

Agrociencia

Volumen 56, Número 1

1 de enero - 15 de febrero, 2022



Dr. Víctor Arturo González Hernández
Investigador Nacional Emérito
Premio Estatal de Ciencia y Tecnología del
Gobierno del Estado de México 2021

DIRECTORIO

DIRECTOR DE AGROCIENCIA

Said Infante Gil

DIRECTOR ADJUNTO DE AGROCIENCIA

Fernando Carlos Gómez Merino

SUBDIRECTORA DE AGROCIENCIA

Ana Rita Román Jiménez

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL

Roger Austin (**Inglaterra**)

José Sarukhán Kermez (**México**)

Barry C. Arnold (**EUA**)

COMITÉ ASESOR EDITORIAL INTERNO

Jorge Alvarado López

Jorge D. Etcheverría Barra

Víctor A. González Hernández

Leopoldo E. Mendoza Onofre

José A. Villaseñor Alva

RESPONSABLES DE LA EDICIÓN

Said Infante Gil

Fernando Carlos Gómez Merino

Ana Rita Román Jiménez

FORMACIÓN, DISEÑO Y MAQUETACIÓN

L. Brenda Espejel Lagunas

TRADUCTORES

Inés Enriquez

Katharine McDevith

Elena Preciado Gutiérrez

Joel Castillo González

COSECHADOR DE METADATOS

Moises Quintana Arévalo

APOYO

Belem M. Villegas Contreras

Yolanda Feroso Meraz

Oscar Vieyra Durán

DERECHOS DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS, **Volumen 56, número 1, 1 de enero - 15 de febrero, 2022**, Agrociencia es una publicación sesquimensual editada por el Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP 56230. Tel. 5959284427. www.colpos.mx. Editor responsable: **Dr. Said Infante Gil**. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2021-031913431800-203. ISSN: 1405-3195. eISSN: 2521-9766, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Dr. Said Infante Gil. Fecha de última modificación, **23 de febrero del 2022**.

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

Toda correspondencia (información de suscripciones, ventas, publicidad, contribuciones de autores, etc.) deberá dirigirse a:

~~~~~  
Oficinas Centrales:

#### DIRECTOR DE AGROCIENCIA

Guerrero #9, Esquina Avenida Hidalgo.

56220. San Luis Huexotla. Texcoco, Estado de México

Apartado Postal 56

56230, Suc. Chapingo, Estado de México

Teléfono: 595 92 84427

agrociencia@colpos.mx

<http://www.colpos.mx/agrocien/agrociencia.htm>  
~~~~~

Aviso: Los nombres comerciales citados en los artículos, notas o ensayos, de ninguna manera implica patrocinio por parte de Agrociencia, ni crítica alguna a otros productos similares.

Portada: Dr. Víctor Arturo González Hernández



AGRICULTURA

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

CONTENIDO ❖ CONTENTS

Volumen 56

1 de enero - 15 de febrero, 2022

Número 1

Agua-Suelo-Clima ⇌ Water-Soil-Climate

EVALUACIÓN HÍDRICA Y AGRONÓMICA DE HÍBRIDOS DE MAÍZ EN RESPUESTA A DIFERENTES AMBIENTES Y DOSIS DE NITRÓGENO ⇌ WATER AND AGRONOMIC EVALUATION OF MAIZE HYBRIDS IN RESPONSE TO DIFFERENT ENVIRONMENTS AND NITROGEN DOSES
Homero **Alonso-Sánchez**, Margarita **Tadeo-Robledo**, Alejandro **Espinosa-Calderón**, Benjamín **Zamudio-González**, Job **Zaragoza-Esparza**, Consuelo **López-López**..... 1

UTILIZACIÓN DEL ISÓTOPO RADIOACTIVO CESIO-137 PARA EVALUAR LA TASA DE EROSIÓN EN UNA LADERA DEGRADADA EN MÉXICO ⇌ USE OF THE RADIOACTIVE ISOTOPE CESIUM-137 TO EVALUATE THE EROSION RATE ON A DEGRADED SLOPE IN MEXICO
Samuel **Tejeda**, Eva Margarita **Melgar-Paniagua**, Marcos **Tassano**, Graciela **Zarazúa**, Mirel **Cabrera**, Joan Manuel **González**, Nancy **Lara-Almazán**..... 16

Biotecnología ⇌ Biotechnology

FRIJOL GENÉTICAMENTE MODIFICADO CON LA DEFENSINA RECOMBINANTE *pdf1.2* TOLERANTE A PUDRICIONES DE LA RAÍZ ⇌ COMMON BEAN GENETICALLY MODIFIED WITH THE RECOMBINANT DEFENSIN *pdf1.2* TOLERANT TO ROOT ROT DISEASE
Bertha María **Sánchez-García**, María Alejandra **Mora-Avilés** 31

Fauna Silvestre ⇌ Wildlife

PERFIL LEUCOCITARIO, MICRONÚCLEOS Y PROLONGACIONES NUCLEARES ERITROCITARIOS EN GORRIONES (*Centronyx bairdii* y *Ammodramus savannarum*) DEL DESIERTO CHIHUAHUENSE DURANTE EL INVIERNO ⇌ LEUKOCYTE PROFILE, MICRONUCLEUS AND ERYTHROCITARY NUCLEAR PROTRUSIONS IN SPARROWS (*Centronyx bairdii* and *Ammodramus savannarum*) OF THE CHIHUAHUENSE DESERT DURING THE WINTER
Martín Emilio **Pereda-Solís**, Claudia Selene **Guillén-González**, Karina **Ramírez-Carreño**, José Hugo **Martínez-Guerrero**, Daniel **Sierra-Franco**, Manuel Armando **Salazar-Borunda**, Olivia **Torres-Bugarín** 46

Fitociencia ⇌ Crop Science

INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN LÁSER ROJA EN EL VIGOR DE SEMILLAS DE TOMATE AFECTADAS POR ENVEJECIMIENTO ⇌ INFLUENCE OF RED LASER RADIATION ON THE VIGOR OF TOMATO SEEDS AFFECTED BY AGING
Carlos Francisco de Jesús **Rivera-Talamantes**, Alexandre **Michtchenko**, Andrei **Budagovsky**, Gabriela **González-López**, Ekaterina **Grosheva**..... 61

ÁREA FOLIAR Y RENDIMIENTO DE *Physalis angulata* L. EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE POBLACIÓN Y UREA DE LIBERACIÓN LENTA ⇌ LEAF AREA AND YIELD OF *Physalis angulata* L. AS FUNCTIONS OF POPULATION DENSITY AND SLOW RELEASING UREA
Adrián **Ordoñez-Monroy**, Edgar Jesús **Morales-Rosales**, José Antonio **López-Sandoval**, Edgar Javier **Morales-Morales**, Gabriela **Salomón-Hernández**..... 74

Recursos Naturales Renovables ⇌ Natural Renewable Resources

FUNCIONES DE DURAMEN Y SISTEMAS COMPATIBLES DE AHUSAMIENTO Y VOLUMEN COMERCIAL PARA *Acacia mangium* Willd. EN, TABASCO, MÉXICO ⇌ HEARTWOOD FUNCTIONS AND COMPATIBLE TAPER AND MERCHANTABLE VOLUME SYSTEMS FOR *Acacia mangium* Willd. IN, TABASCO, MEXICO

Montserrat Berenice **Sánchez-Banda**, Héctor Manuel **De los Santos-Posadas**, José René **Valdez-Lazalde**, María Angélica **Roldán-Cortés**..... 88

Socioeconomía ⇌ Socioeconomics

INFORMATION SOURCES IMPACT ON THE ADOPTION OF PRECISION TECHNOLOGY BY COTTON PRODUCERS IN THE UNITED STATES ⇌ FUENTES DE INFORMACIÓN IMPACTAN LA ADOPCIÓN DE TECNOLOGÍA DE PRECISIÓN POR PRODUCTORES DE ALGODÓN EN LOS ESTADOS UNIDOS

Carlos I. **García-Jiménez**, Margarita **Velandia**, Dayton M. **Lambert**, Ashok K. **Mishra**..... 108

EVALUACIÓN HÍDRICA Y AGRONÓMICA DE HÍBRIDOS DE MAÍZ EN RESPUESTA A DIFERENTES AMBIENTES Y DOSIS DE NITRÓGENO

WATER AND AGRONOMIC EVALUATION OF MAIZE HYBRIDS IN RESPONSE TO DIFFERENT ENVIRONMENTS AND NITROGEN DOSES

Homero **Alonso-Sánchez**¹, Margarita **Tadeo-Robledo**^{1*}, Alejandro **Espinosa-Calderón**²,
Benjamín **Zamudio-González**², Job **Zaragoza-Esparza**¹, Consuelo **López-López**¹

¹ Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Carretera Cuautitlán-Teoloyucan km 2.5, Col. San Sebastián Xhala, Cuautitlán Izcalli, Estado México, México. C. P. 54700.

² Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250.

* Corresponding author: tadeorobledo@yahoo.com

RESUMEN

Para lograr la seguridad hídrica y alimentaria es necesario identificar cultivos que destaquen respecto al uso eficiente del agua. En México, la región de los Valles Altos presenta frecuente escasez de agua, por lo que se requiere caracterizar genotipos de maíz que muestren caracteres sobresalientes en condiciones de baja disponibilidad hídrica. El objetivo de este trabajo fue identificar la productividad del agua, el rendimiento y el peso hectolítrico de híbridos de maíz blanco cultivados en Valles Altos. En el experimento se utilizaron 10 híbridos de maíz blanco; cinco de la UNAM y cinco del INIFAP. Esos híbridos se establecieron bajo dos niveles de fertilización nitrogenada (bajo: 80 kg ha⁻¹ y alto 160 kg ha⁻¹) en dos ambientes: FESC-UNAM (Cuautitlán Izcalli) y CEVAMEX (Texcoco) en el Estado de México. El experimento se estableció como bloques completos al azar, se registraron las variables para calcular el rendimiento de grano en la humedad comercial del 14 % y relacionado con el volumen de agua que ingresó en cada ambiente, se identificó la productividad total del agua. El análisis estadístico se realizó con SAS y las medias se compararon con la prueba de Tukey. Con un análisis combinado, se encontró interacción significativa del ambiente con los híbridos y con la fertilización nitrogenada en el rendimiento de grano. La productividad total del

ABSTRACT

To achieve water and food safety, it is necessary to identify crops outstanding in regard to efficient water use. In Mexico, the Valles Altos region has frequent water scarcity, so it is necessary to characterize maize genotypes that show outstanding traits under conditions of low water availability. The objective of this study was to identify water productivity, yield and hectolitre weight of white maize hybrids grown in Valles Altos. Ten white maize hybrids were used in the experiment; five from UNAM and five from INIFAP. These hybrids were established under two levels of nitrogen fertilization (low: 80 kg ha⁻¹ and high 160 kg ha⁻¹) in two environments: FESC-UNAM (Cuautitlán Izcalli) and CEVAMEX (Texcoco) in the State of Mexico. The experiment was established as randomized complete blocks, variables were recorded to calculate grain yield at 14 % commercial moisture and related to the volume of water entering each environment, the total water productivity was identified. Statistical analysis was performed with SAS and means were compared with Tukey's test. With a combined analysis, a significant interaction of environment with hybrids and nitrogen fertilization was found in grain yield. Total water productivity, estimated at an overall mean of 0.78 kg m⁻³, was significant for environments, hybrids and nitrogen dosage. Grain yield showed an overall average of 4.8 Mg ha⁻¹. In hectolitre weight, a significant difference was found in the environment and hybrid factors, with an

agua, estimada en promedio general de 0.78 kg m^{-3} , resultó significativa para ambientes, híbridos y dosis de nitrógeno. El rendimiento de grano mostró una media general de 4.8 Mg ha^{-1} . En peso hectolítrico se encontró diferencia significativa en los factores ambiente e híbrido, con promedio general de 73.8 kg hL^{-1} . La productividad total del agua resultó superior en el ambiente de la FESC-UNAM donde no se suministró riego y sin diferencia significativa del rendimiento de grano.

Palabras clave: *Zea mays*, niveles de nitrógeno, productividad del agua, rendimiento de grano.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de humedad es determinante en la productividad del maíz. Conforme el agua almacenada en la zona radical de la planta se agota y se acentúa la ausencia de lluvias y riegos, la planta empieza a sufrir cambios metabólicos y fisiológicos. En maíz, es difícil compensar la pérdida en productividad aun después de que el período de estrés hídrico se supera mediante riego o precipitación (Steduto *et al.*, 2012).

La relación de los elementos esenciales para las plantas cultivadas con la disponibilidad de humedad para mejorar la productividad del agua se investiga desde hace tiempo (Navarro y Navarro, 2013). Con ello se pretende desarrollar materiales híbridos para condiciones deficitarias de agua y nitrógeno. Se ha estudiado el efecto del nivel de humedad y nitrógeno (N) en el comportamiento de híbridos modernos, antiguos y maíces criollos (Kibet *et al.*, 2009). También se ha abordado productividad total del agua en relación con la fertilización nitrogenada en híbridos de maíz (Díaz *et al.*, 2014). Así mismo, se han desarrollado protocolos especiales para conocer el efecto de la fertilización nitrogenada en híbridos de maíz (Zamudio *et al.*, 2018; Cervantes-Ortiz *et al.*, 2013)

La deficiencia de nutrientes minerales tiene impacto notable en la productividad del maíz y la deficiencia más común es la de nitrógeno. El N es el macronutriente de mayor demanda y con más deficiencias en la mayoría de los sistemas de producción, lo que afecta directamente las variables del rendimiento, y su aprovechamiento edáfico se relaciona con la disponibilidad de humedad en el

overall average of 73.8 kg hL^{-1} . Total water productivity was higher in the FESC-UNAM environment where irrigation was not provided, with no significant difference in grain yield.

Keywords: *Zea mays*, nitrogen levels, water productivity, grain yield.

INTRODUCTION

Water availability is a determining factor in maize productivity. As the water stored in the root zone of the plant is depleted and the absence of rainfall and irrigation is accentuated, the plant begins to undergo metabolic and physiological changes. In maize, it is difficult to compensate for the loss in productivity even after the period of water stress is overcome by irrigation or precipitation (Steduto *et al.*, 2012).

