modificado de Universidad de Alicante (s.f.).

Tabla 1. Medición de atributos de calidad mediante diferentes métodos químicos [5].

Atributo	Método	Propósito	Ejemplo
Humedad (%)	<ul style="list-style-type: none"> •Evaporación •Destilación •Vacío 	<ul style="list-style-type: none"> •Etiquetado •Estabilidad de microorganismos •Calidad y procesado del alimento 	<ul style="list-style-type: none"> •Pepino 96% •Yogurt 89% •Aceite vegetal ~0%
Cenizas (%)	La muestra se muele hasta que el tamaño de partícula sea lo suficientemente pequeño, se seca 1-10 g, desengrasar	<ul style="list-style-type: none"> •Etiquetado •Estabilidad de microorganismos •Nutrición •Calidad y procesado del alimento 	<ul style="list-style-type: none"> •Alimentos frescos < 5% •Alimentos procesados hasta 12%
Proteínas totales	<ul style="list-style-type: none"> •Kjeldahl •Biuret 	<ul style="list-style-type: none"> •Fuente de energía •Contienen aminoácidos que no se sintetizan por el organismo (lisina, triptófano, metionina, leucina, isoleucina y valina) •Enzimas que aceleran procesos biológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> •6.25: Maíz, carne, huevos •6.38: Leche •5.83: Trigo, cebada, avena •5.70: Harina de trigo •5.30: Nueces
Azúcares totales	<ul style="list-style-type: none"> •Secado a vacío, molienda, extracción de lípidos, disolución en agua o EtOH 80%, filtración o centrifugación •Espectroscopia 	<ul style="list-style-type: none"> •Atributos nutricionales (consumidores) •Detección de adulteraciones •Procesado de alimentos 	<ul style="list-style-type: none"> •Cerveza •Azúcar •Arroz •Avena
Acidez total	Pruebas de pH	<ul style="list-style-type: none"> •Composición de algunos alimentos •Aditivos como conservantes •Acidulantes •Regulan el crecimiento de algunas bacterias (sustituyen antibióticos) •Contribuyen al aroma y sabor de algunos alimentos 	<ul style="list-style-type: none"> •Zumos de limón •Vinagre •Manzanas •Zumos de tomate •Café •Cerveza •Leche
Fibra total (celulosa, pectina, lignina, almidón)	Alimento molido, separación de lípidos, separación de proteínas, separación de almidón, evaporación con EtOH 80% para precipitación de la fibra.	Atributos nutricionales (consumidor)	<ul style="list-style-type: none"> •Garbanzos •Almendras •Chocolate en polvo •Higos
Métales	Espectroscopia atómica	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos esenciales: Ca, Mg, K ... • Tóxicos a elevadas concentraciones: Se, Cu, Mn ... • Elementos ausentes: Hg, As... 	<ul style="list-style-type: none"> •Carne, pollo, sardinas •Aceite •Leche, queso •Pasta
Compuestos	<ul style="list-style-type: none"> •Cromatografía líquida (HPLC) •Cromatografía de gases (CG) 	Separación y detección de compuestos (licopeno, β -caroteno, clorofila, xantosinas, etcétera)	<ul style="list-style-type: none"> •Tomate •Zanahorias •Plátano



La estimación de Riboflavina se lleva a cabo por medio de la generación una curva de calibración con base en el contenido de Riboflavina conocido, proceso similar a la obtención de licopeno y otros compuestos en diferentes frutos. Por otro lado, tomando en cuenta que el consumo de licopeno ayuda a reducir el riesgo de adquirir enfermedades degenerativas, Olaiya y Adigun, investigadores de la Universidad de Ibadan, Nigeria [18], determinaron la cantidad de licopeno pulverizando un tomate, realizando pruebas químicas con HPLC y estudiando principalmente sus implicaciones bioquímicas en la aplicación de bio-reguladores.

A pesar de que se han realizado numerosas investigaciones en tema de la cuantificación de compuestos orgánicos por medio de HPLC y otras pruebas químicas, éstas no son las únicas que existen ya que actualmente se han realizado otras investigaciones utilizando colorímetros y procesamiento digital de imágenes donde ha sido necesario destruir la muestra para el estudio de compuestos de los frutos. En la universidad de Ohio [19], se desarrolló un analizador de tomates denominado TACT (por sus siglas en inglés Tomato Analyzer Color Test), en el que partían los frutos a la mitad para obtener sus valores R, G, B, Luminosidad, L^* , a^* , b^* , matiz, y croma por medio de una cámara con fondo negro y lo corroboraron con colorímetros y diferentes tipos de escáner. Además del tomate realizaron pruebas con papa, pepino, ciruela roja, melón, zanahoria y fresas, obteniendo un coeficiente de correlación $R^2 > 0.96$, indicando que el modelo que obtuvieron es bueno.

Este tipo de métodos suelen llevarse a cabo, a pesar de que es necesaria la destrucción de la muestra, ya que muchas veces sirven como método de validación de los nuevos instrumentos en desarrollo, principalmente, para la estimación de compuestos y otros atributos en las plantas, correlacionando los datos de las pruebas químicas con los de métodos ópticos como colorimetría [20], espectroscopia [15], imágenes [21], [22]. Esto ha aportado conocimientos para generar nuevas técnicas de medi-

ción, con el propósito de evitar en su mayoría la destrucción de la muestra, un ahorro en el análisis y el desarrollo de tecnología.

Métodos invasivos y no destructivos

El color es uno de los principales atributos que definen la calidad de un fruto porque a través de una buena percepción permite la aceptación o rechazo por el consumidor final. Sin embargo, no es un indicador de la calidad interna del fruto, ya que se encuentra mayormente relacionada con su aspecto exterior. La maduración y el cambio de coloración varía en cada fruto. Li, Lecourt y Bishop [23] indican que el cambio en la coloración de un fruto se debe a que durante la maduración se lleva a cabo un proceso de degradación de la clorofila y por otro lado existe un incremento en la concentración de otros pigmentos, tales como los carotenoides. Se observa por medio de colorímetros, imágenes 2D y el uso de los diferentes espacios de color, en especial el CIE $L^*a^*b^*$, debido a que es el que más se asemeja a la percepción real del objeto.

Este tipo de métodos no requiere de la destrucción de la planta o tomar partes de ella, más bien requiere un contacto directo para realizar las mediciones necesarias. Sin embargo, en ocasiones, este tipo de técnicas pueden llegar a interferir con el crecimiento natural de la misma [24]. Por otro lado, se encuentran los métodos no invasivos, los cuales, a diferencia del método anterior, no necesitan tener un contacto directo con la planta o fruto para llevar a cabo las mediciones, de tal manera que no afectan en el crecimiento natural del cultivo.

Colorímetros e Imágenes en 2D

Son altamente utilizados en la industria de los alimentos para determinar si los frutos están satisfaciendo los requerimientos de calidad, ya que de eso depende el agrado de los consumidores con su producto, específicamente, con las salsas de tomate para pastas, jugos, etcétera. La información entregada por este

tipo de dispositivos se basa en dos espacios de color principalmente, el CIE $L^*a^*b^*$ y el Hunter Lab.

Sin embargo, el que ha tenido mayor aceptación es el CIE $L^*a^*b^*$, ya que es el modelo cromático que utiliza la descripción de todos los colores que puede percibir el ojo humano. Este espacio de color fue introducido en 1976 por la Comisión Internacional de la Iluminación, por sus siglas en francés Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), y sus magnitudes colorimétricas han sido derivadas matemáticamente de los valores triestímulo [25]. Este espacio contiene un sistema de coordenadas cartesianas, definidas por L , a^* , b^* , donde la L representa la luminosidad (valores de blanco-negro), a^* su posición entre rojo-verde y b^* entre amarillo-azul [26].

Diversos estudios han demostrado que existe mayor correlación de la coordenada cromática a^* con los cambios de maduración de un fruto [20], mientras que la coordenada cromática b^* se relaciona más con la maduración en duraznos [27]. Arias y Lee *et al.* [20] por ejemplo, reportaron una alta relación entre la cantidad de licopeno en los tomates con la relación a^*/b^* , por medio de modelos de regresión lineal, relacionando de esta manera la cantidad de licopeno del fruto con su maduración. De acuerdo con Vazquez-Cruz *et al.* [28], además de las coordenadas cromáticas L , a^* , b^* , la matiz es uno de los mejores parámetros para discernir entre diferentes etapas de maduración del tomate. Diversos autores [27], [29], [30], [20] afirman que la matiz es esencial para frutos como el tomate, durazno y guayaba.

Actualmente se han desarrollado colorímetros portátiles, utilizados principalmente para las evaluaciones de calidad en la industria alimentaria; para medir y clasificar el color de diversos productos de jitomate, como salsas, jugos, cátsup, pastas. También de construcción e incluso en aplicaciones textiles. Sin embargo, estos dispositivos cuentan con un área de medición pequeña, entre 8-11 mm de diámetro [31], por lo que es necesario tomar más muestras para otro tipo

de pruebas, o bien recurrir al uso de imágenes 2D para tener una imagen completa de la muestra. Debido a que los datos arrojados por el dispositivo son las coordenadas cromáticas CIE $L^*a^*b^*$, es necesario llevar a cabo un análisis extra, ya sea para determinar la etapa de maduración o los compuestos presentes (por ejemplo, el licopeno). Para ello, se hace uso de un análisis multivariable, con el propósito de obtener un modelo que permita la correlación entre los valores L , a^* , b^* con el objeto de interés. Entre estos métodos se encuentran la regresión lineal múltiple (MLR)[23][32], regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) [33], entre otros.