The relationship of essential elements for cultivated plants with moisture availability to improve water productivity has long been investigated (Navarro and Navarro, 2013). This is intended to develop hybrid materials for water and nitrogen deficient conditions. The effect of moisture and nitrogen (N) levels on the performance of modern hybrids, old hybrids and creole maize has been studied (Kibet *et al.*, 2009). Total water productivity in relation to nitrogen fertilization in maize hybrids has also been addressed (Díaz *et al.*, 2014). Likewise, special protocols have been developed to know the effect of nitrogen fertilization in maize hybrids (Zamudio *et al.*, 2018; Cervantes-Ortiz *et al.*, 2013).

Mineral nutrient deficiency has remarkable impact on maize productivity and the most common deficiency is nitrogen. N is the macronutrient with the highest demand and most deficiencies in most production systems, which directly affects yield variables, and N edaphic utilization is related to soil moisture availability (Navarro and Navarro, 2013). Therefore, in order to stimulate maize production, the N contribution to the crop during the growth and production cycle should be between 180 and 340 kg ha^{-1} (Steduto *et al.*, 2012).

In Mexico, maize is remarkable for its socioeconomic importance and recent research on total water productivity (PTA) in relation to N contribution in materials from Valles Altos is scarce. In addition, it

suelo (Navarro y Navarro, 2013). Por eso, con el fin de estimular la producción de maíz, la aportación de N al cultivo durante el ciclo de crecimiento y producción debe estar entre 180 y 340 kg ha⁻¹ (Steduto *et al.*, 2012).

En México el maíz destaca por su importancia socioeconómica y son escasos los trabajos recientes sobre productividad total del agua (PTA) en relación con el aporte de N en materiales de Valles Altos. Además, se requiere comparar el comportamiento de varios híbridos en un estudio completo de cada uno de ellos para conocer su rendimiento e inferir su productividad (Noriega-Navarrete *et al.*, 2021). El objetivo del presente estudio fue identificar la productividad total del agua de 10 híbridos de maíz blanco en relación con la fertilización nitrogenada en dos ambientes de los Valles Altos de México. La hipótesis fue que alguno de los híbridos muestra productividad total del agua mayor cuando la cantidad de agua que ingresa al sistema de producción es menor y se presentan granos más densos, pero el rendimiento se reduce; la dosis de nitrógeno aumenta la productividad total del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales

Un experimento se instaló en cada ambiente en condiciones de campo. El primero, se estableció el 25 de junio de 2019 en el Campo Experimental de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la Universidad Nacional Autónoma de México (FESC-UNAM), en Cuautitlán Izcalli, Estado de México (19° 41' 49" LN y 99° 41' 36" LW), a 2250 msnm. La zona presenta precipitación media normal de 705.4 mm y temperatura media normal de 15.3 °C. El segundo ambiente se sembró el 20 de junio de 2019 en el Campo Experimental del Valle de México (CEVAMEX) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Santa Lucía, Texcoco, Estado de México (19° 29' 29" LN y 98° 54' 29" LW), a 2244 msnm, con precipitación media normal de 618 mm y temperatura media anual de 16.0 °C.

Material genético y diseño experimental

En los dos ambientes se sembraron cinco híbridos trilineales de maíz del INIFAP: H-50, H-47 AE, H-45 AE, H-53 AE, H-51 AE; también cinco híbridos de la UNAM; Tsiri Puma, Tlaoli Puma, Atziri Puma, Ixim Puma y Cuxi

is required to compare the performance of several hybrids in a complete study of each of them to know their yield and infer their productivity (Noriega-Navarrete *et al.*, 2021). The objective of this study was to identify the total water productivity of 10 white maize hybrids in relation to nitrogen fertilization in two environments in the Valles Altos, Mexico. The hypothesis was that some of the hybrids show higher total water productivity when the amount of water entering the production system is lower, and denser grains are present, but yield is reduced; the nitrogen dose increases total water productivity.

MATERIALS AND METHODS

Experimental sites

One experiment was set up in each environment under field conditions. The first one, was established on June 25, 2019, at the Experimental Field of the Cuautitlán Higher Studies Faculty under the Autonomous National University of Mexico (FESC-UNAM), in Cuautitlán Izcalli, State of Mexico (19° 41' 49" LN and 99° 41' 36" LW), at an altitude of 2250 m. The area has a normal average rainfall of 705.4 mm and a normal average temperature of 15.3 °C. The second environment was planted on June 20, 2019, at the Experimental Campus Valle de México (CEVAMEX) under the National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research (INIFAP), in Santa Lucía, Texcoco, State of Mexico (19° 29' 29" N and 98° 54' 29" W), at 2244 m of altitude, with mean normal precipitation of 618 mm and mean annual temperature of 16.0 °C.

Genetic material and experimental design

Five three-lineal maize hybrids from INIFAP were planted in the two environments: H-50, H-47 AE, H-45 AE, H-53 AE, H-51 AE; also, five hybrids from UNAM; Tsiri Puma, Tlaoli Puma, Atziri Puma, Ixim Puma and Cuxi Puma. The treatments were formed with the evaluation of the two environments (factor A), 10 maize hybrids (factor B) and two levels of nitrogen (factor C) as edaphic fertilization with 80 kg ha⁻¹ of N (low N, NB) and 160 kg ha⁻¹ of N (high N, NA). In each environment, treatments were implemented in uniform experimental units (UE) with a randomized complete block design in a factorial arrangement with four replications. The UE consisted of a 5.0 m long by 0.8 m wide furrow, which

Puma. Los tratamientos se conformaron con la evaluación de los dos ambientes (factor A), 10 híbridos de maíz (factor B) y dos niveles de nitrógeno (factor C) como fertilización edáfica con 80 kg ha⁻¹ de N (N bajo, NB) y 160 kg ha⁻¹ de N (N alto, NA). En cada ambiente, los tratamientos se implementaron en unidades experimentales (UE) uniformes con un diseño en bloques completos al azar en un arreglo factorial con cuatro repeticiones. La UE consistió en un surco de 5.0 m de largo por 0.8 m de ancho, que es un tamaño adecuado definido en diversos trabajos (Escobar, 1981).

En sistema convencional y como tradicionalmente se realiza en cada sitio, la siembra se realizó a mano cuando el suelo estaba seco. En cada UE se distribuyeron uniformemente 50 semillas a lo largo de 5 m. Cada UE se ajustó para obtener una densidad de población de 65 000 plantas ha⁻¹. En la FESC-UNAM por falta de agua para riego, la humedad correspondió sólo a la disponible por precipitación (459 mm) durante todo el ciclo, mientras que en CEVAMEX fueron 603 mm de precipitación, además, como manejo convencional se aplicó riego para la germinación y dos de auxilio. Para la fertilización sólo se utilizó urea y en los dos ambientes se aplicó una tercera parte a la siembra y el resto 40 días después de la siembra (dds).

VARIABLES RESPUESTA

En ambos ambientes, la cosecha se realizó en diciembre de 2019. Las mazorcas se recolectaron de modo manual para obtener el peso de campo (PC). De cada UE, 160 en total, se seleccionaron cinco mazorcas con características comerciales y sanidad adecuada. Esta muestra se utilizó para calcular el rendimiento de grano (RG) en Mg ha⁻¹ con el procedimiento que utilizaron Alonso-Sánchez *et al.* (2020):

$$RG = PC \times MS \times G \times FC \times 1.14$$

donde: PC es el peso de campo de las mazorcas de la unidad experimental en Mg, MS es la materia seca en fracción decimal determinada por diferencia al medir el contenido de humedad de la muestra obtenido en el aparato DICKEY-Jhon modelo GAC 2100, G es la fracción de grano respecto al peso completo de mazorca, FC es el factor de conversión para inferir el rendimiento de la UE (5 m) a 12 500 m que corresponde a la longitud total de surcos por hectárea con la separación de 0.80 m,

is an adequate size defined in several works (Escobar, 1981).

In the conventional system and as traditionally done at each site, sowing was done by hand when the soil was dry. In each UE, 50 seeds were uniformly distributed over a 5 m length. Each UE was adjusted to obtain a population density of 65 000 plants ha⁻¹. At FESC-UNAM, due to lack of water for irrigation, moisture corresponded only to that available from precipitation (459 mm) during the entire cycle, while at CEVAMEX there was 603 mm of precipitation. In addition, as conventional management, irrigation was applied for germination and two auxiliary irrigations. For fertilization, only urea was used and in both environments one third was applied at sowing and the rest 40 days after sowing (dds).

Response variables

In both environments, harvesting was carried out in December 2019. Cobs were harvested manually to obtain field weight (PC). From each UE, 160 in total, five cobs with commercial characteristics and adequate health were selected. This sample was used to calculate grain yield (GR) in Mg ha⁻¹ with the procedure used by Alonso-Sánchez *et al.* (2020):

$$RG = PC \times MS \times G \times FC \times 1.14$$

where: PC is the field weight of the cobs of the experimental unit in Mg, SM is the dry matter in decimal fraction determined by difference by measuring the moisture content of the sample with a DICKEY-Jhon model GAC 2100 equipment, G is the fraction of grain with respect to the whole cob weight, FC is the conversion factor to infer the yield from the UE (5 m) to 12 500 m which corresponds to the total length of furrows per hectare with the spacing of 0.80 m, 1.14 is the factor to convert grain dry matter yield to yield at 14 % commercial moisture.

To identify the PTA, the volume of water per irrigation (AR) was quantified with irrigation flow rate and irrigation time. The total volume of precipitation water (AP) recorded during the crop cycle at the National Meteorological Service (SMN) stations FES-Cuautitlán (0015043) and Chapingo (0015170) was added; the AR input was only counted in the CEVAMEX environment, since this is where irrigation was applied. The PTA value was calculated with the following formula:

1.14 es el factor para convertir el rendimiento de materia seca de grano al rendimiento con 14 % de humedad comercial.

Para identificar la PTA, se cuantificó el volumen de agua por riego (AR) con el caudal y tiempo de riego. Se agregó el volumen total de agua de precipitación (AP) que se registró durante el ciclo del cultivo en las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) FES-Cuautitlán (0015043) y Chapingo (0015170); la entrada de AR solo se contabilizó en el ambiente CEVAMEX, por ser ahí donde se aplicó riego. El valor de la PTA se calculó con la fórmula siguiente.

$$PTA = \frac{RG}{AT}$$

donde PTA es la productividad total del agua en kg m^{-3} , RG es el rendimiento de grano en kg ha^{-1} y AT es el agua total que ingresó al campo de cultivo en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, que comprende las entradas por riego (AR) y precipitación (AP).

Análisis de varianza individual y combinado se realizaron para los ambientes en el programa SAS versión 9.0 (SAS Inc., 2002). La comparación de medias se realizó para cada variable con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El volumen de agua por lluvia acumuló $4598 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ en el ambiente de la FESC-UNAM y en CEVAMEX el volumen total acumulado sumó $9378 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, que correspondieron $6030 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ por lluvia y $3348 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ por riego. En el primer sitio no se dispuso de agua para riego y en el segundo se aplicó según el manejo convencional del riego en el sitio.

Productividad total del agua

En el análisis estadístico combinado de los datos, la productividad total del agua (PTA) mostró diferencias significativas en los factores ambientes (A), híbridos (B) y fertilización nitrogenada (C). El coeficiente de variación resultó de 19.7 % con una media general de 0.78 kg m^{-3} . En el caso de la FESC-UNAM, no se encontró efecto de los factores (B) y (C) ni de su interacción; el coeficiente de variación resultó de 19.88 % y la media general de 1.04 kg m^{-3} (Cuadro 1).

$$PTA = \frac{RG}{AT}$$

where PTA is total water productivity in kg m^{-3} , RG is grain yield in kg ha^{-1} and AT is total water entering the field in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, comprising irrigation (AR) and precipitation (AP) inputs.

Individual and combined analyses of variance were performed for the environments in SAS version 9.0 (SAS Inc., 2002). Comparison of means was performed for each variable with Tukey's test ($p \leq 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

The volume of water from rainfall accumulated $4598 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ in the FESC-UNAM environment and in CEVAMEX the total volume accumulated totalled $9378 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, which corresponded to $6030 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ from rainfall and $3348 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ from irrigation. In the first site, no water was available for irrigation and in the second, water was applied according to conventional irrigation management at the site.

Total water productivity

In the combined statistical analysis of the data, total water productivity (PTA) showed significant differences in the factors environments (A), hybrids (B) and nitrogen fertilization (C). The coefficient of variation was 19.7 % with an overall mean of 0.78 kg m^{-3} . In the case of FESC-UNAM, no effect of factors (B) and (C) or their interaction was found; the coefficient of variation was 19.88 % and the general mean was 1.04 kg m^{-3} (Table 1).

In CEVAMEX factors (B) and (C) resulted with significant effect without showing interaction between them, with a coefficient of variation of 12.3 % and the overall mean of 0.52 kg m^{-3} ; the above may be due to the effect of nitrogen fertilization on PTA, especially when irrigation is applied and when nitrogen doses do not exceed 300 kg ha^{-1} (Díaz *et al.*, 2008; Díaz *et al.*, 2014). The result of PTA in the environments coincided with what was reported by Alonso-Sánchez *et al.* (2020) as the location with lower water availability (rainfed) resulted with higher productivity, the opposite of the irrigated location. The above results show

Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia para productividad del agua, rendimiento y peso hectolítrico de diez híbridos de maíz en dos ambientes con dos dosis de nitrógeno. Ciclo Primavera-Otoño 2019. Valles Altos, México.

Table 1. Mean squares and significance for water productivity, yield and hectolitre weight of ten maize hybrids in two environments with two nitrogen doses. Valles Altos, Mexico. Spring-Fall 2019 cycle.

Fuente de variación	Productividad total del agua (kg m ⁻³)	Variables Rendimiento de grano (Mg ha ⁻¹)	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)
COMBINADO			
Ambiente (A)	11.34*	0.02	419.90*
Híbrido (B)	0.26*	12.72 *	140.66*
Nitrógeno (C)	0.35*	25.28*	67.34
A × B	0.03	2.94*	65.76
A × C	0.01	14.61*	40.20
B × C	0.02	0.53	23.05
A × B × C	0.03	0.75	34.26
CV (%)	19.70	16.48	8.38
Media	0.78	4.83	73.80
FESC-UNAM			
B	0.15	3.17*	41.28
C	0.03	0.72	1.74
B × C	0.04	0.85	19.4
CV (%)	19.88	19.88	6.37
Media	1.04	4.82	75.42
CEVAMEX			
B	0.14*	12.49*	165.14*
C	0.43*	39.17*	105.8
B × C	0.01	0.43	37.91
CV (%)	12.3	12.2	10.12
Media	0.52	4.84	72.18

* $p \leq 0.05$; CV: Coeficiente de variación (%). ♦ * $p \leq 0.05$; CV: Variation coefficient (%).

En CEVAMEX los factores (B) y (C) resultaron con efecto significativo sin mostrar interacción entre ellos, con un coeficiente de variación de 12.3 % y la media general de 0.52 kg m⁻³; lo anterior puede deberse al efecto de la fertilización nitrogenada sobre la PTA, sobre todo cuando se aplica riego y cuando las dosis de nitrógeno no superan los 300 kg ha⁻¹ (Díaz *et al.*, 2008; Díaz *et al.*, 2014). El resultado de la PTA en los ambientes coincidió con lo que reportaron Alonso-Sánchez *et al.* (2020), dado que la localidad con disponibilidad de humedad menor (secano) resultó con mayor productividad, lo contrario a la de riego. Los resultados anteriores muestran que el agua se utiliza con baja productividad cuando se aplica riego de manera convencional

that water is used with low productivity when irrigation is applied in a conventional manner and without the use of irrigation scheduling dates and irrigation sheets.

Grain yield

Grain yield was significant for factors (B) and (C), although there was a significant interaction (A × B) and (A × C). Thus, the effect of factor B and C is not attributed solely to the hybrid or nitrogen fertilization, but to the combination of their effects with the environment; the overall mean resulted lower (4.83 Mg ha⁻¹) than the 10.1 Mg ha⁻¹ identified by Alonso-Sánchez *et al.* (2020) for higher water availability in the same environments. This result

y sin el uso de la programación de las fechas y láminas de riego.

Rendimiento de grano

El rendimiento de grano resultó significativo para los factores (B) y (C), aunque hubo interacción significativa ($A \times B$) y ($A \times C$). Por ello, el efecto del factor B y C no se atribuye solamente al híbrido o a la fertilización nitrogenada, sino a la combinación de sus efectos con el ambiente; la media general resultó menor (4.83 Mg ha^{-1}) a los 10.1 Mg ha^{-1} que identificaron Alonso-Sánchez *et al.* (2020) para una disponibilidad mayor de agua en los mismos ambientes. Este resultado indica un incremento del rendimiento cuando se dispone de más agua, pero es necesario realizar otros estudios para demostrar que esa variación no es lineal.

En la FESC-UNAM sólo resultó con efecto significativo el factor (B); no se encontró interacción entre factores ($B \times C$) y la media general resultó de 4.82 Mg ha^{-1} . En CEVAMEX se encontró diferencia significativa en los factores (B) y (C), sin interacción entre ellos y la media general resultó de 4.84 Mg ha^{-1} . En el rendimiento de grano de los híbridos utilizados en este trabajo, se encontraron diferencias significativas que se atribuyen en particular a los genotipos, como lo afirmaron Tadeo-Robledo *et al.* (2018) y Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018).

Peso hectolítrico

El peso hectolítrico (PH) mostró diferencia significativa entre los ambientes e híbridos, pero no en el factor (C), como también lo observaron Cervantes-Ortiz *et al.* (2013) en híbridos de maíz bajo fertilización nitrogenada y Zamudio *et al.* (2018) en híbridos sembrados en Valles Altos. Sin embargo, en este último estudio sí hubo diferencias significativas cuando se probaron distintas fuentes de nitrógeno. Esta respuesta puede relacionarse con la oportunidad en la disponibilidad de agua (Navarro y Navarro, 2013) que en condiciones de temporal es aleatoria y limita el potencial del fertilizante. Las interacciones de los factores no fueron significativas para esta variable; su coeficiente de variación fue de 8.38 % y la media general de 73.8 kg hL^{-1} que es ideal para el proceso de industrialización del maíz como lo refieren Zamudio *et al.* (2018) y López-López *et al.* (2020).

indicates an increase in yield when more water is available, but further studies are needed to demonstrate that this variation is not linear.

At FESC-UNAM, only factor (B) had a significant effect; no interaction between factors ($B \times C$) was found and the overall mean was 4.82 Mg ha^{-1} . In CEVAMEX, significant differences were found in factors (B) and (C), with no interaction between them, and the overall mean was 4.84 Mg ha^{-1} . In the grain yield of the hybrids used in this study, significant differences were found that are attributed in particular to genotypes, as stated by Tadeo-Robledo *et al.* (2018) and Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018).

Hectolitre weight

The hectolitre weight (PH) showed significant difference among environments and hybrids, but not in the factor (C), as also observed by Cervantes-Ortiz *et al.* (2013) in maize hybrids under nitrogen fertilization and Zamudio *et al.* (2018) in hybrids planted in Valles Altos. However, in the latter study there were significant differences when different nitrogen sources were tested. This response may be related to the timing of water availability (Navarro and Navarro, 2013), which under rainfed conditions is random and limits the fertilizer potential. Factor interactions were not significant for this variable; its coefficient of variation was 8.38 % and the overall mean was 73.8 kg hL^{-1} which is ideal for the maize industrialization process as referred by Zamudio *et al.* (2018) and López-López *et al.* (2020).

At FESC-UNAM, no significant effect of the factors or interaction on PH was found; the coefficient of variation resulted in 6.37 % and the overall mean was 75.42 kg hL^{-1} . On the other hand, in CEVAMEX the effect of factor (B) on PH was significant. The dose of nitrogen fertilization had no effect on this variable. The interaction of the factors ($B \times C$) showed no effect, the coefficient of variation was 10.12 %, and the overall mean in this environment was 72.18 kg hL^{-1} . The effect of environments by moisture availability, which defines N utilization, and evapotranspiration, inserts variability in PH due to different edaphic and climatic conditions, according to Tadeo-

En la FESC-UNAM no se encontró efecto significativo de los factores ni de la interacción sobre el PH; el coeficiente de variación resultó de 6.37 % y la media general de 75.42 kg hL⁻¹. En cambio, en CEVAMEX el efecto del factor (B) sobre el PH resultó significativo. La dosis de fertilización nitrogenada no generó efecto en esta variable. La interacción de los factores (B × C) no mostró efecto, el coeficiente de variación fue de 10.12 %, y la media general en este ambiente resultó de 72.18 kg hL⁻¹. El efecto de los ambientes por la disponibilidad de humedad, que define el aprovechamiento del N, y la evapotranspiración, inserta la variabilidad en el PH por las condiciones edáficas y climáticas diferentes, de acuerdo con Tadeo-Robledo *et al.* (2018) y Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018). Además, en CEVAMEX es posible que también influya el manejo de riego relacionado con la condición de humedad antecedente.

Comparación de medias

La PTA fue menor en CEVAMEX, donde ingresó más agua (9378 m³ ha⁻¹), esta disponibilidad de humedad se tradujo en un incremento del 4.1 % en el RG, mientras que la productividad fue mayor en la FESC-UNAM en 103.92 %; la diferencia en la cantidad de agua correspondió al 103.96 % superior en CEVAMEX con respecto a la FESC-UNAM, que representó 4780 m³ ha⁻¹. No obstante, la entrada de agua por lluvia fue superior en CEVAMEX y sin aplicar el riego se ahorrarían 3348 m³ ha⁻¹. La aplicación de riego en CEVAMEX se realizó por manejo convencional del riego en el sitio cuando las plantas mostraron estrés hídrico ya que la precipitación fue aleatoria. Aunque no se observa diferencia significativa con respecto a la FESC-UNAM, es posible que disminuya el rendimiento al no aplicarse el riego. En este trabajo se observó una posibilidad en el ahorro de agua al incrementar la PTA y mantener el rendimiento; incluso es posible conservar la productividad prescindiendo del riego en los ambientes evaluados como también lo reportaron Alonso-Sánchez *et al.* (2020). Es necesario realizar otros estudios para identificar el punto de PTA máxima para conservar el rendimiento sin diferencia significativa, ya que como reportaron Noriega-Navarrete *et al.* (2021), la estabilidad

Robledo *et al.* (2018) and Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018). In addition, in CEVAMEX it is possible that irrigation management related to antecedent moisture condition may also influence.

Comparison of means

PTA was lower in CEVAMEX, where more water entered (9378 m³ ha⁻¹), this water availability resulted in an increase of 4.1 % in the RG, while productivity was higher in FESC-UNAM by 103.92 %; the difference in the amount of water corresponded to 103.96 % higher in CEVAMEX compared to FESC-UNAM, which represented 4780 m³ ha⁻¹. However, the water input from rainfall was higher in CEVAMEX and without applying irrigation 3348 m³ ha⁻¹ would be saved. The application of irrigation in CEVAMEX was done by conventional irrigation management at the site when the plants showed water stress since rainfall was random. Although no significant difference was observed in regard to FESC-UNAM, it is possible that yield decreased when irrigation was not applied. In this study, a possibility of saving water by increasing PTA and maintaining yield was observed. It is even possible to conserve productivity by dispensing irrigation in the evaluated environments as also reported by Alonso-Sánchez *et al.* (2020). Further studies are needed to identify the point of maximum PTA to conserve yield without significant difference. Since, as reported by Noriega-Navarrete *et al.* (2021), maize yield stability in the future is possible in scenarios where the amount of applied water and nutrition are controlled.

The PH showed significant difference and it was observed that, under conditions of lower water availability, the weight was higher 4.48 % in FESC-UNAM compared to CEVAMEX, generating heavier grains. These results coincide with what was reported by Zamudio *et al.* (2018) for Valles Altos hybrids, since when moisture availability is limited, the cycle is reduced, the grain dehydrates faster and presents higher density.

The response of maize hybrids to low moisture availability has also been observed in other studies such as Zamora-Salgado *et al.* (2011) as hybrids that received less water showed better productivity when 85 % of evapotranspiration

del rendimiento de maíz en el futuro es posible en escenarios donde se controle la cantidad de agua aplicada y la nutrición.

El PH mostró diferencia significativa y se observó que, en condiciones de menor disponibilidad de humedad, el peso fue mayor 4.48 % en la FESC-UNAM con respecto a CEVAMEX, generando granos más pesados. Estos resultados coinciden con lo reportado por Zamudio *et al.* (2018) para híbridos de Valles altos, pues cuando la disponibilidad de humedad es limitada, el ciclo se reduce, el grano se deshidrata más rápido y presenta mayor densidad. La respuesta de los híbridos de maíz a la baja disponibilidad de humedad también se ha observado en otros estudios como el de Zamora-Salgado *et al.* (2011) ya que los híbridos que recibieron menor cantidad de agua mostraron mejor productividad cuando se aportó el 85 % de la evapotranspiración. También Sáenz *et al.* (2014) encontraron mejor productividad en los híbridos de maíz cuando se aportó el 50 % de la evapotranspiración. En los híbridos existió una relación directa con el RG, aunque los valores de PTA y RG son menores a los que reportaron Alonso-Sánchez *et al.* (2020) para los mismos materiales con disponibilidad de humedad mayor en los mismos ambientes, en el presente estudio oscilaron entre 0.63 y 1.03 kg m⁻³ y de 4.03 a 6.7 Mg ha⁻¹ respectivamente. Estos resultados ponen en evidencia que a mayor rendimiento de grano y menor cantidad de agua se incrementó la productividad total del agua (Cuadro 2). El PH en los híbridos varió de 68.55 a 77.44 kg hL⁻¹ relacionado con su particularidad genética; estos valores coinciden con los que reportaron Zamudio *et al.* (2018) para híbridos establecidos en las cercanías de Toluca, Estado de México.

Los híbridos de la FESC-UNAM con valores promedio de PTA de 0.82 kg m⁻³, RG de 5.18 Mg ha⁻¹ y PH de 74.72 kg hL⁻¹, resultaron superiores a los de CEVAMEX con PTA de 0.73 kg m⁻³, RG de 4.49 Mg ha⁻¹, y PH de 72.9 kg hL⁻¹. Destacaron los híbridos Cuxi Puma y Atziri Puma que también sobresalieron en los trabajos de Alonso-Sánchez *et al.* (2020) y Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018) en ambientes similares. En cambio, Ixim Puma y H-47 AE mostraron valores inferiores de PTA, RG y PH. Estas respuestas se relacionan con los genotipos de acuerdo con

was provided. Sáenz *et al.* (2014) also found better productivity in maize hybrids when 50 % of evapotranspiration was supplied. In the hybrids there was a direct relationship with RG, although the values of PTA and RG were lower than those reported by Alonso-Sánchez *et al.* (2020) for the same materials with higher water availability in the same environments. In this study they ranged from 0.63 to 1.03 kg m⁻³ and from 4.03 to 6.7 Mg ha⁻¹ respectively. These results show that the higher the grain yield and lower the amount of water, the higher the total water productivity (Table 2). The PH in the hybrids ranged from 68.55 to 77.44 kg hL⁻¹ related to their genetic singularity; these values coincide with those reported by Zamudio *et al.* (2018) for hybrids established in the vicinity of Toluca, State of Mexico.

FESC-UNAM hybrids with average PTA values of 0.82 kg m⁻³, RG of 5.18 Mg ha⁻¹ and PH of 74.72 kg hL⁻¹, were superior to those of CEVAMEX with PTA of 0.73 kg m⁻³, RG of 4.49 Mg ha⁻¹, and PH of 72.9 kg hL⁻¹. Of note were the hybrids Cuxi Puma and Atziri Puma, which also excelled in those researches of Alonso-Sánchez *et al.* (2020) and Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018) in similar environments. In contrast, Puma and H-47 AE showed lower values of PTA, RG and PH. These responses are related to genotypes according to López-López *et al.* (2017) and Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018), although it is also possible that they are related to the responses of old and modern hybrids. In fact, it has been proven that modern hybrids show better yields under marginal conditions (Kibet *et al.*, 2009).

The dose of nitrogen fertilization benefited PTA significantly, which coincided with what Diaz *et al.* (2008) reported for maize hybrids under irrigated conditions. This response is related to the effect of water regime on nitrogen availability for crops (Navarro and Navarro, 2013). In the case of RG, the difference in means is not directly attributed to this factor since interaction between factors (A) and (C) was found; that is, water availability and nitrogen dose inserted joint variability. In addition, edaphic effects, such as soil water storage characteristics and climatic factors, such as the variation of climate elements that define evapotranspiration at each site, insert effect on the

Cuadro 2. Comparación de medias de los factores ambiente, híbrido y dosis de nitrógeno. Ciclo Primavera-Otoño 2019 en Valles Altos, México.

Table 2. Comparison of means of the factors environment, hybrid and nitrogen dose in Valles Altos, Mexico. Spring-Fall 2019 cycle.