La visión por computadora comprende el estudio de procesamiento de imágenes con el único propósito de extraer información acerca de sus características para su interpretación con otras variables. La formación de imágenes es un proceso por medio del cual las cámaras imitan el comportamiento del ojo humano. Para ello se utilizan sensores de imagen, los cuales contienen sensores fotodiodos, entre ellos se encuentran los sensores CCD (por sus siglas en inglés Charge Coupled Device) y los CMOS (por sus siglas en inglés Complementary Metal Oxide Semiconductor). Su funcionamiento se basa en realizar una conversión luz-carga, donde la luz captada por el lente de la cámara es convertida en electrones y almacenada para ser transformada en una señal de voltaje para ser amplificada por la parte electrónica de la cámara [34].

Tanto los sensores CCD como los CMOS realizan los mismos pasos, la diferencia radica en la secuencia en la que lo hacen, siendo por el momento los sensores CMOS los más utilizados por su alta calidad de imagen, en comparación con los CCD [35]. Una imagen digital se encuentra compuesta por un número finito de elementos, denominados píxeles. El espacio de color RGB asume que todos los colores son combinaciones de los tres colores primarios, rojo, verde y azul, por lo que cada color se forma por combinación de tres canales. De tal manera que el píxel de



una imagen a color se encuentra compuesta por los tres valores de rojo, verde y azul. Por medio de controladores inteligentes tales como lógica difusa o redes neuronales como PNN (Probabilistic Neural Network), GRNN (Generalised Regression Neural Network), RBF (Radial-Basis Function), MLP (Multi-Layer Perceptron) [36], es sencillo llevar a cabo el análisis de maduración y/o estimación de compuestos por medio del espacio de color RGB, de otra manera, sería complicado obtener la combinación exacta entre los parámetros R, G, B. Goel y Sehgal [37] utilizaron técnicas de lógica difusa para llevar a cabo la clasificación de tomates con respecto a su etapa de maduración, alcanzando un 94.3% de exactitud, tal como se muestra en la Figura 5.

La ventaja de este método consiste en que únicamente es necesario conocer los valores R, G y B de la muestra, ya que al utilizar un controlador difuso no es necesario el uso de ecuaciones matemáticas complejas para la clasificación, sólo es necesario definir correctamente las funciones de membresía y llevar a cabo el algoritmo de aprendizaje. Por otro lado, Dadwal

y Banga [38] trabajaron con los histogramas resultantes de los frutos maduros y los compararon con los obtenidos por imágenes digitales, consiguiendo así la clasificación de frutos. Sin embargo, gracias a los valores triestímulo, es posible cambiar de un estado de color a otro, por ejemplo, RGB a $CIE L^*a^*b^*$, de tal manera que se obtendrían los mismos valores que con un colorímetro, teniendo como diferencia que un colorímetro trabaja con áreas pequeñas de inspección a diferencia de una imagen 2D, la cual puede captar el fruto completo.

Además de la maduración y estimación de carotenos [30] es posible determinar otros atributos internos de la fruta, tales como los grados Brix, cantidad de azúcares del fruto, [39], la predicción de dulzura en las fresas [40], [41], la calidad y totalidad de sólidos solubles durante las etapas de maduración y su impacto en la calidad interna de éste, tal como lo indican diversos autores [40], [42], [33], [43] con cerezas, tomates y plátanos, respectivamente. Estas técnicas también pueden ser utilizadas para determinar el área foliar de las hojas de tomate [24], la clasificación de papas

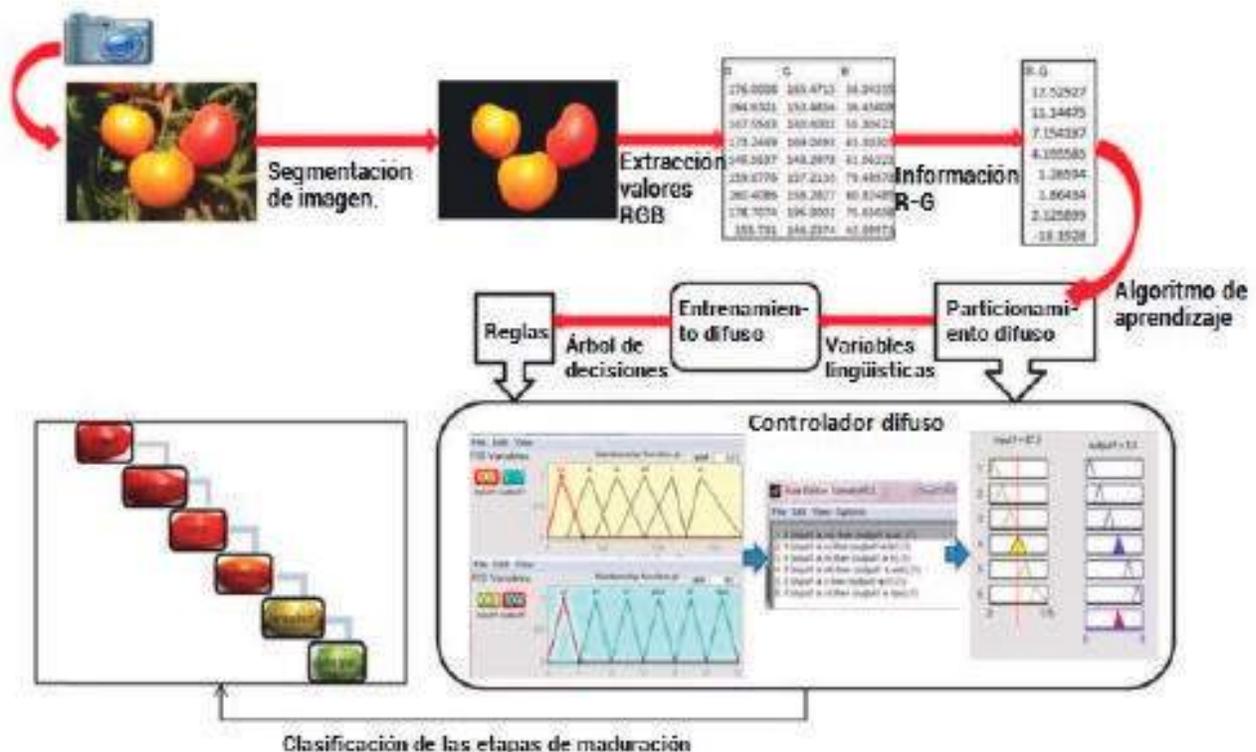


Figura 5. Clasificación de las etapas de maduración en jitomate por medio de lógica difusa

[44], la separación de fresas por forma, tamaño y color [45], la concentración de nitrógeno e índice de clorofila [46], la inspección de granos de arroz [47], la clasificación de racimos de palma aceitera [48] y la cuantificación de licopeno [49].

Así mismo, se han desarrollado robots clasificadores de fruta con respecto a su madurez de manera no invasiva con una precisión de clasificación del 94.29% [36], [37], con aplicaciones Web [50], algoritmos para discernir entre frutos, ramas, basura y otros obstáculos con una precisión de 96% [51] y la aplicación de operaciones morfológicas utilizadas como filtros para recolección de frutos en un ambiente controlado [52]. Sin embargo, estos robots únicamente se basan en la clasificación del fruto por medio de la coloración que captan los sensores de imagen dentro de ellos, mas no pueden estimar la calidad del mismo o la cuantificación de sus compuestos. Otro espacio de color comúnmente usado es el HSV (denominado así por matiz, saturación e intensidad luminosa), el cual, al igual que el CIELa*b*, otorga una

buena aproximación con respecto a la percepción del ojo humano a un objeto. Donde el valor de H define el color a detectar y la saturación describe que tan colorido es un estímulo con respecto a su propio brillo [53].

Espectroscopia VIS/NIR

Todos los cuerpos se encuentran constituidos por sustancias que se encargan de absorber y reflejar la luz blanca, por lo tanto, absorben y reflejan colores, a estas sustancias se les conocen como pigmentos. Al incidir un haz de luz sobre un objeto una parte de esa luz es absorbida y la otra parte es reflejada. De tal manera que cuando un objeto es percibido por el ojo humano como de color blanco es debido a que se refleja al 100% la luz, mientras que un objeto negro la absorbe también al 100%. Tomando lo anterior como base teórica se considera al tomate, el cual es característico por poseer una tonalidad roja, ya que absorbe el color verde y azul cuando un haz luminoso incide sobre su superficie, por lo tanto, el ojo humano únicamente recibe la