Niveles de los factores	Variable		
	Productividad total del agua (kg m ⁻³)	Rendimiento de grano (Mg ha ⁻¹)	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)
AMBIENTE			
FESC-UNAM	1.04 a	4.82 a	75.42 a
CEVAMEX	0.51 b	4.84 a	72.18 b
DSH	0.05	0.24	1.936
HÍBRIDO			
H-47 AE	0.69 cd	4.11 de	68.55 b
H-45 AE	0.74 cd	4.51 ce	76.29 a
H-53 AE	0.86 ac	5.38 bc	76.39 a
H-51 AE	0.68 d	4.25 de	71.98 ab
H-50	0.70 cd	4.18 de	71.20 ab
Tsíri Puma	0.79 bd	4.95 cd	75.27 ab
Tlaoli Puma	0.71 cd	4.33 de	71.56 ab
Atziri Puma	0.94 ab	5.87 ab	77.44 a
Ixim Puma	0.63 d	4.03 e	72.85 ab
Cuxi Puma	1.03 a	6.7 a	76.48 a
DSH	0.18	0.9	7.05
DOSIS DE NITRÓGENO			
80 kg ha ⁻¹	0.73 b	4.43 b	73.15 a
160 kg ha ⁻¹	0.82 a	5.23 a	74.45 a
DSH	0.04	0.24	1.93

Medias con letra distinta en las columnas dentro de cada factor de variación indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$); DSH: diferencia significativa honesta. ♦ Means with different letters in the columns within each variation factor indicate statistical difference (Tukey; $p \leq 0.05$); DSH: honest significant difference.

López-López *et al.* (2017) y Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018), aunque también es posible que se relacionen con las respuestas de los híbridos antiguos y modernos. De hecho se ha probado que los híbridos modernos muestran rendimientos mejores en condiciones marginales (Kibet *et al.*, 2009).

La dosis de fertilización nitrogenada benefició la PTA de modo significativo, lo cual coincidió con lo que reportaron Díaz *et al.* (2008) para híbridos de maíz en condiciones de riego. Esta respuesta se relaciona con el efecto del régimen de humedad en la disponibilidad del nitrógeno para los cultivos (Navarro y Navarro, 2013). En el caso del RG, la diferencia de medias no se atribuye directamente a este factor ya que se encontró interacción entre los factores (A) y (C); es decir, la disponibilidad de humedad y la dosis de nitrógeno insertaron

response, as it was also reported by Díaz-Valdés *et al.* (2014) for an experiment in an arid zone on the effect of nitrogen fertilization on maize hybrids. In this study, no significant effect of nitrogen dose on PH was found, which coincides with the results of Zamudio *et al.* (2018) when they applied urea to hybrid materials from Valles Altos.

Comparison of means between environments

In the FESC-UNAM environment, the hybrids showed three groups of means in PTA and RG, with respective values from 0.82 to 1.26 kg m⁻³ and 3.77 to 5.82 Mg ha⁻¹. The hybrids Cuxi Puma, Atziri Puma and H-53 AE showed significant higher values as in Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018); Zamudio *et al.* (2018) and Alonso-Sánchez *et al.* (2020) for RG of the same hybrids in Valles Altos

variabilidad conjunta. Además, los efectos edáficos, como las características de almacenamiento de humedad del suelo y los factores climáticos, como la variación de los elementos del clima que definen la evapotranspiración de cada sitio, insertan efecto en la respuesta, como también lo reportaron Díaz-Valdés *et al.* (2014) para un experimento en una zona árida sobre el efecto de la fertilización nitrogenada en híbridos de maíz. En este experimento no se encontró efecto significativo de la dosis de nitrógeno sobre el PH que coincide con los resultados de Zamudio *et al.* (2018) cuando aplicaron urea a materiales híbridos de Valles Altos.

Comparación de medias entre ambiente

En el ambiente de la FESC-UNAM los híbridos mostraron tres grupos de medias en PTA y RG, con valores respectivos de 0.82 a 1.26 kg m⁻³ y 3.77 a 5.82 Mg ha⁻¹. Los híbridos Cuxi Puma, Atziri Puma y H-53 AE mostraron valores mayores significativos como en los trabajos de Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018); Zamudio *et al.* (2018) y Alonso-Sánchez *et al.* (2020) para RG de los mismos híbridos en ambientes de los Valles Altos. Por el contrario, el híbrido Ixim Puma presentó los valores inferiores (Cuadro 3). No se encontró diferencia significativa en el PH entre híbridos ni se observó efecto de la fertilización nitrogenada lo que se relaciona con la cantidad baja de agua que ingreso en este sitio y que reduce el aprovechamiento del N.

En CEVAMEX los resultados de PTA y RG de los híbridos estuvieron en intervalos de 0.38 a 0.81 kg m⁻³ y de 3.59 a 7.58 Mg ha⁻¹. Se encontraron diferencias significativas entre ellos, donde también sobresalieron los híbridos Cuxi Puma, Atziri Puma y H-53 AE; el H-47 AE presentó los valores inferiores en este ambiente. El PH de los híbridos no mostró diferencia significativa lo que muestra que en condiciones homogéneas de humedad esta variable se estabiliza en los híbridos empleados. La fertilización nitrogenada generó efecto significativo en la PTA y RG que puede estar relacionado con la cantidad mayor y oportunidad del agua aportada, como lo refieren Navarro y Navarro (2013) que permite un contenido de humedad en el suelo adecuado para la absorción del nitrógeno.

environments. In contrast, the hybrid Ixim Puma showed the lowest values (Table 3). No significant difference was found in PH between hybrids, nor was any effect of nitrogen fertilization observed, which is related to the low amount of water that entered the site and reduced N utilization.

In CEVAMEX, the results of PTA and RG of the hybrids ranged from 0.38 to 0.81 kg m⁻³ and from 3.59 to 7.58 Mg ha⁻¹. Significant differences were found among them, where the hybrids Cuxi Puma, Atziri Puma and H-53 AE also stood out; H-47 AE presented the lowest values in this environment. The PH of the hybrids did not reach significant differences, which shows that under homogeneous water conditions this variable is stabilized in the hybrids used. Nitrogen fertilization had a significant effect on PTA and RG, which may be related to the greater quantity and timeliness of the water provided, as reported by Navarro and Navarro (2013), which allows an adequate soil moisture content for nitrogen absorption.

PTA and RG only formed three groups of means in FESC-UNAM while in CEVAMEX four groups were defined. These contrasts were probably due to the differentiated response of N according to the water conditions at each site since this factor only showed significant difference in the means of the variables PT and RG in CEVAMEX where a greater total volume of water entered.

Comparison of means between nitrogen levels and nitrate levels

The effect of low (80 kg ha⁻¹) and high (160 kg ha⁻¹) N levels per environment resulted in such a way that at FESC-UNAM no significant difference was found in the means of the observed variables of the hybrids, which shows the impact of the water deficit on the soil moisture levels that limit N utilization, since the precipitation observed during the cycle totalled 4598 m³ ha⁻¹; while in CEVAMEX the variables PTA, RG and PH showed significant differences due to fertilization (Table 4), with intervals in low nitrogen levels (0.31 to 0.73 kg m⁻³; 2.87 to 6.82 Mg ha⁻¹; 64.4 to 77.37 kg hL⁻¹) and high (0.46 to 0.89 kg m⁻³; 4.32 to 8.35 Mg ha⁻¹; 66.35 to 77.72 kg hL⁻¹). This behaviour, when there is

Cuadro 3. Comparación de medias de las variables por el efecto de los factores híbrido y dosis de nitrógeno en los ambientes FESC-UNAM y CEVAMEX. Ciclo Primavera-Otoño 2019. Valles Altos, México.

Table 3. Comparison of means of the variables for the effect of the hybrid and nitrogen dose factors in the FESC-UNAM and CEVAMEX environments. Valles Altos, Mexico. Spring-Fall 2019 cycle.

Niveles de los factores	Variable		
	Productividad total del agua (kg m ⁻³)	Rendimiento de grano (Mg ha ⁻¹)	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)
HÍBRIDOS FESC-UNAM			
H-47 AE	1.00 ac	4.63 ac	71.25 a
H-45 AE	1.05 ac	4.83 ac	76.18 a
H-53 AE	1.14 ac	5.27 ac	77.17 a
H-51 AE	0.9 bc	4.14 bc	73.71 a
H-50	1.01 ac	4.68 ac	75.32 a
Tsíri Puma	1.03 ac	4.75 ac	76.46 a
Tlaoli Puma	1.00 ac	4.63 ac	77.28 a
Atziri Puma	1.23 ab	5.66 ab	77.33 a
Ixim Puma	0.82 c	3.77 c	72.17 a
Cuxi Puma	1.26 a	5.82 a	77.33 a
DSH	0.34	1.57	7.89
DOSIS DE NITRÓGENO FESC-UNAM			
80 kg ha ⁻¹	1.02 a	4.72 a	75.27 a
160 kg ha ⁻¹	1.06 a	4.91 a	75.57 a
DSH	0.09	0.42	2.15
HÍBRIDOS CEVAMEX			
H-47 AE	0.38 d	3.59 d	65.85 a
H-45 AE	0.44 cd	4.19 cd	76.4 a
H-53 AE	0.58 b	5.49 b	76.61 a
H-51 AE	0.46 cd	4.36 cd	70.25 a
H-50	0.39 d	3.68 d	67.07 a
Tsíri Puma	0.55 bc	5.14 cb	74.08 a
Tlaoli Puma	0.43 d	4.03 d	65.85 a
Atziri Puma	0.64 b	6.07 b	77.55 a
Ixim Puma	0.45 cd	4.28 cd	73.53 a
Cuxi Puma	0.81 a	7.58 a	75.63 a
DSH	0.1	0.97	12.00
DOSIS DE NITRÓGENO CEVAMEX			
80 kg ha ⁻¹	0.59 a	4.14 b	71.03 a
160 kg ha ⁻¹	0.44 b	5.54 a	73.33 a
DSH	0.028	0.26	3.26

Medias con la misma letra en las columnas dentro de cada factor de variación son iguales estadísticamente (Tukey; $p \leq 0.05$). DSH: diferencia significativa honesta. ♦ Means with different letters in the columns within each variation factor indicate statistical difference (Tukey; $p \leq 0.05$); DSH: honest significant difference.

La PTA y el RG solo formaron tres grupos de medias en FESC-UNAM en tanto que en CEVAMEX se definieron cuatro grupos. Estos contrastes probablemente se debieron a la respuesta diferenciada del N según las condiciones de humedad en cada sitio ya que este factor solo mostró diferencia

higher water availability, has also been reported by Tadeo-Robledo *et al.* (2018) and Zamudio *et al.* (2018) for maize hybrids planted in Valles Altos. Hybrid means showed significant differences in CEVAMEX; Cuxi Puma and Atziri Puma stood out in PTA and RG, which is associated with maximum

significativa en las medias de las variables PT y RG en CEVAMEX donde ingresó mayor volumen total de agua.

Comparación de medias entre los niveles de nitrógeno

El efecto de los niveles de N bajo (80 kg ha⁻¹) y alto (160 kg ha⁻¹) por ambiente resultó de tal forma que en la FESC-UNAM no se encontró ninguna diferencia significativa en las medias de las variables observadas de los híbridos lo que pone de manifiesto el impacto del déficit de agua en los niveles de humedad del suelo que limitan el aprovechamiento del N, ya que la precipitación observada durante el ciclo sumó 4,598 m³ ha⁻¹; mientras que en CEVAMEX las variables PTA, RG y PH mostraron diferencias significativas por la fertilización (Cuadro 4), con intervalos en los niveles de nitrógeno bajo (0.31 a 0.73 kg m⁻³; 2.87 a 6.82 Mg ha⁻¹; 64.4 a 77.37 kg hL⁻¹) y alto (0.46 a 0.89 kg m⁻³; 4.32 a 8.35 Mg ha⁻¹; 66.35 a 77.72 kg hL⁻¹). Este comportamiento, cuando hay disponibilidad mayor de humedad, también lo reportan Tadeo-Robledo *et al.* (2018) y Zamudio *et al.* (2018) para híbridos de maíz sembrados en Valles Altos.

Las medias de los híbridos mostraron diferencias significativas en CEVAMEX; Cuxi Puma y Atziri Puma destacaron en PTA y RG, lo que se asocia con los valores máximos de PH. El nivel bajo generó seis grupos de medias y el alto cuatro grupos. Esta diferencia puede estar relacionada con el mayor efecto que tienen las aportaciones de nitrógeno bajas con respecto a las elevadas como lo refieren teóricamente Navarro y Navarro (2013). La razón es probable que se deba a la respuesta diferenciada de los genotipos en cuanto a su capacidad para absorber el N a diferentes niveles de humedad del suelo que propicia el manejo de riego, la ocurrencia de precipitación y la variación de los elementos del clima que determinan la evapotranspiración. Los resultados de este trabajo contribuyen a ofrecer soluciones a la problemática actual sobre la producción de maíz que plantean Zamudio *et al.* (2018) y Tadeo-Robledo *et al.* (2018) en un escenario de escasez mayor de agua a futuro como lo plantean Noriega *et al.* (2021); también se generan interrogantes para conducir nuevas investigaciones

PH values. The low level generated six groups of means and the high level generated four groups. This difference may be related to the greater effect of low nitrogen inputs with respect to high ones as theoretically referred by Navarro and Navarro (2013). The reason is likely due to the differentiated response of genotypes in terms of their ability to absorb N at different soil moisture levels conducive to irrigation management, occurrence of precipitation and variation of climate elements that determine evapotranspiration.

The results of this study contribute to offer solutions to the current problems on maize production raised by Zamudio *et al.* (2018) and Tadeo-Robledo *et al.* (2018) in a scenario of greater water scarcity in the future as proposed by (Noriega-Navarrete *et al.*, 2021); questions are also generated to conduct new research in the field of water and food security for both Mexico and the world. The threshold of maximum reduction of water provided through deficit conditions without yield reduction should be investigated.

CONCLUSIONS

The total water productivity of the hybrids was higher in the FESC-UNAM environment where irrigation was not provided, and no significant reductions in grain yield were observed.

The effect of nitrogen dose was related to water availability. The high nitrogen dose generated higher productivity and grain yield and was directly related to water quantity; at FESC-UNAM, with lower water quantity, no effect was found.

The hybrids Cuxi Puma and Atziri Puma surpassed in total water productivity, grain yield and hectolitre weight. Therefore, they are an alternative for producers in Valles Altos, Mexico under conditions of low water availability.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the Autonomous National University of Mexico (UNAM), for supporting this research as part of the Support Program to Technological Research and Innovation Projects (PAPIIT: IA208519). To Dr. Gustavo Mercado Mancera, from the Cuautitlán Higher Studies Faculty, for providing useful climate information data collected at the Weather Station at Cuautitlán Higher Studies Faculty.

Cuadro 4. Comparación de medias de las variables observadas de los niveles bajo y alto de nitrógeno de CEVAMEX. Ciclo Primavera-Otoño 2019. Valles Altos, México.
Table 4. Comparison of means of observed variables of low and high nitrogen levels of CEVAMEX. Valles Altos, Mexico. Spring-Fall 2019 cycle.

Híbrido	Variables		
	Productividad total del agua (kg m ³)	Rendimiento de grano (Mg ha ⁻¹)	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)
CEVAMEX NITRÓGENO BAJO			
H-47 AE	0.31 f	2.87 f	65.35 bc
H-45 AE	0.39 df	3.62 df	76.72 a
H-53 AE	0.53 bc	4.99 bc	75.00 a
H-51 AE	0.42 ce	3.96 ce	71.10 ab
H-50	0.31 ef	2.91 ef	64.40 c
Tsíri Puma	0.45 cd	4.25 cd	72.92 a
Tlaoli Puma	0.39 df	3.60 df	74.10 a
Atziri Puma	0.57 b	5.34 b	77.37 a
Ixim Puma	0.33 ef	3.12 ef	73.17 a
Cuxi Puma	0.73 a	6.82 a	75.20 a
DSH	0.11	1.09	6.579
CEVAMEX NITRÓGENO ALTO			
H-47 AE	0.46 d	4.32 d	66.35 c
H-45 AE	0.51 cd	4.76 cd	76.07 a
H-53 AE	0.64 bd	6.00 bd	76.22 a
H-51 AE	0.51 cd	4.76 cd	69.40 bc
H-50	0.48 cd	4.47 cd	69.75 bc
Tsíri Puma	0.65 bc	6.05 bc	75.25 ab
Tlaoli Puma	0.48 cd	4.48 cd	72.60 ab
Atziri Puma	0.73 ab	6.81 ab	77.72 a
Ixim Puma	0.58 bd	5.46 bd	73.90 ab
Cuxi Puma	0.89 a	8.35 a	76.07 a
DSH (0.05)	0.18	1.69	6.012

Medias con la misma letra en las columnas dentro de cada factor de variación son iguales estadísticamente (Tukey; $p \leq 0.05$). DSH: diferencia significativa honesta.
 ♦ Means with different letters in the columns within each variation factor indicate statistical difference (Tukey; $p \leq 0.05$); DSH: honest significant difference.

en el campo de la seguridad hídrica y alimentaria tanto para México como para el mundo. Se debe investigar el umbral de reducción máxima de agua aportada a través de condiciones deficitarias sin reducción de rendimiento.

CONCLUSIONES

La productividad total del agua de los híbridos resultó superior en el ambiente de la FESC-UNAM donde no se suministró riego, y no se observaron reducciones significativas del rendimiento de grano.

El efecto de la dosis de nitrógeno se relaciona con la disponibilidad de agua. La dosis alta de nitrógeno generó productividad y rendimiento de grano

mayores, y se relacionó directamente con la cantidad de agua; en la FESC-UNAM, con cantidad de agua menor, no se encontró efecto.

Los híbridos Cuxi Puma y Atziri Puma destacaron en la productividad total del agua, rendimiento de grano y peso hectolítrico; son una alternativa para los productores de los Valles Altos de México en condiciones de baja disponibilidad de agua.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por el apoyo a esta investigación como parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT: IA208519. Al Dr. Gustavo Mercado Mancera, de la Facultad de Estudios Superiores

Cuautitlán, por proporcionar datos útiles de información climática captados en la estación meteorológica de la Facultad.

REFERENCIAS

- Alonso-Sánchez H, Tadeo-Robledo M, Espinosa-Calderón A, Zaragoza-Esparza J, López-López C. 2020. Productividad del agua y rendimiento de maíz bajo diferente disponibilidad de humedad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11: 1005-1016. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i5.2118>
- Cervantes-Ortiz F, Covarrubias-Prieto J, Rangel-Lucio JA, Terrón-Ibarra AD, Mendoza-Elos M, Preciado-Ortiz RE. 2013. Densidad de población y fertilización nitrogenada en la producción de semilla híbrida de maíz. *Agronomía Mesoamericana* 24: 101-110.
- Díaz-Valdés T, Partidas-Rubalcaba L, Suárez-Fernández YE, Lizárraga-Jiménez R, López-López A. 2014. Uso eficiente del agua y producción óptima en maíz, con el uso de cuatro dosis de nitrógeno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 23: 32-36.
- Díaz VT, Pérez D NW, López G A, Partidas R L, Suárez YE. 2008. Manejo sostenible del agua en zonas semiáridas: evaluación de dos técnicas de riego y fertilización nitrogenada en Sinaloa, México. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 17: 53-56.
- Escobar C. 1981. Estimación del tamaño óptimo de parcela experimental para ensayos de rendimiento con maíz. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 34 (1): 31-36.
- Kibet-Serrem C, López-Castañeda C, Kohashi-Shibata J. 2009. Efecto del nivel de humedad y nitrógeno en el suelo en el comportamiento de maíces híbridos y criollos de los valles altos de México. *Agronomía Costarricense* 33: 103-120.
- López-López C, Tadeo-Robledo M, Espinosa-Calderón A, García-Zavala J, Benítez-Riquelme I, Vázquez-Carrillo M, Carrillo-Salazar J. 2017. Productividad de cruza simples de maíz con calidad de proteína en Valles Altos de México, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8: 559-570. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.31>
- López-López C, Espinosa-Calderón A, Tadeo-Robledo M, Vázquez-Carrillo MG, García-Zavala JJ. 2020. Rendimiento y calidad intrínseca de cruza de maíz de calidad proteínica en ambientes de Valles Altos de México. *Agrociencia* 54: 1079-1090.
- Martínez-Gutiérrez A, Zamudio-González B, Tadeo-Robledo M, Espinosa-Calderón A, Cardoso-Galva J, Vázquez-Carrillo G, Turrent-Fernández A. 2018. Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9: 1447-1458. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1357>
- Navarro BS, Navarro GG. 2013. *Química Agrícola* (Tercera edición). Mundi-Prensa: Madrid, España. 479 p.
- Noriega-Navarrete JL, Salazar-Moreno R, López-Cruz IL. 2021. Revisión: modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12: 127-140. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2552>
- Sáenz CA, Gómez H V, Frigerio K L, Morábito J A, Terenti O A, Cortes M P. 2014. Rendimiento de grano y eficiencia en el uso del agua en maíz bajo riego complementario con agua salina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 40: 252-259.
- SAS Institute Inc. 2002. *Statistical Analysis System User's Guide*. SAS Institute, Inc. Cary, NC, USA. 956 p.
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres D E. 2012. *Respuesta del Rendimiento de los Cultivos al Agua Vol.66. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Roma, Italia.* 510 p.
- Tadeo-Robledo M, Espinosa-Calderón A, Arteaga-Escamilla I, Trejo-Pastor V, Sierra-Macias M, Valdivia-Bernal R, Zamudio-González B. 2018. Productividad de variedades precoces de maíz de grano amarillo para Valles Altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7:1417-1423. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i7.1347>
- Zamora-Salgado S, Ruíz-Espinosa I, Beltrán-Morales F, Fenech-Larios L, Murillo-Amador B, Loya-Ramírez J, Troyo-Diéguez E. 2011. Régimen hídrico del maíz en una zona árida, determinado en porcentajes de evaporación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13: 181-186.
- Zamudio GB, Félix R A, Martínez G A, Cardoso G JC, Espinosa CA, Tadeo RM. 2018. Producción de híbridos de maíz con urea estabilizada y nutrición foliar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9: 1231-1244. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.407>

UTILIZACIÓN DEL ISÓTOPO RADIOACTIVO CESIO-137 PARA EVALUAR LA TASA DE EROSIÓN EN UNA LADERA DEGRADADA EN MÉXICO

USE OF THE RADIOACTIVE ISOTOPE CESIUM-137 TO EVALUATE THE EROSION RATE ON A DEGRADED SLOPE IN MEXICO

Samuel Tejeda^{1*}, Eva Margarita Melgar-Paniagua¹, Marcos Tassano², Graciela Zarazúa¹, Mirel Cabrera², Joan Manuel González², Nancy Lara-Almazán¹

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, Estado de México, México. C. P. 52750.

² Universidad de la República. Facultad de Ciencias. Centro de Investigaciones Nucleares. Mataojo 2055, Montevideo, Uruguay. C. P. 11400.

* Autor para correspondencia: samuel.tejeda@inin.gob.mx

RESUMEN

En el ejido La Gavia, del municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México, los suelos dedicados al cultivo del maíz y pastoreo de ganado presentan niveles de erosión elevados. Debido a ello, es conveniente estimar la tasa de erosión de los suelos de los cultivos de la subcuenca con el uso de trazadores. La hipótesis del estudio fue que la tasa de erosión anual ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en la ladera degradada del ejido La Gavia puede superar los límites máximos permitidos de erosión para este tipo de suelos agrícolas. El objetivo de estudio es cuantificar la tasa de erosión anual en una parcela de cultivo de maíz y una ladera degradada del ejido en comento e identificar las áreas de depósito del isótopo radioactivo Cesio-137 (^{137}Cs). El muestreo de suelos de la ladera degradada se realizó en cuatro transectos con diez muestras en cada uno, con lo cual se obtuvieron 40 muestras de suelo en total. Cinco sitios de referencia se incluyeron de los cuales se midió el ^{137}Cs del perfil de 50 cm de profundidad. En el sitio de referencia el valor máximo encontrado fue de 6.8 Bq kg^{-1} a una profundidad de 10 cm, con 96 % de los contenidos de ^{137}Cs observado en los primeros 20 cm del perfil del suelo. El inventario de ^{137}Cs en la ladera de estudio se encontró entre 10.2 y 535.1 Bq m^{-2} , que fue menor al encontrado en el sitio de referencia seleccionado de 584.3 Bq m^{-2} . Se usó el modelo de balance de masa 2 obteniéndose una tasa de pérdida de suelo con valores

ABSTRACT

In the Ejido La Gavia, in the municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico, the soils dedicated to maize cultivation and cattle grazing show high levels of erosion. Therefore, it is convenient to estimate the soil erosion rate of crops in the sub-basin with the use of tracers. The hypothesis of this study was that the annual erosion rate ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) on the degraded slope of the Ejido La Gavia can exceed the maximum permitted limits of erosion for this type of agricultural soils. The objective of this study was to quantify the annual erosion rate in a maize plot and a degraded slope of the Ejido, and to identify the deposit areas of the radioactive isotope Cesium-137 (^{137}Cs). The soil sampling of the degraded slope was made in four transects with ten samples in each one, obtaining a total of 40 soil samples. Five reference sites were included, out of which the ^{137}Cs profile was measured at 50 cm depth. At the reference site, the maximum value found was 6.8 Bq kg^{-1} at a depth of 10 cm, with 96 % of the ^{137}Cs content observed in the first 20 cm of the soil profile. The inventory of ^{137}Cs on the study slope was between 10.2 and 535.1 Bq m^{-2} , which was lower than that found in the selected reference site of 584.3 Bq m^{-2} . The mass balance model 2 was used, obtaining a soil loss rate with values of - 23.5, - 27.5, - 20.9, and - 22.0 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$. Soil erosion rates in the study four site transects far exceeded the permissible limit of $6.7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$.

Recibido: junio, 2021. Aprobado: enero, 2022.
Publicado en *Agrociencia* 56: 16-30, 2022.

Keywords: erosion, soil degradation, radioactive isotopes, ^{137}Cs , deposition.

de -23.5, -27.5, -20.9 y -22.0 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Las tasas de erosión del suelo en los cuatro transectos de sitio de estudio superan ampliamente el límite permisible de 6.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Palabras clave: Erosión, degradación del suelo, isótopos radioactivos, ¹³⁷Cs, deposición.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el impacto antropogénico provocó cambios importantes en los usos del suelo. El riesgo asociado a los ciclos de abandono de la tierra y retornos al cultivo también implica ciertas amenazas a la sostenibilidad del suelo.

El sitio de estudio se encuentra dentro del ejido La Gavia en el municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México. Este ejido forma parte de la provincia fisiográfica del "Eje Neovolcánico Transversal" en México, la cual se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todas las composiciones y formaciones con variedad de elevaciones entre las que destacan, por su altura, el Cerro La Guadalupana (3367 msnm) al norte y el Cerro San Antonio (3711 msnm) al suroeste del municipio (SEDATU, 2016). La superficie total del municipio es de 478.2 km², de los cuales la actividad agrícola ocupa una superficie de 309 km² (64.6 %), Del total de área, unas 296.08 km² (96 %) se utilizan para el cultivo de maíz, que se encuentran directamente relacionado con las actividades pecuarias que usan una superficie estimada de 34 km² (7 %) y solo el 49.5 km² son de uso forestal (10.4 %). En ésta última se encuentran especies como el pino, oyamel, encino y cedro, entre otros, con frecuente tala clandestina e incendios forestales.

La erosión del suelo ocupa 40.8 km² que representa el 8.5 % de la superficie municipal. En 1991 la superficie que presentaba este problema abarcaba sólo el 8.42 % de la superficie municipal, aunque para el año 2001 se incrementó al 12.58 %. El tipo de roca es laja tipo andesítica que es una roca formada de ceniza, lapilli y fragmentos de lava angulosos combinación de fragmentos de roca y ceniza se forman por la caída torrencial de lluvias sobre los depósitos de material fragmentario no consolidado (SEDATU, 2016).

INTRODUCTION

In recent decades, the anthropogenic impact caused important changes in land use. The risk associated with the cycles of land abandonment and return to cultivation also implies certain threats to soil sustainability.

The study site is located within the Ejido La Gavia in the municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico. This Ejido is part of the physiographic province of the Trans-Mexican Volcanic Belt in Mexico, which is characterized by being an enormous mass of volcanic rocks of all compositions and formations with a variety of elevations, standing out among them Cerro La Guadalupana (3367 m, altitude) to the north, and Cerro San Antonio (3711 m, altitude) to the southwest of the municipality (SEDATU, 2016).