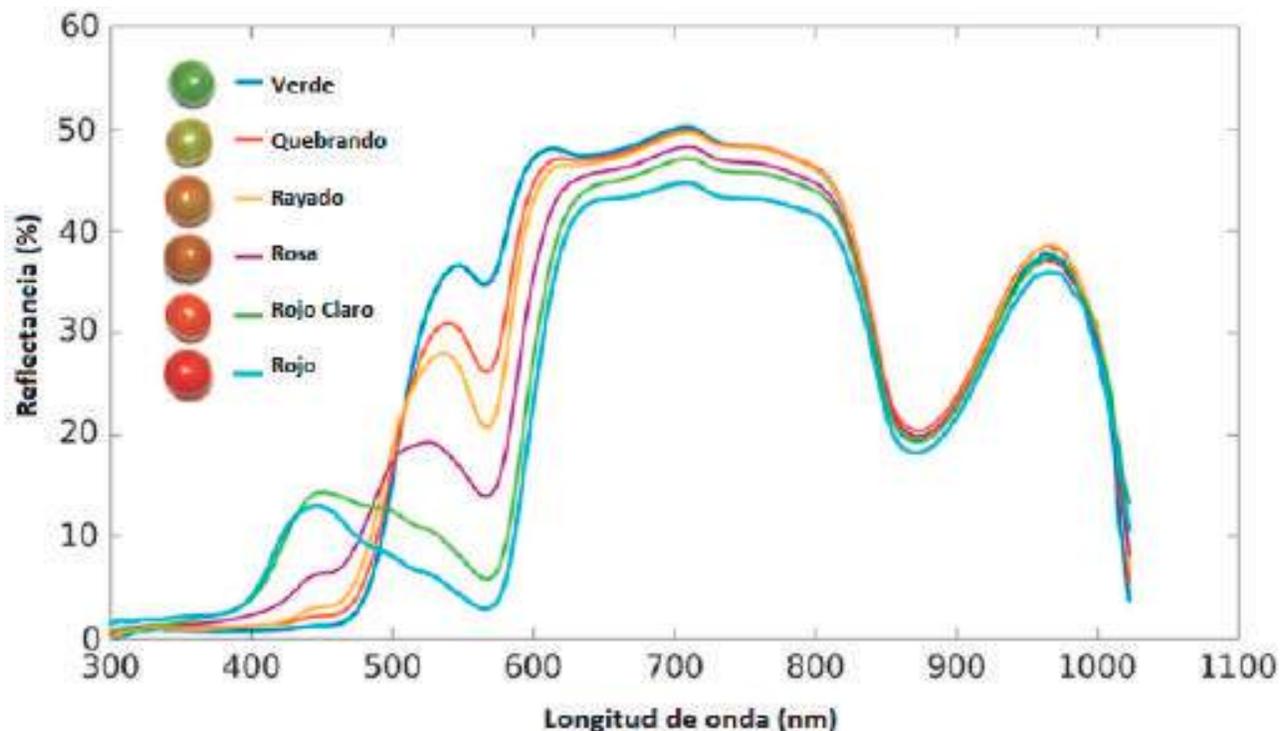


Figura 6. Cambios de reflectancia a diferentes etapas de maduración del jitomate, obtenido de Li, Lecourt y Bishop (2018).



luz roja, a diferencia del plátano que absorbe el azul y refleja el rojo y el verde, que sumados generan la tonalidad amarilla característica de los plátanos [38]. La espectroscopia visible e infrarroja se encarga de medir la reflectancia de algunos objetos entre las longitudes de onda de 380-2500 nm, lo cual depende completamente de la absorbancia de la muestra, en este caso, del fruto.

Este tipo de técnicas se utilizan principalmente para la estimación de diferentes tipos de compuestos, ya que son pruebas rápidas y no destructivas que permiten obtener una información completa acerca del fruto. Un ejemplo de esta técnica es la mostrada en la Figura 6, donde se muestra la longitud de onda utilizada y el porcentaje de la reflectancia obtenida para una muestra de tomate en sus diferentes etapas de maduración.

En la Universidad Autónoma de Querétaro, el maestro Zamudio Ramírez [21] asegura que los carotenoides pueden ser identificados por métodos espectrofotométricos con un rango de 400-500 nm del espectro visible, donde específicamente para la detección y estimación de licopeno se utiliza una longitud de onda de 530 nm. Algunos investigadores de la Universidad de Indonesia, Makky y Sonni [54], desarrollaron un espectroscopio VIS/NIR portátil para la medición de la calidad interna de racimos de palmas de olivo, el cual estaba compuesto por una caja negra con el espectroscopio montado en la superficie y una computadora portátil para el análisis de los datos. Ellos utilizaron un rango de 400-1000nm y generaron dos análisis estadísticos por medio de regresión lineal y una red perceptrón multicapa donde el modelo obtenido contaba con una R de 0.9688. En Corea del Sur, investigadores de la Universidad de Kangwon desarrollaron un algoritmo para estimación de carotenos con modelos de regresión múltiple y PLS con una R^2 del 0.97 para licopeno y 0.85 para β -caroteno [55]. A pesar de la buena estimación otorgada por estos sistemas tanto para la determinación del estado de madurez de un fruto como para la estimación de los compuestos presentes en

él, este tipo de sistemas son conocidos por ser sofisticados y costosos, debido al tipo de tecnología con la que cuentan.

Por otro lado en España, únicamente se enfocaron en el estudio de los cambios bioquímicos de un tomate en el transcurso de su maduración, donde encontraron que los compuestos con mayores variaciones durante toda la transición fueron el licopeno (aumento) y la clorofila (decremento) [56]. Así mismo se han desarrollado sistemas para la predicción de grados *Brix* en mangos, midiendo la absorción de la muestra para su estimación [47], la determinación de atributos de calidad en tomates [57], el total de sólidos solubles (TSS), la acidez (pH), la acidez valorable (TA) y el contenido de licopeno por medio de PLS [33]. Li, Lecourt y Bishop [23] afirman que para determinar la longitud de onda adecuada se selecciona la de mayor varianza en todo el espectro, pero menor colinealidad. Sin embargo, la precisión de este tipo de métodos, sobre todo para la medición de la calidad interna se encuentra influenciada por la temperatura del fruto, por lo tanto esta variable debe de ser considerada en el modelo generado [23].

Imágenes espectrales

Una imagen multiespectral (MSI) es la que captura datos de imágenes dentro de rangos de longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético, que pueden corresponder tanto al espectro visible como al infrarrojo. La obtención de este tipo de imágenes permite la extracción de información adicional que el ojo humano no captura. La imagen multiespectral divide la luz en un pequeño número de bandas espectrales (3-15). Mientras que en las hiperespectrales (HSI) a menudo hay cientos de bandas espectrales contiguas [58]. Este tipo de métodos han sido una herramienta poderosa para la inspección de calidad de un fruto, detección de enfermedades en arbustos, árboles y cultivos, detección de fallas en carretera, etcétera, de una forma no invasiva, ya que aunque es

necesario el uso de cámaras, éstas se pueden montar sobre una plataforma móvil, ya sea en un carro, un tractor, vehículos aéreos no tripulados (UAV) o bien en algún otro tipo de robot para llevar a cabo su inspección.

Al igual que las técnicas vistas con anterioridad, este tipo de técnicas lleva consigo una infinidad de datos, por lo que es necesario un análisis multivariable. En tema de optimización de la predicción de estas técnicas [23], se sugiere que para obtener mayor predicción es necesario tener una mejor dispersión espectral de las longitudes de onda seleccionadas en lugar de realizar combinaciones con técnicas de procesamiento de imágenes, incluyendo *wavelet*, *Fourier*, técnicas de estadística, entre otras, ya que en las pruebas realizadas se obtuvieron muy pocas mejoras [23].

En cuanto a sus aplicaciones se ha desarrollado un sistema basado en MSI para predicción de la firmeza y contenido de sólidos solubles (SSC) en duraznos con una R^2 de 0.94 y 0.97 [59], firmeza y TSS en fresas con R^2 de 0.94 y 0.83 respectivamente, indicando que los modelos encontrados son buenos para la estimación de estos atributos. En tema de cuantificación de licopeno, se ha utilizado MSI en combinación con métodos quimiométricos donde, utilizando PLS, se ha obtenido una R^2 de 0.938 y con redes neuronales del tipo *back propagation* una R^2 de 0.965 [60], concluyendo que la combinación de MSI con redes neuronales son una gran alternativa para la estimación de compuestos y pueden llegar a ser implementados en campo.

Las MSI son una extensión de las HSI, cuya diferencia se encuentra principalmente en que las MSI obtienen información de longitudes de onda específicas en lugar de hacer todo un escaneo completo del rango de trabajo, por otro lado, el costo de desarrollo de sistemas basados en MSI es menor que HSI, haciendo que MSI tenga mayor aplicación en el campo. Debido a lo anterior han sido mayores los estudios aplicados a la medición de atributos en plantas utilizando MSI, ya que en combinación con redes neuronales

se ha encontrado una alta correlación en la estimación de atributos de calidad, así mismo, Li, Lecourt y Bishop [23] afirman que la predicción de la firmeza obtenida con modelos generados por MSI resultan ser mayores a los obtenidos con HSI.

Sensor de gases químicos y fluorescencia

Se utiliza principalmente para la medición de clorofila del fruto, ya que la clorofila es un atributo que se va perdiendo, conforme el fruto va madurando y salen a flote otros pigmentos y para la detección de flavonoides y antocianinas. Comercialmente se ha desarrollado un fluorómetro, sin embargo, Li, Lecourt y Bishop (2018) afirman que es difícil de aplicar en el campo ya que las muestras deben de adaptarse a la oscuridad. Por ejemplo, para pruebas realizadas a papayas tuvieron que adaptarse a la oscuridad durante media hora [61].

Con este método es posible lograr una buena correlación entre la fluorescencia detectada con ciertos atributos como firmeza y SSC de manzanas frescas, clasificación de madurez en racimos de palma aceitera con una exactitud del 89.3% [62]. Por otro lado, investigadores alemanes desarrollaron un sistema de monitoreo pre y post cosecha para la estimación de madurez en tomates, monitoreando el suministro de agua para el caso precosecha y la calidad de la luz para el caso postcosecha, a partir de la medición de la clorofila del tomate [63]. Sin embargo, a pesar de las pruebas realizadas que han presentado buenos resultados, se obtuvo una baja correlación con melocotones y nectarinas [23], ya que en comparación con las manzanas éstas no fueron adaptadas a la oscuridad, haciendo que este tipo de técnicas puedan ser utilizadas principalmente en laboratorios bajo condiciones controladas.

Otra técnica novedosa, catalogada como no invasiva, fue la desarrollada por los investigadores mexicanos Durán-Acevedo, Manuel-Gualdron y Hernández-Ordoñez [64], quienes desarrollaron una nariz electrónica para determinar tres índices de madurez del



tomate de árbol, por medio de un arreglo de 16 sensores de gases químicos en conjunto con una red neuronal y la técnica PCA (análisis de componentes principales) para discriminar cada uno de los compuestos volátiles. Con la finalidad de evaluar las propiedades físicas, químicas y sensoriales (pH, grados *Brix*, sólidos solubles totales, porcentaje de ácido cítrico) de la muestra. De tal manera que el sistema alcanzó un porcentaje de exactitud de 99.886%.

CONCLUSIONES

Existen diversos métodos para la estimación de la calidad de un fruto, algunos involucran la destrucción de la muestra (pulverización, calcinación, separación de partes de ella) impidiendo su desarrollo natural. Se han desarrollado técnicas no destructivas, las cuales, dependiendo su aplicación, pueden ser invasivas o no. Este tipo de métodos presentan una sinergia con los métodos químicos, ya que para que su información pueda ser considerada verídica, es necesario recurrir a pruebas químicas, las cuales presentan la mayor exactitud. Los datos obtenidos son correlacionados con la variable de interés, de tal forma que un modelo predictivo pueda ser generado a partir de ellos. Entre los métodos no destructivos, se encuentran aquellos que son puntuales (área de estudio limitada al rango de milímetros), tal como los colorímetros, de los cuales la mayoría están basados en el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ y las técnicas de espectroscopia (RAMAN y VIS/NIR). Sin embargo, esta última a pesar de su alta precisión en la estimación de compuestos, suele conocerse como una tecnología sofisticada y de alto costo, haciéndola poco accesible para pequeños y medianos agricultores.

Para el estudio de un área superficial mayor se encuentran las imágenes 2D que, al igual que las imágenes espectrales, ya sean MSI o HSI, pueden ser montadas sobre plataformas móviles. Las imágenes espectrales suelen ser también de alto costo además de que gene-

ran una gran cantidad de conjuntos de datos, por lo que su uso se ha llevado a cabo principalmente en laboratorios y muy poco de manera *in situ*. Por tal motivo, las imágenes 2D son una buena opción no solo para la estimación de la madurez de un fruto o determinación de la calidad que éste tiene, sino que son una buena opción para el estudio de los compuestos durante sus etapas de crecimiento. Además de que es una alternativa confiable para su uso en dispositivos portátiles, ya que es una tecnología barata en comparación con técnicas de espectroscopia e imágenes espectrales que, con la generación de un buen modelo y condiciones controladas de iluminación, puede llegar a obtener una alta exactitud en la estimación de estos compuestos.

AGRADECIMIENTOS

El siguiente trabajo de investigación ha sido apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt).

REFERENCIAS

- [1] E. Kempen, *Nutrient and water use of tomato (*Solanum Lycopersicum*) in soilless production systems*. Stellenbosch University, no. December, 2015.
- [2] A. F. López, *Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas. Del campo al mercado*, pp. 95-111, 2003.
- [3] SAGARPA y Secretaría de Economía México calidad suprema, pp. 1-22.
- [4] Agrichem. (2015). Cuáles son los 10 principales productos agrícolas de México," octubre 2015. [Online]. Available: <http://agrichem.mx/cuales-son-los-10-principales-productos-agricolas-de-mexico/>.
- [5] Universidad de Alicante, " Tema 1: La Calidad de los Alimentos." [Online]. Available: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8537/3/control%20de%20calidad%20de%20los%20alimentos.pdf>

- [6] M. I. Mínguez, A. Pérez y D. Hornero-Méndez. *Pigmentos carotenoides en frutas y vegetales: mucho más que simples "colorantes" naturales*. Departamento de Pigmentos. Alimentos. Departamento de Biotecnología. Instituto de la Grasa (CSIC), pp. 2-7.
- [7] M. E. Carranco, M. C. Calvo, y F. Pérez-Gil, "Carotenoides y su función antioxidante: revisión". *Archivo Latinoamericano de Nutrición*, vol. 61, no. 3, pp. 1-8, 2011.
- [8] K. N. Waliszewski y G. Blasco, *Propiedades nutraceuticas del licopeno*. Salud publica de México, vol. 52, no. 3, pp. 254-265, 2010.
- [9] CIAD y C. Hernández, "Tomate mexicano, fuente de betacaroteno y licopeno," Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), 2016. [Online]. Available: <https://www.ciad.mx/notas/1640-tomate-mexicano-fuente-de-betacaroteno-y-licopeno.html>.
- [10] L. Guevara y D. Alvarado, "Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)," *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 18, no. 1, pp. 51-66, 2014.
- [11] D. H. Covarrubias, C. F. Pomares, G. E. A. Abreu, M. Á. D. Ortiz, y M. E. H. Aguilar, "El licopeno y su papel en la prevención del cáncer de próstata. Centro de Investigaciones Cerebrales. Universidad Veracruzana, 2018. [Online]. Available: <https://www.uv.mx/eneurobiologia/vols/2013/8/Herrera/HTML.html#>.
- [12] R. M. C. Bojórquez, J. G. Gallego y P. S. Collado, "Propiedades funcionales y beneficios para la salud del licopeno," *Nutrición Hospitalaria*, vol. 28, no. 1, pp. 6-15, 2013.
- [13] Universia México, "4 enfermedades que puedes combatir con el tomate," Universia México, 2013. [Online]. Available: <https://noticias.universia.net.mx/en-portada/noticia/2013/10/15/1056239/4-enfermedades-puedes-combatir-tomate.html>
- [14] M.G. Candelas, A. Guzmán, "Extracción y cuantificación por HPLC de licopeno en tomate y polvo de tomate Candelas," vol. 94, pp. 236-244.
- [15] A. I. O. Barba, M. C. Hurtado, M. C. S. Mata, V. F. Ruiz, y M. L. S. de Tejada, "Application of a UV-vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and -carotene in vegetables," *Food Chemistry*, vol. 95, no. 2, pp. 328-336, Mar. 2006.
- [16] A. Valenzuela, C. Yáñez y C. Golusda, "El ostión del norte chileno (*Argopecten Purpuratus*). Un alimento de alto valor nutricional". *Revista chilena*, vol. 38, no. 4, pp. 148-155, 2011.
- [17] C. Bueno-solano, O. N. Campas-baypoli, A. S. Díaz-garcía, E. I. Izaguirre-flores, W. Verdugo-zamorano y M. I. Estrada-alvarado, "Quantification of riboflavin (vitamin b2) in dairy products by hplc," vol. 36, no. 5, pp. 136-142, 2009.
- [18] C. O. Olaiya y A. A. Adigun, "Chemical manipulation of tomato growth and associated biochemical implications on flavonoid, lycopene and mineral contents," *African Journal of Plant Science*, vol. 4, no. June, pp. 167-171, 2010.
- [19] A. Darrigues, J. Hall, E. Van Der Knaap, D. M. Francis, N. Dujmovic, y S. Gray, "Tomato Analyzer-color Test: A New Tool for Efficient Digital Phenotyping," *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 133, no. 4, pp. 579-586, 2008.
- [20] R. Arias, T. Lee, L. Logendra y H. Janes, "Correlation of Lycopene Measured by HPLC with the L*, a*, b* Color Readings of a Hydroponic Tomato and the Relationship of Maturity with Color and Lycopene Content," *Journal Agricultural and Food Chemistry*, pp. 1697-1702, 2000.
- [21] O. A. Zamudio, "Procesamiento de imágenes implementado en FPGA para estimar licopeno y b-caroteno en tomate rojo y zanahoria." Querétaro, México, p. 104, 2015.
- [22] H. Ibayashi, Y. Kaneda, J. Imahara, N. Oishi, M. Kuroda y H. Mineno, "A reliable wireless control system for tomato hydroponics," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 5, 2016.
- [23] B. Li, J. Lecourt y G. Bishop, "Advances in Non-Destructive Early Assessment of Fruit Ripeness towards Defining Optimal



Time of Harvest and Yield Prediction— A Review”, *Plants*, no. January, 2018.

[24] A. Gastélum-Barrios, “Sistema basado en análisis de imágenes implementado en FPGA para estimar el grado de madurez y contenido de licopeno en tomate rojo.” p. 90, 2012.

[25] D. Wu and D. W. Sun, “Colour measurements by computer vision for food quality control—A review,” *Trends Food Science and Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 5-20, 2013.

[26] L. Molina, “Modo de color Lab,” Marzo 2010. [Online]. Available: <https://sobrecolores.blogspot.mx/2010/03/modo-de-color-lab.html>

[27] A. I. Negueruela, A. Ferrer, S. Remo y R. Oria, “Changes during the ripening of the very late season Spanish peach cultivar Calanda Feasibility of using CIELAB coordinates as maturity indices,” *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 105, pp. 435-446, 2005.

[28] M. A. Vazquez-Cruz et al., “Application of neural networks to estimate carotenoid content during ripening in tomato fruits (*Solanum lycopersicum*),” *Scientia Horticulturae (Amsterdam)*, vol. 162, pp. 165-171, 2013.