The total area of the municipality is 478.2 km², of which agricultural activity occupies an area of 309 km² (64.6 %). Of the total area, some 296.08 km² (96 %) are used for growing maize, which is found directly related to livestock activities that use an estimated area of 34 km² (7 %), and only 49.5 km² are for forest use (10.4 %). In the latter there are species such as pine, oyamel, oak and cedar, among others, with frequent clandestine logging and forest fires. Soil erosion occupies 40.8 km², which represents 8.5 % of the municipal area. In 1991 the surface that presented this problem covered only 8.42 % of the municipal area, although for the year 2001 it increased to 12.58 %.

The type of rock is andesitic slab type, which is a rock formed of ash, lapilli and angular lava fragments, a combination of rock fragments and ash, formed by the torrential fall of rains on the deposits of unconsolidated fragmentary material (SEDATU, 2016).

The La Gavia sub-basin belongs to the Lerma-Santiago basin with a contribution area of 505 km², and is geographically located in the western part of the Lerma basin and on the border of the Balsas river basin, within the coordinates 19° 15' and 19° 35' N and 99° 40' and 100° 00' W. The degraded slope is located at coordinates 19° 24' 7.5" N and 99° 53' 37.9" W. In the La Gavia basin, erosion problems occur mainly in areas with rugged topography, where the slopes are steep.

La sub-cuenca La Gavia pertenece a la cuenca Lerma-Santiago con una superficie de aportación de 505 km², y geográficamente se ubica en la parte poniente de la cuenca Lerma y en el límite con la cuenca del río Balsas, dentro del cuadro de coordenadas 19° 15' y 19° 35' LN y 99° 40' y 100° 00' LW. La ladera degradada se localiza en las coordenadas 19° 24' 7.5" N y 99° 53' 37.9" O.

En la cuenca La Gavia, los problemas de la erosión, se presentan principalmente en las áreas de topografía accidentada, donde las pendientes del terreno son escarpadas. Allí existen parcelas donde en un periodo de 60 años se han perdido estratos de hasta 1 m de suelo, debido al abandono por parte de los campesinos propietarios, a consecuencia de la reducción en la producción y la disminución de la rentabilidad de las cosechas de maíz.

El isótopo ¹³⁷Cs está presente en los suelos mexicanos. En diversos estudios de hongos silvestres del parque La Marquesa, todas las especies colectadas e identificadas observan actividad específica de ¹³⁷Cs en un intervalo entre 3.6 y 646.5 Bq kg⁻¹. Las especies de hongos con niveles de acumulación altos y un porcentaje mayor de ¹³⁷Cs son: *Gomphus floccosus*, con 152.2 Bq kg⁻¹ y *Clavariadelphus truncatus* con 96.9 Bq kg⁻¹ (Valenzuela *et al.*, 2004). En consecuencia, es factible aprovechar su presencia en los suelos mexicanos para usarlo como indicador de los procesos de erosión- sedimentación.

Solo los procesos físicos que mueven las partículas del suelo, como la erosión y las prácticas de labranza están involucrados en el movimiento del ¹³⁷Cs (La Manna *et al.*, 2019).

El isótopo ¹³⁷Cs, cuando entra en contacto con el suelo, permanece fijado a la materia orgánica y minerales, de forma que se mueve con el suelo durante su transporte (Gaspar *et al.*, 2013). Lo anterior significa que el isótopo ¹³⁷Cs es un efectivo trazador del movimiento de suelo en parcelas de cultivo, por lo que se utiliza para cuantificar la erosión del suelo en los agroecosistemas frágiles.

Para calcular la tasa de erosión anual (Mg ha⁻¹ año⁻¹) es necesario usar los modelos de balance de masa que utilizan el inventario de ¹³⁷Cs en un sitio de estudio de la ladera degradada en comparación con un sitio de referencia utilizando las mediciones de ¹³⁷Cs en el suelo (Mabit *et al.*, 2012; Walling *et al.*, 2002).

There are plots where, over a period of 60 y, strata of up to 1 m of soil have been lost due to abandonment by the peasant owners, as a result of a reduced production and lower profitability of maize harvests.

The isotope ¹³⁷Cs is present in Mexican soils. In various studies of wild mushrooms from La Marquesa park, all the species collected and identified observed specific activity of ¹³⁷Cs in an interval between 3.6 and 646.5 Bq kg⁻¹.

Fungal species with high levels of accumulation and a higher percentage of ¹³⁷Cs are: *Gomphus floccosus*, with 152.2 Bq kg⁻¹, and *Clavariadelphus truncatus* with 96.9 Bq kg⁻¹ (Valenzuela *et al.*, 2004). Consequently, it is feasible to use them in Mexican soils as indicators of erosion-sedimentation processes.

Only physical processes that move soil particles, such as erosion and tillage practices, are involved in the movement of ¹³⁷Cs (La Manna *et al.*, 2019).

The ¹³⁷Cs isotope, when it comes into contact with the soil, remains attached to organic matter and minerals, so that it moves with the soil during its transport (Gaspar *et al.*, 2013). This means that the ¹³⁷Cs isotope is an effective tracer of soil movement in crop plots, so it is used to quantify soil erosion in fragile agroecosystems.

To calculate the annual erosion rate (Mg ha⁻¹ y⁻¹) it is necessary to use mass balance models that use the ¹³⁷Cs inventory at a degraded slope study site compared to a reference site using the measurements of ¹³⁷Cs in the soil (Mabit *et al.*, 2012; Walling *et al.*, 2002).

Soil distribution is related to the presence and amount of ¹³⁷Cs measured at a reference site located on a hill with a flat surface that does not present erosion or sedimentation. It is convenient that this site presents a surface covered with grass in a homogeneous way and be close to the study site or degraded slope (Fulajtar *et al.*, 2017).

In the study site where the ¹³⁷Cs inventories are lower than the inventory of the reference sites, the loss of soil due to erosion processes can be inferred, and in the case that the measurement of ¹³⁷Cs in the study site is greater than the reference site value indicates that there is a sedimentation process.

The mass balance model (MBM 2) explains the changes of the ¹³⁷Cs contents in the reference soil

La distribución del suelo se relaciona con la presencia y cantidad del ^{137}Cs medida en un sitio de referencia que se localice en una loma con superficie plana que no presente erosión ni sedimentación. Es conveniente que este sitio presente una superficie cubierta con pasto de forma homogénea, y que esté cerca del sitio de estudio o ladera degradada (Fulajtar *et al.*, 2017). En el sitio de estudio donde los inventarios de ^{137}Cs son menores que el inventario de los sitios de referencia, se puede inferir la pérdida de suelo por procesos erosivos, y en el caso que la medida de ^{137}Cs en el sitio de estudio es mayor que el valor del sitio de referencia indica un proceso de sedimentación.

El modelo de balance de masa (MBM 2) explica los cambios de los contenidos de ^{137}Cs en el perfil del suelo de referencia a través del tiempo, en respuesta a la precipitación de ^{137}Cs sobre el terreno, las pérdidas de este trazador en el perfil del suelo debido a la erosión y la incorporación del suelo original que no contiene ^{137}Cs desde las capas inferiores de la profundidad del arado, en todo el periodo de tiempo desde que empezó la precipitación de ^{137}Cs hasta su pico máximo en 1963 (Gaspar y Navas, 2013; Fulajtar *et al.*, 2017).

La solución de la ecuación del balance de masa provee las bases para establecer una relación entre la tasa de erosión anual por pérdida del suelo con el porcentaje de reducción del inventario de ^{137}Cs en la ladera erosionada bajo estudio y el porcentaje de reducción del inventario del sitio de referencia (Walling *et al.*, 2002; Walling *et al.*, 2014).

En este estudio, los resultados de la cuantificación de la evolución temporal del ^{137}Cs (Soto *et al.*, 2002) en los suelos del sitio de referencia y del sitio de estudio, se utilizan para estimar la tasa de erosión anual mediante el modelo de balance de masa (MBM 2) adaptado a las condiciones del sitio estudiado (Mabit *et al.*, 2009). En este trabajo de investigación se plantea que la tasa de erosión anual ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en la ladera degradada del ejido La Gavia supera los límites máximos permitidos de erosión para este tipo de suelos agrícolas. El objetivo de estudio es cuantificar la tasa de erosión anual en una parcela de cultivo de maíz y una ladera degradada de este ejido e identificar las áreas de depósito de ^{137}Cs .

profile over time. This is in response to precipitation of ^{137}Cs on the ground, losses of this tracer in the soil profile due to erosion, and incorporation of original soil that does not contain ^{137}Cs from the lower layers of the tillage depth, throughout the time when the precipitation of ^{137}Cs began until its maximum peak in 1963 (Gaspar and Navas, 2013; Fulajtar *et al.*, 2017).

The solution of the mass balance equation provides the basis for establishing a relationship between the annual erosion rate due to soil loss and the percentage reduction of the ^{137}Cs inventory on the eroded slope under study, and the percentage reduction of the inventory of the reference site (Walling *et al.*, 2002; Walling *et al.*, 2014).

In this study, the results of the quantification of the temporal evolution of ^{137}Cs (Soto *et al.*, 2002) in the soils of the reference site and the study site are used to estimate the annual erosion rate by means of the balance model of mass (MBM 2) adapted to the conditions of the site under study (Mabit *et al.*, 2009).

In our view, the annual erosion rate ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) on the degraded slope of the Ejido La Gavia exceeds the maximum permitted limits of erosion for this type of agricultural soils. Then, the objective of this study was to quantify the annual erosion rate in a maize plot and a degraded slope of this Ejido and to identify the ^{137}Cs deposition areas.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study site and soil sampling

A slope representative of the agroecosystems of the Sierra Nevada was selected in the La Gavia sub-basin in the western part of the Lerma basin; to the west border limit with the Balsas river basin, in Mexico.

The relief is abrupt with an altitude between 2565 and 3600 m, and steep slopes with an average gradient of 19 %. The predominant climate is temperate subhumid, with an average annual temperature of 12 and 18 °C, rainfall in the driest month is less than 40 mm, with an average annual rainfall of 595 mm.

The predominant soils are Andosols, Vertisols and Feozems that border the Ignacio Ramírez reservoir. In general, most Andosols are found in the southeastern part of the basin; whereas the study area is on Vertisols (SEDESOL, 2010).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio y muestreo de suelo

Una ladera representativa de los agroecosistemas de la sierra nevada se seleccionó en la cuenca del río La Gavia en la parte occidental de la cuenca del Lerma y en su límite occidental con la cuenca del río Balsas, en México. El relieve es abrupto con un nivel de altitud entre 2565 y 3600 msnm y pendientes pronunciadas con un gradiente promedio de 19 %. El clima predominante es templado subhúmedo, con una temperatura media anual de 12 y 18 °C, la precipitación en el mes más seco es menor a 40 mm, con una precipitación media anual de 595 mm. Los suelos que predominan son andosol, vertisol y feozem que bordean el embalse Ignacio Ramírez. En general, la mayoría de los andosoles se encuentran en la parte sur este de la cuenca, mientras que la zona de estudio está sobre vertisoles (SEDESOL, 2010).

Se seleccionaron cuatro transectos representativos de la ladera degradada con el propósito de representar las tres diferentes secuencias ubicadas en loma, ladera y llano (Figura 1). Los transectos se establecieron desde la división de la parte alta en una loma a una altitud de 2498 msnm hasta el llano en la parte baja localizada a 2468 m antes del río La Gavia, que se caracterizan por diferentes rangos de altitud y usos del suelo. Se colectaron 40 muestras de suelo superficial a lo largo de los

Four representative transects of the degraded slope were selected in order to represent the three different sequences located on the hill, slope and valley (Figure 1). The transects were established from the division of the hilltop at an altitude of 2498 m onto the flat land of the valley, located 2468 m before the La Gavia river. Lands are characterized by different altitude ranges and land uses. Forty surface soil samples were collected along the four transects separated by 25 m from each other using a global positioning system (GPS) (Gaspar and Navas, 2013).

The five reference soil samples were obtained by soil cores from undisturbed grass, located on the hilltop (19° 24' 8.11" N and 99° 53' 41.17" W) near the slope of the study site; and on the grass soil of the graveyard of the Community La Tinaja (19° 23' 7.43" N and 99° 53' 24.26" W), with an area of 10 by 50 cm, with increments every 2 cm and a maximum depth of 50 cm.

Treatment and analysis of samples

Soil samples were air-dried, broken up by hand, and passed through a 2-mm sieve. The fraction greater than 2 mm corresponds to rock fragments and stones, which were separated from the fine fraction used for the ¹³⁷Cs analysis.



Figura 1. Localización de la ladera con los puntos de muestreo en cuatro transectos (círculos) y los sitios de referencia (cuadros) en el ejido La Gavia, municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México.

Figure 1. Location of the slope with the sampling points in four transects (circles) and the reference sites (squares) in the Ejido La Gavia, municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico.

cuatro transectos separados 25 m entre sí mediante un sistema de geoposicionamiento satelital (GPS) (Gaspar y Navas, 2013).

Las cinco muestras de suelo de referencia se realizaron obteniendo núcleos de suelo en pasto no perturbado, localizados en la loma (19° 24' 8.11" LN y 99° 53' 41.17" LW) cerca de la ladera del sitio de estudio y en suelo de pasto del panteón de la comunidad de La Tinaja (19° 23' 7.43" LN y 99° 53' 24.26" LW), con un área de 10 por 50 cm en incrementos cada 2 cm y con una profundidad máxima de 50 cm.

Tratamiento y análisis de las muestras

Las muestras de suelo se secaron al aire, se disgregaron a mano y se pasaron a través de un tamiz de 2 mm. La fracción superior a 2 mm corresponde a fragmentos de rocas y las piedras, las cuales se separaron de la fracción fina que se utilizó para el análisis de ¹³⁷Cs.

Las propiedades del suelo como la textura, materia orgánica (MO) y pH se determinaron siguiendo las técnicas estándar descritas en la NOM-021-RECNAT-2000. El contenido de MO por el método de ignición a 500 °C. El pH (KCl 1M, relación sólido-líquido 1:2.5) se midió con un potenciómetro y la textura por el método de Bouyocus. Las actividades de ¹³⁷Cs se midieron usando un detector de rayos gamma tipo coaxial hiperpuro de alta resolución de 1.9 keV para la energía de 661.6 keV y una eficiencia del 30 %, con blindaje de plomo de 10 cm de espesor para reducir el fondo natural, acoplado a un amplificador y analizador multicanal que fue calibrado utilizando muestras certificadas estándar en la misma geometría que las muestras del sitio de estudio (Navas *et al.*, 2014). Cada muestra se midió durante 30 000 s, produciendo resultados con una precisión en el análisis de ± 6-8 % al nivel de confianza del 95 %. El límite de detección para ¹³⁷Cs fue de 0.1 Bq kg⁻¹.