[29] E. Mercado-silva y P. Benito-bautista, “Fruit development, harvest index and ripening changes of guavas produced in central Mexico,” *Postharvest Biology and Technology*, vol. 13, pp. 143-150, 1998.

[30] C. A. Padrón Pereira, G. M. Padrón León, A. I. Montes y R. A. Oropeza, “Determinación del color en epicarpio de tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) con visión computarizada durante la maduración,” *Agronomía Costarricense*, vol. 36, no. 1, pp. 97-111, 2012.

[31] MINOLTA, “CR-400 Chroma Meter” [Online]. Available: <https://sensing.konicaminolta.us/products/cr-400-chroma-meter-colorimeter/>

[32] S. Saranwong y S. Kawano, “Improvement of PLS calibration for Brix value and dry matter of mango using information from MLR calibration. *Postharvest Biology and Technology*, vol. 295, pp. 287-295, 2001.

[33] A. G. Saad, P. Jaiswal y S. N. Jha, “Non-destructive quality evaluation of intact tomato using VIS-NIR spectroscopy,” *Journal of Advanced Research*, vol. 2, no. 12, pp. 632-639, 2014.

[34] P. Becerra, M. Tutor y C. P. Due, “Control del carril lineal y calibración de una cámara CCD en la adquisición 3D de piezas industriales,” p. 114, 2005.

[35] C. Guide and P. Videographers, “CCD and CMOS Image Sensors,” [Online]. Available: <https://sony.com/professional>

[36] M. Zaborowicz, P. Boniecki, K. Koszela, A. Przybylak y J. Przybył, “Application of neural image analysis in evaluating the quality of greenhouse tomatoes,” *Scientia Horticulturae (Amsterdam)*, vol. 218, pp. 222-229, 2017.

[37] N. Goel y P. Sehgal, “Fuzzy classification of pre-harvest tomatoes for ripeness estimation – An approach based on automatic rule learning using decision tree. *Applied Soft Computing*, vol. 36, pp. 45-56, 2015.

[38] M. Dadwal y V. K. Banga, “Color Image Segmentation for Fruit Ripeness Detection: A Review,” *ICEECE'2012*, pp. 190-193, 2012.

[39] G. Niño-Medina, J. C. Rivera-Castro, J. A. Vidales-Contreras, H. Rodríguez-Fuentes y A. I. Luna-Maldonado, “PhysicoChemical Parameters for Obtaining Prediction Models in the Postharvest Quality of Tomatoes (*Solanum Lycopersicum* L.),” *Mda*, vol. 6, no. 2, pp. 54-66, 2013.

[40] S. Taghadomi-Saberi, M. Omid, Z. Emam-Djomeh y K. H. Faraji-Mahyari, “Determination of cherry color parameters during ripening by artificial neural network assisted image processing technique,” *Journal of Agricultural Science Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 589-600, 2015.

[41] K. Raut y V. Bora, “Assessment of Fruit Maturity using Digital Image Processing,” *International Journal Science Technology and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 273-279, 2016.

[42] A. N. Khairi, M. A. F. Falah, A. Suyantohadi, N. Takahashi y H. Nishina, “Effect of Storage Temperatures on Color of Tomato

Fruit (*Solanum Lycopersicum* Mill.) Cultivated under Moderate Water Stress Treatment," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 3, pp. 178-183, 2015.

[43] F. Mendoza y J. M. Aguilera, "Application of Image Analysis for Classification of Ripening Bananas," *Journal of Food Science*, vol. 69, no. 9, pp. 471-477, 2004.

[44] A. Al-mallahi, T. Kataoka, H. Okamoto y Y. Shibata, "An image processing algorithm for detecting in-line potato tubers without singulation," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 70, pp. 239-244, 2010.

[45] X. Liming y Z. Yanchao, "Automated strawberry grading system based on image processing," *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 32-39, 2010.

[46] R. G. Raul, T. P. Irineo, R. G. Guevara-González y C. M. L. Miguel, "Biosensors Used for Quantification of Nitrates in Plants," *Journal Sensors*, vol. 2016, 2016.

[47] C. Acosta, G. Sampallo, A. G. y M. Cleva, "Detección e identificación de defectos en granos de arroz empleando visión artificial," *CAI*, pp. 98-111.

[48] M. Makky, "A Portable Low-cost Non-destructive Ripeness Inspection for Oil Palm FFB," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 9, pp. 230-240, 2016.

[49] A. Saad, A. Ibrahim y N. El-Biale, "Internal quality assessment of tomato fruits using image color analysis," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal...*, vol. 18, no. 1, pp. 339-352, 2016.

[50] I. Maya, "Remote Monitoring of Agricultural Robot Using Web Application," *IFAC Procedia*, vol. 4, no. 1, pp. 138-142, 2013.

[51] Y. Zhao, L. Gong, B. Zhou, Y. Huang y C. Liu, "Detecting tomatoes in greenhouse scenes by combining AdaBoost classifier and colour analysis," *Biosystem Engineering*, vol. 148, no. 2009, pp. 127-137, 2016.

[52] Y. Zhao, L. Gong, Y. Huang y C. Liu, "Robust tomato recognition for robotic harvesting using feature images fusion," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 2, 2016.

[53] G. Molinero Díez, "Segmentación de imágenes en color basada en el crecimiento de regiones," *ETSI*, no. *Ingeniería de telecomunicación*, pp. 5-10, 2010.

[54] M. Makky y P. Soni, "In situ quality assessment of intact oil palm fresh fruit bunches using rapid portable non-contact and non-destructive approach," *Journal Food Engineering*, vol. 120, no. 1, pp. 248-259, 2014.

[55] S. Tilahun et al., "Prediction of lycopene and β -carotene in tomatoes by portable chroma-meter and VIS/NIR spectra," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 136, pp. 50-56, Feb. 2018.

[56] J. Trebolazabala, M. Maguregui, H. Morillas, A. de Diego y J. M. Madariaga, "Portable Raman spectroscopy for an in-situ monitoring the ripening of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruits," *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 180, pp. 138-143, 2017.

[57] A. Radzevičius, J. Viškėlis, R. Karklelienė, D. Juškevičienė y P. Viškėlis "Determination of tomato quality attributes using near infrared spectroscopy and reference analysis," *Zemdirbyste-Agriculture*, vol. 103, no. 1, pp. 443-448, 2016.

[58] N. Hagen, M. W. Kudenov y N. Hagen, "Review of snapshot spectral imaging technologies Review of snapshot spectral imaging technologies," *Optical Engineering*, SPIE, 2018.

[59] L. Muhua, F. Peng, y C. Renfa, "Non destructive estimation peach SSC and firmness by multispectral reflectance imaging," *New Zealand Journal of Agricultural Research*, vol. 8233, 2010.

[60] C. Liu, W. Liu, W. Chen, J. Yang y L. Zheng, "Feasibility in multispectral imaging for predicting the content of bioactive compounds in intact tomato fruit," *Food and Chemistry*, vol. 173, pp. 482-488, 2015.

[61] I. Urbano, R. Vasconcelos, M. Azzolini, A. Pedro, y E. Caruso, "Chlorophyll fluorescence as a tool to evaluate the ripening of 'Golden' papaya fruit," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 33, pp. 163-173, 2004.



[62] M. H. M. Hazir, A. R. M. Shariff, M. D. Amiruddin, A. R. Ramli y M. Iqbal Saripan, "Oil palm bunch ripeness classification using fluorescence technique," *Journal Food and Engineering*, vol. 113, no. 4, pp. 534-540, 2012.

[63] A. M. Hoffmann, G. Noga y M. Hunsche, "Fluorescence indices for monitoring the ripening of tomatoes in pre- and postharvest phases," *Scientia Horticulturae (Amsterdam)*, vol. 191, pp. 74-81, 2015.

[64] C.M. Durán-Acevedo, O.E. Manuel-Gualdron y M. Hernández-Ordoñez, "Nariz electrónica para determinar el índice de madurez del tomate de árbol (*Cyphomandra Betacea* Sendt) Electronic Nose to Determine the Maturity Index of the Tree Tomato," *FI-UNAM*, no. 3, pp. 351-362, 2014.

DESARROLLO DE UN PRODUCTO DE PANIFICACIÓN LIBRE DE GLUTEN

Development of a gluten-free bread product

Pamela Miranda, Marcela Gaytán, Héctor Martínez

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
pame94miranda@hotmail.com

RESUMEN

La enfermedad celíaca es una enteropatía autoinmune genética, producida por la respuesta del cuerpo al gluten, y afecta al menos al 1% de la población mundial. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un producto de panificación sin gluten con harinas alternativas, proporcionando así una nueva opción para la comunidad celíaca. Mediante el uso de un diseño de mezcla, se llevó a cabo la optimización de la fórmula para la elaboración del pan y se propuso principalmente el uso de un aislado de proteína de soya con el objetivo de mejorar la textura y otras características del producto. Se evaluó la dureza, con ayuda de un texturómetro TA PLUS, como un factor determinante para la selección de la mejor fórmula, debido a que en los panes sin gluten este atributo es decisivo para la preferencia del consumidor y su aceptación sensorial.

La fórmula seleccionada quedó conformada con 64.59% de harina de camote, 18.84% de harina de sorgo y 16.57% de aislado de proteína de soya, adicionada con leche, huevo, sucralosa, sal y polvo de hornear por lo que se obtuvo un pan con sabor agradable, así como una dureza baja (<13 N) similar a la de los panes elaborados con harina de trigo. La prueba sensorial se realizó con una escala hedónica de nueve puntos, y así la fórmula seleccionada se ubicó en los niveles de gusto. La adición de aislado de soya y harina de camote permite la retención de humedad del alimento, proporcionando una textura más suave y un mayor contenido nutricional. El producto podría ser una alternativa para la población celíaca y el público en general.