El contenido de ¹³⁷Cs en las muestras de suelo se expresa como una actividad por masa (Bq kg⁻¹) y como actividad acumulada o inventario (Bq m⁻²) que se calcula utilizando la masa de la muestra de suelo en la fracción <2 mm y la sección transversal de la muestra.

Los parámetros descriptivos clásicos que incluyen media, mínimo, máximo, rango, coeficiente de variación (CV), desviación estándar (SD) y asimetría fueron determinados por el programa Statgraphics plus 5.1. La distribución de las variables se evaluó mediante la prueba de Kolmogorove Smirnov y los coeficientes de correlación de

Soil properties such as texture, organic matter (MO) and pH were determined following the standard techniques described in NOM-021-RECNAT-2000. The MO content was measured by the ignition method at 500 °C. The pH (KCl 1M, solid-liquid ratio 1:2.5) was measured with a potentiometer, and the texture by the Bouyocus method. The ¹³⁷Cs activities were measured using a 1.9 keV high resolution hyper-pure coaxial gamma ray detector for the energy of 661.6 keV and an efficiency of 30 %, with 10 cm thick lead shielding to reduce the natural background, coupled to a multichannel amplifier and analyser that was calibrated using standard certified samples in the same geometry as the study site samples (Navas *et al.*, 2014). Each sample was measured for 30 000 s, producing results with an analysis precision of ± 6 - 8 % at the 95 % confidence level. The detection limit for ¹³⁷Cs was 0.1 Bq kg⁻¹.

The content of ¹³⁷Cs in soil samples is expressed as activity per mass (Bq kg⁻¹) and as cumulative activity or inventory (Bq m⁻²), which is calculated using the mass of the soil sample in the fraction < 2 mm and the cross section of the sample.

Classical descriptive parameters including mean, minimum, maximum, range, coefficient of variation (CV), standard deviation (SD), and asymmetry were determined in Statgraphics Plus 5.1. The distribution of the variables was evaluated using the Kolmogorov-Smirnov test, and the Pearson correlation coefficients among the studied variables were determined using Statgraphics (Macedo *et al.*, 2016).

RESULTS AND DISCUSSION

Statistical summary of the variables

The descriptive statistics of ¹³⁷Cs, organic matter (MO), pH, sand, clay and silt were calculated (Table 1). The selected parameters were normally distributed, as confirmed by the Kolmogorov-Smirnov test and the asymmetry values. The ¹³⁷Cs activity at the study site ranged from 10.2 to 859.8 Bq m⁻², with a mean value of 168.9 ± 167.7 Bq m⁻². The coefficient of variation of the activity of ¹³⁷Cs was 95, showing the distribution behaviour of ¹³⁷Cs by soil erosion in different degrees of affectation in the site, and deposition in few sampling points. The highest and lowest CVs belonged to ¹³⁷Cs activity (99.3) and pH (11.4). The variability associated with these parameters depends on the

Pearson entre las variables estudiadas se determinaron mediante el software Statgraphics (Macedo *et al.*, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resumen estadístico de las variables

Los resultados de los estadísticos descriptivos del ^{137}Cs , materia orgánica (MO), pH, arena, arcilla y limo se presentan en el Cuadro 1. Los parámetros seleccionados se distribuyeron normalmente confirmado por la prueba de Kolmogorov Smirnov y los valores de asimetría. La actividad de ^{137}Cs en el sitio de estudio varió de 10.2 a 859.8 Bq m⁻², con un valor medio de 168.9 ± 167.7 Bq m⁻². El coeficiente de variación de la actividad de ^{137}Cs fue 95, mostrando el comportamiento en la distribución de ^{137}Cs por la erosión del suelo en distintos grados de afectación en el sitio y deposición en pocos puntos de muestreo.

Los CV más altos y más bajos pertenecían a la actividad de ^{137}Cs (99.3) y pH (11.4). La variabilidad asociada con estos parámetros depende de la forma irregular de la ladera, la pendiente, la diferencia de altura entre la parcela degradada y la parte baja del sitio de estudio y el movimiento de agua por cárcavas de erosión en la parte central de la ladera, lo que conduce a la redistribución del suelo en diferentes partes del paisaje. La MO mostró consistencia en relación al coeficiente de correlación de Pearson significativa con el ^{137}Cs (Cuadro 2). Esta relación confirma que la cantidad de trazador depende del contenido de compuestos orgánicos

irregular shape of the hill, the slope, the height difference between the degraded plot and the lower part of the study site. As well as the movement of water through erosion gullies in the central part of the slope, which leads to the redistribution of the soil in different parts of the landscape. The MO showed consistency in relation to the significant Pearson correlation coefficient with ^{137}Cs (Table 2). This relationship confirms that the amount of tracer depends on the content of organic compounds and silt present in the selected soils within the study site. The MO and pH are some indicators of soil quality and are identified as variables associated with soil redistribution.

It is likely that MO and silt distributions were influenced by the combined effects of agricultural practices, land use change, and erosion along the hillside. The CV values of the ^{137}Cs inventory and the properties of the selected soils are affected by the abandonment of the land due to the decrease in maize production and the erosion caused by the transit of livestock and sheep through the degraded slope. According to the classification criteria, the ^{137}Cs inventory was classified as highly variable ($\text{CV} > 0.85$); the MO, clay and silts were classified as moderately variable ($0.15 < \text{CV} < 0.35$); whereas the sand and pH were classified as slightly variable ($\text{CV} < 15$).

Depth increment profiles

The ^{137}Cs distribution profiles of reference sites 1 and 2 of grass soil located near the slope were

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos para ^{137}Cs , materia orgánica (MO), arena, arcilla, limo y pH (n=40) en suelos del ejido La Gavia, municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México.

Table 1. Descriptive statistics for ^{137}Cs , organic matter (MO), sand, clay, silt, and pH (n=40) in soils of the Ejido La Gavia, municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico.

Variabes	Unidad	Media	DE	CV	Min	Max	Asimetría
^{137}Cs	Bq m ⁻²	168.9	167.7	99.3	10.2	859.8	2.079
MO	%	7.4	2.5	33.9	3.30	15.6	0.976
Arena	%	61.7	7.5	12.1	47.08	77.8	-0.234
Arcilla	%	20.6	6.3	30.5	8.90	36.2	0.654
Limo	%	17.7	5.9	33.7	7.80	39.3	1.171
pH		4.2	0.5	11.4	3.45	6.1	1.250

N=40; MO: materia orgánica; DE: desviación estándar; CV: Coeficiente de variación; Min: Mínima; Máx: Máxima. ♦ N=40; MO: organic matter; DE: standard deviation; CV: variation coefficient; Min: minimum; Max: maximum.

Cuadro 2. Coeficiente de correlación de Pearson entre el inventario de ¹³⁷Cs y propiedades de los suelos de la ladera en el ejido La Gavia, municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México.

Table 2. Pearson's correlation coefficient between the ¹³⁷Cs inventory and properties of the hill soils in the Ejido La Gavia, municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico.

	Unidad	MO	Arena	Arcilla	Limo	pH
¹³⁷ Cs	Bq m ⁻²	0.510 [¶]	-0.100	-0.187	0.321 [†]	-0.275
MO	%		-0.356 [†]	0.137	0.297	-0.147
Arena	%			-0.638 [¶]	-0.579 [¶]	0.016
Arcilla	%				-0.258	-0.361 [†]
Limo	%					-0.360 [†]

[†]La correlación es significativa a un nivel de 0.05 (bilateral), [¶]La correlación es significativa al nivel de 0.01 (bilateral); Los números en negritas significa un coeficiente de correlación > 0.5. ♦ Correlation is significant at a (two-sided) $p \leq 0.05$, [¶]Correlation is significant at a (two-sided) $p \leq 0.01$; Bold numbers mean a correlation coefficient > 0.5.

MO: materia orgánica; pH método de KCl 1M. ♦ MO: organic matter; pH 1M KCl method.

y limos presentes en los suelos seleccionados dentro del sitio de estudio. La MO y el pH son algunos indicadores de la calidad de los suelos y se identifican como variables asociadas a la redistribución del suelo.

Es probable que las distribuciones de la MO y los limos estuvieran influenciadas por los efectos combinados de las prácticas agrícolas, el cambio en el uso del suelo y la erosión a lo largo de la ladera. Los valores CV del inventario de ¹³⁷Cs y las propiedades de los suelos seleccionados están afectados por el abandono de la tierra, debido a la disminución en la producción de maíz y la erosión causada por el tránsito de ganado vacuno y ovino a través de la ladera degradada. Según los criterios de clasificación, el inventario de ¹³⁷Cs se clasificó como altamente variable (CV > 0,85), la OM, arcilla y limos se clasificaron como moderadamente variables (0,15 < CV < 0,35), mientras que la arena y pH se clasificaron como ligeramente variables (CV < 15).

Perfiles de incremento en la profundidad

Los perfiles de distribución ¹³⁷Cs de los sitios de referencia 1 y 2 de suelo de pasto localizado cerca de la ladera, son consistentes con los que se encuentran normalmente en otros sitios de referencia (Tassano *et al.*, 2021), a diferencia de los sitios de referencia 3 y 4 de suelos de pasto conservado que

consistent with those normally found in other reference sites (Tassano *et al.*, 2021). Unlike sites of reference 3 and 4 of conserved grass soils that showed a tracer distribution different from references 1 and 2. The ¹³⁷Cs inventories decreased exponentially with soil depth. At sites 1 and 2 a peak in ¹³⁷Cs activity was observed within 6 to 8 cm of the soil; at reference site 1 the maximum value found was 7.9 Bq kg⁻¹ at a depth of 6 cm; while at reference site 2 the maximum activity was 6.8 Bq kg⁻¹ at a depth of 8 cm. Most (96 %) of the ¹³⁷Cs contents were observed in the 15 cm of the soil profile (Figure 2).

Beneath this there was an exponential decline in tracer activity (Du and Walling, 2011), with an inventory of 26.8 and 27.8 Bq kg⁻¹. In both profiles, the activity was not detected at a depth greater than 20 cm, so the ¹³⁷Cs was retained in the first twenty centimetres of soil by organic matter and clay. In references 3 and 4 of grass there was a peak at 2 cm on the soil surface; most of the content (95 %) was in the first 15 cm (Figure 3). The distribution of ¹³⁷Cs in the reference site 3 obtained in grass soil 10 m from a pine forest, presented the maximum value in the first 2 cm of soil with an activity of 10.2 Bq kg⁻¹, which is greater than reference site 4 with a maximum activity of 6.6 Bq kg⁻¹ at the surface.

presentan una distribución del trazador distinta a las referencias 1 y 2. Los inventarios de ^{137}Cs disminuyen exponencialmente con la profundidad de suelo, en los sitios 1 y 2 se observa un pico en la actividad de ^{137}Cs ocurre dentro de los 6 a 8 cm del suelo, en el sitio de referencia 1 el valor máximo encontrado fue de 7.9 Bq kg^{-1} a una profundidad de 6 cm, mientras que el sitio de referencia 2 la actividad máxima fue de 6.8 Bq kg^{-1} a una profundidad de 8 cm, la mayoría (96 %) de los contenidos de ^{137}Cs se observa en los 15 cm del perfil del suelo (Figura 2). Debajo de esto hay una disminución exponencial en la actividad del trazador (Du y Walling, 2011), con un inventario de 26.8 y 27.8 Bq kg^{-1} respectivamente. En ambos perfiles la actividad no se detecta a una profundidad mayor de 20 cm, por lo que el ^{137}Cs es retenido en los primeros veinte centímetros de suelo por la materia orgánica y arcillas. En las referencias 3 y 4 de pasto se presenta un pico en los 2 cm en la superficie del suelo, la mayoría de los contenidos (95 %) en los primeros 15 cm (Figura 3). La distribución de ^{137}Cs en el sitio de referencia 3 obtenido en suelo de pasto a 10 m de un bosque de pino, presenta el valor máximo en los dos primeros centímetros de suelo con una actividad de 10.2 Bq kg^{-1} , el cual es mayor que el sitio de referencia 4 con una actividad máximo 6.6 Bq kg^{-1} en la superficie del terreno. El inventario de los dos sitios de referencia 3 y 4 es de 28.6 y 12.8 Bq kg^{-1} , respectivamente. Se observa una evidente diferencia en el inventario entre los sitios de referencia 3 y 4, debido a que presentaron pérdida

The inventory of the two reference sites 3 and 4 was 28.6 and 12.8 Bq kg^{-1} , respectively. An evident difference is observed in the inventory between reference sites 3 and 4, as they underwent soil loss of the first centimetres during the sampling. The distribution of ^{137}Cs in the profile of reference site 7 showed an activity of 0.9 Bq kg^{-1} at the surface and increased to a maximum of 6.8 Bq kg^{-1} at a depth of 10 cm; then the activity diminished exponentially up to 20 cm deep, in which 92 % of the total inventory of 23.8 Bq kg^{-1} was found.

When comparing the distribution of ^{137}Cs in terms of mass depth, a difference is observed in the form between the five profiles of reference sites 1, 2, 3, 4 and 7, in which the inventory is different since the soils show different features. The results of ^{137}Cs in the reference sites and the soil mass analysed by area allowed calculating the accumulated depth (kg m^{-2}) and the activity in Bq kg^{-1} with which the distribution diagrams were constructed (Figures 2, 3 and 4). Reference site 1 showed a form of activity distribution based on the accumulated mass depth reported by other authors (Figure 2) (Velasco *et al.*, 2018).

Reference site 3 presented greater activity in the first few centimetres of the soil surface. Although the shape of the distribution showed soil loss, probably due to cutting during the sampling process, or to the site was not representative of a reference site. (Figure 3).