Palabras clave: libre de gluten, panificación, cereales y tubérculos

ABSTRACT

Celiac disease is a genetic autoimmune enteropathy, produced by the body's response to gluten, affecting at least 1% of the world's population. The objective of the work was to

develop a gluten-free bread product using alternative flours providing a new option for the celiac community. The optimization of the formula for bread making was carried out through the use of a mixing design, the use of soy protein isolate is proposed in order to improve the texture and other characteristics of the product. The hardness was evaluated, using a TA PLUS texture analyser, as a determining factor for the selection of the best formula, because this attribute is decisive for consumer preference in gluten-free breads, as well as its sensorial acceptance.

The selected formula is conformed with 64.59% of sweet potato flour, 18.84% of sorghum flour and 16.57% of soy protein isolate enriched with milk, egg, sucralose, salt and baking powder; obtaining a bread with pleasant flavor, as well as a low hardness (<13 N) similar to wheat flour bread. The sensory test was performed with a hedonic scale of nine points, the selected formula was located in the taste levels. The addition of soybean isolate and sweet potato flour allows the moisture retention of the food, providing a smoother texture and a higher nutritional content. The product could be an alternative for the celiac population and the general public.

Keywords: gluten free, bakery, cereals and tubers

INTRODUCCIÓN

La enfermedad celíaca es una enteropatía autoinmune, producida por la respuesta del organismo al consumo de gluten, afecta por lo menos al 1% de la población global para la cual no existe una cura [1]. Dentro de las primeras alteraciones que provoca esta enfermedad se encuentra la afectación de la barrera de la mucosa intestinal [2], por lo cual se les recomienda a los pacientes como primera medida llevar una dieta libre de esta proteína [3]. Aunado a esto se ha observado que la población celíaca tiene una alta preferencia por los productos libres de azúcar [4]. El gluten se encuentra en el trigo y cereales como ceba-



da, espelta, kamut, centeno e híbridos como el triticale [6].

El consumo de panes libres de gluten cada vez es más frecuente dentro de la población, ya que no sólo la comunidad celíaca busca productos nuevos que cumplan con sus requerimientos, sino que la población en general los percibe como “más saludables” y es por ello que los incorpora con mayor frecuencia a su dieta [7]. La principal necesidad de la comunidad celíaca es la disponibilidad de productos adecuados a su restricción alimenticia que ofrezcan propiedades similares a las de los panes comerciales elaborados con harina de trigo [8].

Los panes libres de gluten (GF) se caracterizan por el uso de harinas alternativas y sus combinaciones como harina de arroz, maíz, quinoa, sorgo, nueces, tubérculos y plátano, entre otras semillas [9], así como aditivos específicos para mejorarlos, dentro de los cuales se encuentran los almidones, proteínas, fibras, grasas, hidrocoloides y enzimas específicas [10]. Sin embargo, el desarrollo de un producto de panificación libre de gluten resulta un reto tecnológico por las características que aporta esta proteína dentro de la conformación de la estructura del pan y el desafío que implica su ausencia [11]. Entre las características de los GF están la baja calidad, mala textura, poco volumen y sensación pobre en boca [12]. Según el CODEX para que un pan se pueda clasificar como libre de gluten debe tener un máximo de 20 ppm de gluten dentro del producto [13]. Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un producto libre de gluten que sirva como alternativa para la comunidad celíaca y el público en general.

METODOLOGÍA

Harinas empleadas

La harina de camote que se empleó es marca ALNUBIO (México), y fue almacenada en frascos de plástico durante todo el proyecto.

Esta harina tiene una composición de 2.9% de grasa, 6.20% de proteína, 20.80% de fibra dietética, un 60% de carbohidratos, 25% de azúcares y sodio de 0.204%. De la misma manera, se utilizó sorgo rojo de la variedad GW 9320 (LA SEMILLERÍA, México), el cual se molió en un Pulvex 300 (PULVEX SA. DE CV., México) dentro de las instalaciones del CICATA (Querétaro, México). El tamaño de malla empleado fue de 100 μm , obteniendo una harina de sorgo fina.

Formulación y proceso de elaboración

Se desarrolló un diseño estadístico de mezclas con el fin de definir las proporciones de los principales insumos: harina de camote amarillo, harina de sorgo y aislado de proteína de soya. La combinación del aislado de proteína, así como las harinas de camote y sorgo, representa el 25.9% de la formulación del producto, sin embargo, para fines prácticos del diseño de mezclas se ajustó a 100%, por lo cual la suma de los insumos en cada uno de los experimentos representa 1.

Con el propósito de acotar aquellos posibles experimentos se establecieron límites. En el caso del aislado de proteína de soya, cuya función principal es incrementar el contenido de proteína, se fijó como un intervalo del 0-20%, debido a que en la literatura se reporta que en estos porcentajes es posible obtener un aporte proteico sin afectar las propiedades visco elásticas del pan [14].

Determinación de humedad

En crisoles a peso constante se colocaron 3 g de muestra para ser secados a 105 °C en la estufa. Una vez que la muestra obtuvo un peso constante se calculó el porcentaje de peso con base en la diferencia de peso de la muestra seca y la muestra húmeda [15].

Determinación de la dureza

Se llevó a cabo un análisis del perfil de textura empleando un texturómetro TA PLUS (LLYOD

INSTRUMENTS, UK) que está equipado con una sonda cilíndrica plana de aluminio de 50 mm de diámetro. Se comprimió al 40% en dos ciclos, con una velocidad de 1.7 mm/s y una fuerza de 0.05N [16].

Evaluación sensorial

Las muestras del producto fueron evaluadas sensorialmente por 50 panelistas estudiantes de pregrado, miembros de la Universidad Autónoma de Querétaro, campus Centro Universitario. Todas las muestras fueron proporcionadas en platos color blanco a temperatura ambiente, empleando códigos de muestra de 3 cifras. Se les pidió a los panelistas evaluar varios parámetros de cada una de las muestras, los cuales fueron textura, sabor: dulce y agrado en general. Las muestras fueron calificadas en una escala hedónica de 1 a 9 puntos, siendo 1 me disgusta extremadamente y 9 me gusta extremadamente. Las puntuaciones fueron agrupadas y analizadas estadísticamente [17].

Análisis estadístico

Para llevar a cabo el análisis estadístico se empleó Minitab 17 con el fin de analizar los datos del proyecto. Se realizó un diseño de mezclas mediante el programa estableciendo límites, posteriormente se verificó el ajuste de los resultados proporcionados y se llevó a cabo una optimización. Cabe mencionar que todas las determinaciones tuvieron 3 repeticiones. En el caso de las pruebas sensoriales, el desarrollo involucró 50 panelistas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Elaboración y evaluación de las formulaciones

Dicho diseño fue elaborado al emplear Minitab 17 y el diseño de vértices extremos, debido a que se definieron límites dentro de las proporciones de los insumos a emplear [18]. El

paquete estadístico Minitab 17 arrojó un total de 9 formulaciones, de las cuales la fórmula 1 y 9 funcionan como controles para determinar el comportamiento de cada una de las harinas y facilitar la interpretación del efecto que tiene la interacción con el resto de los insumos.

Determinación esponjosidad

En la Tabla 1 se presentan los resultados de esponjosidad de los panes obtenidos de la mezcla de camote, sorgo y soya. Se observa que la formulación 3 (22.5% de harina de camote, 72.5% de harina de sorgo y 5% de aislado de soya) fue aquella que mostró una mayor altura seguida de la formulación 5 (62.5% de harina de camote, 22.5% de harina de sorgo y 15% de aislado de soya). Cabe mencionar que ambas contenían los tres elementos base. Hay una diferencia entre las formulaciones 1 y 9, que funcionan como controles, ya que en el caso de la formulación 1 elaborada solamente con harina de camote se observa la obtención de una altura baja a diferencia de la formulación 9, elaborada exclusivamente con harina de sorgo, en la que se obtuvo una mayor altura. Dichos resultados resultan similares a los reportados por Amandikwa *et al.* [16] donde se vislumbró que la altura del pan disminuía conforme se aumentaba el porcentaje de la harina de camote dentro de la formulación, lo cual se observa dentro de la Tabla con las formulaciones 6, 7, 5 y 3, variando las proporciones desde un 80% de harina de camote hasta un 22.5% y siendo la de mayor contenido de camote aquella con la menor altura. Sin embargo, siete de las formulaciones no presentaron diferencia significativa entre ellas.

En estudios previos realizados por Cardenas *et al.* [17] se distingue que panes de trigo elaborados con un 30% de harina de camote no reportan diferencia significativa respecto al pan de 100% trigo en cuanto a características sensoriales. Greene y Bovel-Benjamin [18] reportan que es posible la elaboración de panes con una sustitución del 65% de la harina por harina de camote. Por el tipo



de horneado, mediante un equipo especial para realizar cupcakes con un calentamiento por conducción, se logró favorecer la exposición de la mezcla a un calor más constante y estable en comparación con los que ofrecen los hornos de convección, lo que mejoró la capacidad de esponjar de los panes.

Las rebanadas colocadas en el papel milimétrico nos permiten observar la calidad de miga de cada una de las formulaciones y que las formulaciones 5, 6, 7 y 8 son aquellas que contienen una mayor cantidad de harina de camote, además de presentar poros de mayor tamaño que se encuentran distribuidos de manera irregular. En el caso de las rebanadas correspondientes a las formulaciones 9, 2 y 4 se presenta un menor número de poros, así como un tamaño menor, siendo éstas las fórmulas con un mayor contenido de harina de

sorgo. Marston *et al.* [19] reportan que el uso de harinas de sorgo sin un tratamiento térmico provoca la formación de geles débiles debido al lento y poco hinchamiento de los gránulos del almidón, lo cual afecta la calidad del poro en el pan, así como el volumen.

Análisis de color

Se obtuvieron los parámetros L^* , a^* y b^* de cada una de las muestras llevando a cabo las mediciones a 3 cm de la superficie. Los valores para L^* se pueden encontrar dentro de un intervalo de 0 a 100, siendo 0 totalmente translucido y 100 totalmente opaco, mientras que en el caso del parámetro a^* se tienen valores de entre -60 a 60 que van del color verde al rojo. Finalmente, el parámetro b^* va del -60 al 60, siendo éste del azul al amarillo.

Tabla 1. Efecto de la concentración de camote, sorgo y proteína en la esponjosidad (Altura) de un producto de panificación

Camote (%)	Sorgo (%)	Soya (%)	Altura (cm)
1	0	0	2.44 ± 0.21 ^{ab}
0.225	0.625	0.15	2.5 ± 0.12 ^{ab}
0.225	0.725	0.05	2.72 ± 0.11 ^{ab}
0	0.8	0.2	2.60 ± 0.14 ^{ab}
0.625	0.225	0.15	2.68 ± 0.13 ^a
0.8	0	0.2	2.14 ± 0.09 ^{ab}
0.725	0.225	0.05	2.36 ± 0.17 ^a
0.45	0.45	0.1	2.62 ± 0.13 ^c
0	1	0	2.58 ± 0.11 ^{bc}

T^{a-d} Diferentes letras indican diferencias significativas entre las medias (P < 0.05)



Figura 1. Rebanadas obtenidas de las formulaciones
*Orden de izquierda a derecha: fórmula 9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8

En la Tabla 2 se presentan los resultados de cada una de las muestras donde, en el caso del parámetro L*, referente a la luminosidad, se consiguió un valor bajo al ser oscuras las muestras. En el caso de los parámetros a* y b* se obtuvieron valores relativamente pequeños y positivos, los cuales dentro del diagrama de cromaticidad se encuentran en una combinación del rojo y amarillo. Turkut *et al.* [10] reportan para un producto de panificación elaborado con quinoa valores L* superiores a los obtenidos en la presente investigación. Las diferencias se pueden deber a que el camote tiene un color café-naranja, lo que contribuye a tener valores de L bajos (L=100 corresponde al color blanco). Se puede distinguir en la Tabla 2 que las formulaciones adicionadas con mayor concentración de harina de camote tienen los valores más bajos de L.

Dentro de la Figura 2, se puede apreciar un color ligeramente rosado respecto aquellas formulaciones con un alto contenido de harina de sorgo (fórmula 9, 2 y 3), a diferencia de las formulaciones ricas en harina de camote que resultaron tener un color un tanto café similar al de los panes comerciales con harina de trigo. La harina de sorgo por sí sola presenta un color rosado claro que le proporciona al pan, mientras que la harina de camote presenta un color amarillento anaranjado que llega a proporcionarle al pan un color café ligeramente verde seco. El tiempo de cocción es muy corto de manera que el camote evita que se prolonguen las reacciones de Maillard y caramelización en los azúcares [20], lo cual podría proporcionar un calor más oscuro al pan.

Tabla 2. Efecto de la concentración de camote, sorgo y proteína en los parámetros del color de un producto de panificación

Formulación	Camote	Sorgo	Soya	L*	a*	b*
1	1	0	0	19.54 ± 0.76d	10.43 ± 0.38fg	6.70 ± 0.56b
2	0.225	0.625	0.15	20.59 ± 0.65abc	11.24 ± 0.24bcd	7.40 ± 0.39 ^a
3	0.225	0.725	0.05	20.46 ± 0.27abcd	11.58 ± 0.35ab	7.70 ± 0.25 ^a
4	0	0.8	0.2	21.29 ± 0.54 ^a	11.48 ± 0.24abc	7.74 ± 0.33 ^a
5	0.625	0.225	0.15	19.77 ± 0.44cd	10.66 ± 0.30efg	7.14 ± 0.33ab
6	0.8	0	0.2	20.50 ± 0.85abc	10.78 ± 0.27def	7.34 ± 0.59ab
7	0.725	0.225	0.05	20.19 ± 0.39bcd	10.20 ± 0.22g	7.20 ± 0.29ab
8	0.45	0.45	0.1	20.70 ± 0.39abc	10.97 ± 0.52cde	7.69 ± 0.42 ^a
9	0	1	0	20.82 ± 0.44ab	11.89 ± 0.25 ^a	7.45 ± 0.24 ^a

*a-d Diferentes letras indican diferencias significativas entre las medias (P < 0.05)



Figura 2. Superficies de los panes obtenidos de las mezclas de harinas libres de gluten.
*Orden de izquierda a derecha: fórmula 9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8



Análisis de textura

Dentro de la Tabla 3 se pueden distinguir los resultados obtenidos de dureza para cada una de las formulaciones, de forma particular, se observa que la formulación 7 fue aquella que presentó una menor dureza, seguida de la formulación 5, siendo éstas las que poseían los tres componentes base dentro de la formulación además de que la segunda mostró un mayor contenido de proteína con respecto a la primera. Ambas formulaciones presentaron una gran cantidad de harina de camote, de manera que se le puede atribuir a ésta su suavidad, ya que en el caso de la formulación 1 al ser cien por ciento de harina de camote se observa una dureza baja. Además se vislumbró la influencia de la soya dentro de la formulación, ya que se logró una mejor retención de la humedad por parte de la proteína, ayudando de esta manera a la textura. Dentro del estudio de Amandikwa *et al.* [16] se observó que, a mayor porcentaje de harina de camote empleada, la humedad dentro del pan aumentaba estando directamente relacionada con la textura [11], y que la incorporación del aislado de proteína permite la obtención de una mejor textura, debido al alto contenido de proteínas que permite la formación de una red al promover la retención de agua y como consecuencia la mejora de la textura del pan [8].

Por otro lado, los resultados obtenidos son muy similares a los reportados por Turkut *et al.* [10] donde se elaboraron distintas formulaciones de pan a base de arroz, quinoa y trigo sarraceno adicionado con almidón de papa y goma xantana, siendo el intervalo de dureza reportado de 16.4 a 35 N. En el caso de los productos similares que se encuentran en el mercado se tienen entre las mantecadas elaboradas con harina de trigo durezas entre 8 y 12 N. Por otro lado un pan tipo de barra libre de gluten elaborado con harina de arroz que se comercializa actualmente en el mercado posee una dureza de 12N, cabe mencionar que éste en su mayoría se encuentra conformado por almidones.

Optimización de la fórmula

Los resultados obtenidos de las formulaciones fueron introducidos fijando una dureza objetivo de 13N o menos. Se obtuvo una formulación compuesta por 64.59% de harina de camote, 18.84% de harina de sorgo y 16.57% de aislado de proteína de soya.

La fórmula optimizada fue comparada con un control elaborado con harina de trigo integral, para ellos se evaluaron los parámetros de humedad, actividad de agua y dureza como se muestran en la Tabla 4. Se llevó a cabo un análisis ANOVA, con el fin de evaluar si existía

Tabla 3. Efecto de la concentración de camote, sorgo y proteína en la dureza de un producto de panificación

Formulación	Camote	Sorgo	Soya	Dureza (N)
1	1	0	0	15.03 ± 1.93c
2	0.225	0.625	0.15	25.01 ± 3.75b
3	0.225	0.725	0.05	23.65 ± 4.97b
4	0	0.8	0.2	33.766 ± 1.01 ^a
5	0.625	0.225	0.15	13.55 ± 2.68c
6	0.8	0	0.2	16.58 ± 4.58bc
7	0.725	0.225	0.05	12.85 ± 2.26c
8	0.45	0.45	0.1	18.26 ± 0.86bc
9	0	1	0	24.15 ± 1.53b

*a-d Diferentes letras indican diferencias significativas entre las medias (P < 0.05)

diferencia significativa entre las muestras con respecto a los parámetros evaluados, donde se distinguió que en el caso de la dureza las muestras tienen diferencia, sin embargo, al observar los valores obtenidos se hace evidente la dureza conseguida por el pan libre de gluten que resulta ser muy cercana a la del pan con trigo sin la necesidad de la adición de gomas o almidones. Ambas formulaciones presentan desviaciones estándar muy similares, indicando que el equipo empleado trabaja de manera constante. Los valores obtenidos respecto a la humedad y actividad de agua para ambas formulaciones resultaron muy cercanas a los valores obtenidos por N.M. Machado Alencar *et al.* [4] donde se trabajó con panes libres de gluten elaborados a base de harina de amaranto y quinoa.

Tabla 4. Resultados obtenidos de la fórmula optimizada vs el control

Parámetro	Fórmula optimizada	Control
Humedad	47.19 ± 2.26 %	46.22 ± 1.11 %
Actividad de Agua	0.97 ± 0.005	0.98 ± 0.004
Dureza	13.97 ± 0.81 N	12.18 ± 0.84 N

La formulación optimizada permite obtener una muy buena textura sin la adición de aditivos además de contener un 16.57% de aislado de proteína de soya, lo que proporciona un alto contenido en proteína. En general las características del pan resultaron ser muy similares a las del control seleccionado.

Análisis sensorial

Se empleó la fórmula optimizada (64.59% de harina de camote, 18.84% de harina de sorgo y 16.57% de aislado de proteína de soya), con tres niveles de edulcorante. Se llevó a cabo la prueba sensorial con una población de 50 estudiantes universitarios y, posteriormente, un análisis de Kruskal Wallis ($\alpha=0.05$), con

el fin de analizar los datos obtenidos por los panelistas donde se vislumbró que no existía diferencia para los atributos evaluados. Los resultados se presentan a continuación en la Tabla 5. A pesar de no presentar diferencia significativa dentro del análisis las observaciones para las formulaciones remarcaban un menor agrado por la formulación 356 y 928 en general, haciendo referencia a sabores muy tenues o muy intensos en cada una de las formulaciones respectivamente.

Tabla 5. Análisis de Kruskal Wallis aplicado a los resultados obtenidos del análisis sensorial del producto optimizado

Atributo	Valor de P
Textura	0.918
Sabor: dulce	0.237
Agrado	0.658

En cuanto a las medias obtenidas para cada uno de los atributos como se muestra en la gráfica (véase Figura 3) los valores son muy cercanos, encontrándose entre el 6-6.8 de puntuación ubicada en la zona conformada entre "me gusta levemente" y "me gusta", siendo la muestra 245 aquella que presentó el puntaje más alto para todos los atributos. La formulación seleccionada 245 fue aquella que mostró una concentración de edulcorante medio (6.79% de los insu-mos secos). Como estrategia para aumentar la aceptación de los panelistas se considera aumentar la concentración de bicarbonato de sodio con el fin de obtener una textura aún más esponjosa además de la adición de esencia de naranja con el fin de lograr un sabor más agradable que compita con la nota marcada por la harina de camote. Cabe mencionar que el sabor del camote no resultó del todo identificado por los panelistas de manera que una estrategia para lograr la aceptación del consumidor sería proporcionarle mayor información acerca del camote con el fin de promover una mejor identificación de su sabor.

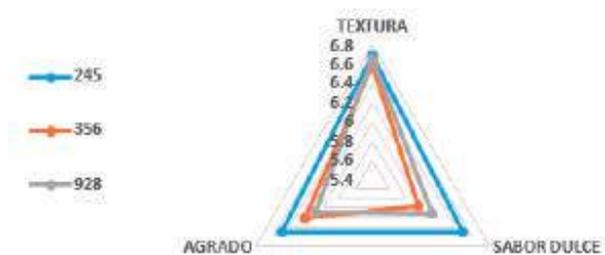


Figura 3. Gráfica de araña para las muestras evaluadas

CONCLUSIONES

Es posible el desarrollo de un producto libre de gluten con características muy similares a las de los panes elaborados con harina de trigo, empleando harina de camote amarillo y sorgo, y adicionando aislado de proteína de soya. Se optimizó la formulación del pan con una composición de 64.59% de harina de camote, 18.84% de harina de sorgo y 16.57% de aislado de proteína de soya, obteniendo un pan libre de gluten con características sensoriales y fisicoquímicas aceptables por el consumidor, así como una mejor textura que la de los que se encuentran actualmente en el mercado, sin la adición de aditivos. El uso de aislado de soya permitió una mayor retención de agua proporcionando una mejor textura, además de un aumento en el contenido proteínico respecto a los productos similares del mercado. Esta investigación abre la oportunidad del uso de harinas alternativas para la elaboración de productos de panificación para la comunidad celíaca.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por su apoyo durante toda esta investigación. A la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo proporcionado a lo largo del posgrado.

REFERENCIAS

- [1] M. J. Martínez-Esteso, J. Nørgaard, M. Brohée, R. Haraszi, A. Maquet y G. O'Connor, "Defining the wheat gluten peptide fingerprint via a discovery and targeted proteomics approach," *Journal of Proteomics*, vol. 147, pp. 156-168, 2016. doi:10.1016/j.jprot.2016.03.015.
- [2] M. Malalgoda y S. Simsek, "Celiac disease and cereal proteins," *Food Hydrocolloids*, vol. 68, pp. 108-113, 2017. doi:10.1016/j.foodhyd.2016.09.024. [Online] Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.024>
- [3] Bromilow, S., L. A. Gethings, M. Buckley, M. Bromley, P. R. Shewry, J. I. Langridge, and E. N. Clare Mills, "A curated gluten protein sequence database to support development of proteomics methods for determination of gluten in gluten-free foods," *Journal of Proteomics*, vol. 163, pp. 67-75, 2017. doi:10.1016/j.jprot.2017.03.026. [Online] Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprot.2017.03.026>
- [4] N. M. Machado Alencar, C. J. Steel, I. D. Alvim, E. C. de Moraes, and H. M. Andre Bolini, "Addition of quinoa and amaranth flour in gluten-free breads: Temporal profile and instrumental analysis," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 62, pp. 1011-1018, 2015 doi:10.1016/j.lwt.2015.02.029.
- [5] L. S. Sciarini, P. D. Ribotta, A. E. León, and G. T. Pérez, "Incorporation of several additives into gluten free breads: Effect on dough properties and bread quality," *Journal of Food Engineering*, vol. 111, pp. 590-597, 2012. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.03.011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.011>
- [6] Blanco, C. A., F. Ronda, B. Pérez, and V. Pando, "Improving gluten-free bread quality by enrichment with acidic food additives," *Food Chemistry*, vol. 127, pp. 1204-1209, 2011. doi:10.1016/j.foodchem.2011.01.127. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.127>
- [7] Capriles, V. D., F. G. dos Santos, and J. A. G. Arêas, "Gluten-free breadmaking: Improving nutritional and bioactive compounds,"

Journal of Cereal Science, vol. 67, pp. 83-91, 2016. doi:10.1016/j.jcs.2015.08.005.

[8] Naqash, F., A. Gani, A. Gani, and F. A. Masoodi, "Gluten-free baking: Combating the challenges - A review," Trends in Food Science & Technology. Vol. 66, pp. 98-107, 2017. doi:10.1016/j.tifs.2017.06.004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.004>

[9] Mohammadi, M., N. Sadeghnia, M. H. Azizi, T. R. Neyestani, and A. M. Mortazavian, "Development of gluten-free flat bread using hydrocolloids: Xanthan and CMC," Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 20, pp. 1812-1818, 2014. doi:10.1016/j.jiec.2013.08.035. [Online] Available : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2013.08.035>

[10] Turkut, G. M., H. Cakmak, S. Kumcuoglu, and S. Tavman, "Effect of quinoa flour on gluten-free bread batter rheology and bread quality," Journal of Cereal Science, vol. 69, pp. 174-181, 2016. doi:10.1016/j.jcs.2016.03.005. [Online] Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2016.03.005>

[11] M. G. B. Cadioli, M. A. B. Rodas, M. L. Garbelotti, E. Marciano, and M. S. Taipina, "Development and Nutritional Composition and Sensory Comparison Between Acceptance and Bread Traditional High Soy Protein and Soluble Prebiotic Fiber," Procedia Food Science, vol. 1, no. 1, pp. 1980-1986, 2011.

[12] AOAC, 1998. AOAC Official Methods of Analysis. Method 991.43, Total, Soluble, and Insoluble Dietary Fiber in Foods. Association of Official Analytical Chemists International, Gaithersburg, Maryland, 1998.

[13] D. Elgeti et al., "Volume and texture improvement of gluten-free bread using quinoa white flour," Journal of Cereal Science, vol. 59, no. 1, pp. 41-47, 2014.

[14] N. S. Eshak, "Sensory evaluation and nutritional value of balady flat bread supplemented with banana peels as a natural source of dietary fiber," Annals of Agricultural Sciences, vol. 61, no. 2, pp. 229-235, 2016.

[15] A. A. Ortega-Pérez, D. C. Bustamante-Rua, M. O. Gutiérrez-Rôa, D. F. Correa-Espinal, "Mixture experiments in industrial formula-

tions," Dyna, vol. 82, no. 189, pp. 149-156, 2015.

[16] C. Amandikwa, M. O. Iwe, A. Uzomah, and A. I. Olawuni, "Physico-chemical properties of wheat-yam flour composite bread," Nigerian Food Journal, vol. 33, no. 1, pp. 12-17, 2015

[17] H. Cardenas, J. Kalinowski, Z. Human, G. Scott, "Nutritional evaluation of sweet potato cultivars Ipomea batata (L.) Lam used in bread as a partial substitute of wheat flour," Archivos Latinoamericanos de Nutrición, vol. 43, pp. 304-9, 1993.

[18] J. L. Greene and A. G. Bovel-Benjamin, "Macroscopic and sensory evaluation of bread supplemented with sweet potato flour," Journal of Food Science, vol 69, pp. 167-173, 2004.

[19] K. Martson, H. Khouryieh and F. Aramouni, "Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake," LWT-Food Science and Technology, vol. 65, pp. 637-644, 2016.

[20] E. Purlis, "Bread baking: Technological considerations based on process modelling and simulation," Journal of Food Engineering, vol. 103, no. 1, pp. 92-102, 2011.

La presente edición del tercer número de
Perspectivas de la Ciencia y de la Ingeniería
fue maquetada en Diseño e Imagen de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Autónoma de Querétaro
por Sofía Amaya Alcalá
El cuidado de la edición estuvo a cargo de
Daniela Pérez y Soid Lazlo Ruíz.
Se publicó en julio del 2019 en
Santiago de Querétaro, Qro., México.