The reference site 7 (Figure 4) showed a distribution similar to that reported in the literature. Due to the

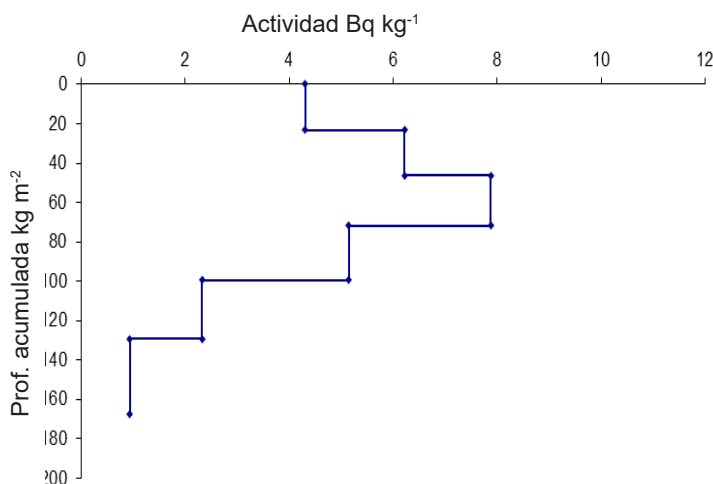


Figura 2. Distribución de la actividad de ^{137}Cs en relación a la profundidad acumulada del sitio de referencia 1 en el ejido La Gavia, municipio de Almploya de Juárez, Estado de México.

Figure 2. Distribution of the activity of ^{137}Cs in relation to the accumulated depth of the reference site 1 in the Ejido La Gavia, municipality of Almoloaya de Juárez, State of Mexico.

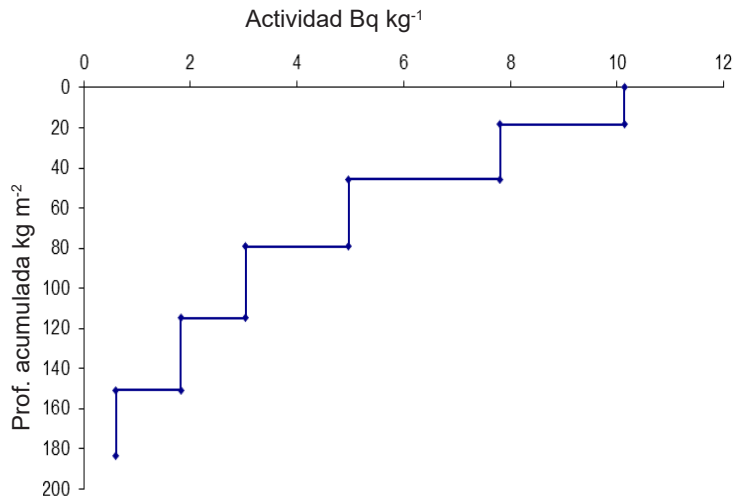


Figura 3. Distribución de la actividad de ¹³⁷Cs en relación a la profundidad acumulada del sitio de referencia 3 en el ejido La Gavia, municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México.
Figure 3. Distribution of ¹³⁷Cs activity in relation to the accumulated depth of reference site 3 in the Ejido La Gavia, municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico.

de suelo de los primeros centímetros durante el muestreo. La distribución de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio de referencia 7 presenta una actividad de 0.9 Bq kg⁻¹ en la superficie y aumenta hasta el máximo de 6.8 Bq kg⁻¹ a los 10 cm de profundidad; después la actividad se reduce exponencialmente hasta los 20 cm de profundidad, en los cuales se encuentra el 92 % del inventario total de 23.8 Bq kg⁻¹.

Al comparar la distribución del ¹³⁷Cs en función de la profundidad másica se observa una diferencia en la forma entre los cinco perfiles de los sitios de referencia 1, 2, 3, 4 y 7, en los cuales el inventario es diferente ya que son suelos con distintas características. Los resultados de ¹³⁷Cs en los sitios de referencia y la masa de suelo analizada por área permitieron calcular la profundidad acumulada (kg m⁻²) y la actividad en Bq kg⁻¹ con los cuales se construyen los diagramas de distribución como se observa en las Figura 2, 3 y 4. El sitio de referencia 1 presenta una forma de distribución en la actividad en función de la profundidad másica acumulada reportados por otros autores (Figura 2) (Velasco *et al.*, 2018).

El sitio de referencia 3 presenta mayor actividad en los primeros centímetros de la superficie de suelo, aunque la forma de la distribución pone en evidencia la pérdida de suelo probablemente debido al corte durante el proceso de muestreo o el sitio no era representativo de un sitio de referencia (Figura 3).

La Figura 4 presenta al sitio de referencia 7, en la que se observa una distribución similar a la reportada en

fact that the complete soil profile was sampled and obtained from the flat land located in the front of the graveyard of the Community La Tinaja; with soil not disturbed by tillage, construction or animal grazing.

The eroded slope was analysed in four transects T1, T2, T3 and T4. At each one, 10 measurements were obtained at different altitudes. Three of them were located on the upper slope of the site, six on the middle slope, and one on the valley, or plain. The ¹³⁷Cs inventory in the study plot ranged between 0.4 and 5.5 Bq kg⁻¹ (10.2 and 535.1 Bq m⁻²). The forty data were less than the inventory of 23.8 Bq kg⁻¹ (584.3 Bq m⁻²) of the selected reference site 7; which is an indicative of soil redistribution and transport from the hill to the plain of the study plot (Table 3).

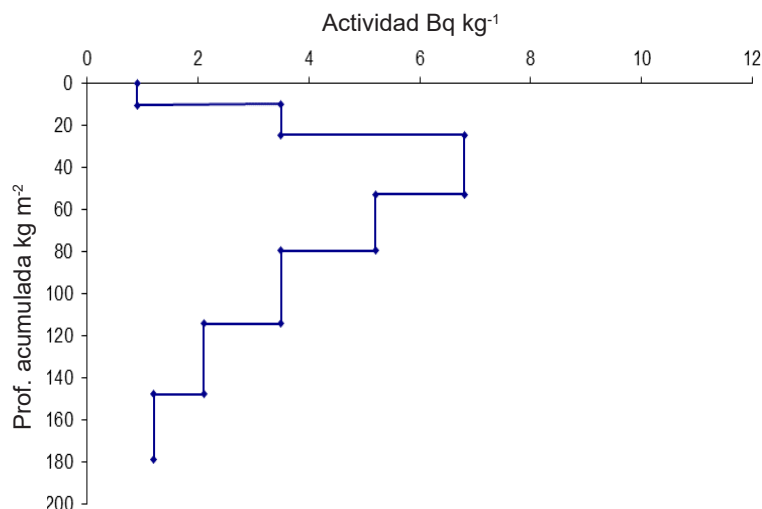
Conversion model parameters

The tillage depth of 15 cm, bulk density of 1.2 kg m⁻³, reference site 7 inventory of 584.3 Bq m⁻², a ratio factor of 0.42, were used as input to the MBM 2 model, as well as a relaxation depth of 4.2 kg m⁻², and a mass depth of tillage of 79.8 kg m⁻².

The erosion rate (*R*) was calculated in the four transects of the study plot with the MBM 2 conversion model, which are expressed in units of Mg ha⁻¹ y⁻¹. Results showed an interval between - 1.1 and - 54.3 Mg ha⁻¹ y⁻¹, which indicates that erosive phenomena occur in the four transects studied, with the highest soil loss in transects 1 and 2 of - 23.5 and - 27.5 Mg ha⁻¹ y⁻¹. Transects 3 and 4 resulted in negative values of - 20.9 and - 22.0 Mg

Figura 4. Distribución de la actividad de ^{137}Cs en relación a la profundidad acumulada del sitio de referencia 7 en el ejido La Gavia, municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México.

Figure 4. Distribution of ^{137}Cs activity in relation to the accumulated depth of reference site 7 in the La Gavia Ejido, municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico.



la literatura, debido a que se muestreo el perfil de suelo completo y se obtuvo de una explanada localizada en la parte frontal del panteón de la comunidad de La Tinaja, con suelo no perturbado por el arado, construcciones o pastoreo de animales.

La ladera erosionada se analizó en cuatro transectos T1, T2, T3 y T4, en cada uno se obtuvieron 10 mediciones a diferentes altitudes, tres de ellos se localizaron en la ladera alta del sitio, seis en la ladera media y una en la parte baja o llano. El inventario de ^{137}Cs en la parcela de estudio se encontró en un intervalo entre 0.4 y 5.5 Bq kg⁻¹ (10.2 y 535.1 Bq m⁻²). Los cuarenta datos son menores que el inventario de 23.8 Bq kg⁻¹ (584.3 Bq m⁻²) del sitio de referencia 7 seleccionado, indicativo de la redistribución del suelo y transporte desde la loma hacia las partes bajas de la parcela de estudio (Cuadro 3).

Parámetros del modelo de conversión

Se usaron como datos de entrada al modelo MBM 2, la profundidad de arado de 15 cm, la densidad aparente de 1.2 kg m⁻³, el inventario del sitio de referencia 7 de 584.3 Bq m⁻², un factor de proporción de 0.42, una profundidad de relajación de 4.2 kg m⁻², y una profundidad másica de arado de 79.8 kg m⁻².

Se calculó la tasa de erosión (R) en los cuatro transectos de la parcela de estudio con el modelo de conversión MBM 2 que se expresan en unidades de Mg ha⁻¹ año⁻¹. Los resultados presentan un intervalo entre -1.1 y -54.3 Mg ha⁻¹ año⁻¹, lo cual indica que

ha⁻¹ y⁻¹. Only one point located in the lowest part of transect 4 presented sedimentation (Figure 5) (Gil *et al.*, 2015). The average annual erosion rate of the four transects exceeded the permitted limit of 6.7 Mg ha⁻¹ y⁻¹ for this type of soils.

The soil eroding on top and slope moves to the lower lands of the plain at the study site, due to the force of the water runoff that causes the soil to move downwards. However, it was not deposited in the plain next to the study site. The activity of ^{137}Cs in the first 10 cm of site 5 of the study plain was less than the detection limit. A homogeneous profile was observed between 10 and 50 cm, with an activity that did not exceed 0.8 Bq kg⁻¹ in this depth range. (Figure 6).

Between 50 and 60 cm, the activity of the tracer increased to 3.5 Bq kg⁻¹, although the inventory was lower than the reference site, so the processes that prevail in the plain near the hillside were erosive. The inventory of site 5 located in the plain (19° 24' 8.11" N and 99° 53' 41.17" W) is 12.4 Bq kg⁻¹, less than the inventory of the reference sites. Thus, the dominant process in this area is erosive and shows that the eroded soils were transported outside the study site, and there is a high probability that they would reach into the La Gavia river, which discharges downstream of the basin.

The results of the distribution of ^{137}Cs in the plot located in the lower part of the degraded slope showed the accumulation of sediments (Figure 6). This statement is confirmed when comparing

Cuadro 3. Actividad de ¹³⁷Cs en los suelos de la ladera de estudio en los cuatro transectos en el ejido La Gavia, municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México.

Table 3. Activity of ¹³⁷Cs in the soils of the study hillside in the four transects in the Ejido La Gavia, municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico.

T1		T2		T3		T4	
Bq kg ⁻¹	DE	Bq kg ⁻¹	DE	Bq kg ⁻¹	DE	Bq kg ⁻¹	DE
0.8	± 0.3	0.7	± 0.3	0.4	± 0.2	1.6	± 0.2
0.9	± 0.2	1.0	± 0.2	0.9	± 0.2	0.9	± 0.1
1.3	± 0.3	3.1	± 0.3	3.0	± 0.3	1.2	± 0.2
2.0	± 0.3	1.4	± 0.3	2.6	± 0.2	0.9	± 0.3
<0.1	-	<0.2	-	1.4	± 0.3	3.3	± 0.3
2.7	± 0.4	1.5	± 0.3	0.6	± 0.3	<0.1	-
0.7	± 0.1	0.4	± 0.1	1.0	± 0.2	<0.3	-
<0.1	-	<0.1	-	1.9	± 0.4	1.2	± 0.3
2.2	± 0.2	<0.2	-	<0.1	-	<0.3	-
1.4	± 0.3	1.0	± 0.2	1.0	± 0.3	5.5	± 0.4

DE: Desviación Estándar. ♦ DE: standard deviation.

ocurren fenómenos erosivos en los cuatro transectos estudiados, con la pérdida de suelo en los transectos 1 y 2 más altos con -23.5 y -27.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Los transectos 3 y 4 resultaron con valores negativos de -20.9 y -22.0 Mg ha⁻¹ año⁻¹, solo un punto localizado en la parte más baja del transecto 4 presentó sedimentación (Figura 5) (Gil *et al.*, 2015). La tasa de erosión anual promedio de los cuatro transectos supera el límite permitido 6.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para este tipo de suelos.

the inventory of the reference site (23.8 Bq kg⁻¹) against the inventory of study site 6 (35.5 Bq kg⁻¹) of the plot located a few metres away from the La Gavia river. The maximum values were observed in the first 8 cm of the profile; then a decrease at 15 cm and another increase at 20 cm (Figure 7). The tracer distribution corresponds to removal from the lower soil layers to the upper ones, as they are displaced by the movement of the plough during the preparation of the plot land.

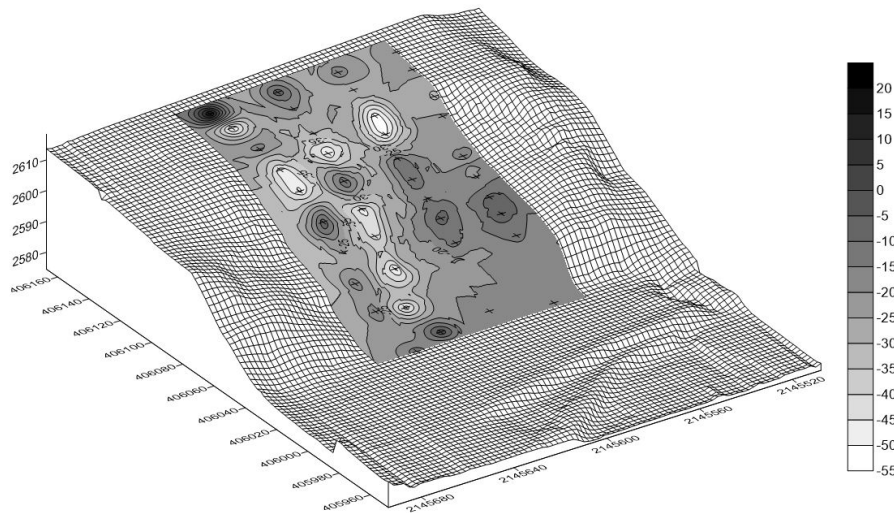


Figura 5. Tasa de erosión anual en la ladera de estudio en los cuatro transectos en Mg ha⁻¹ año⁻¹ en el ejido La Gavia, municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México.

Figure 5. Annual erosion rate on the study slope in the four transects in Mg ha⁻¹ y⁻¹ in the Ejido La Gavia, municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico.

El suelo que se erosiona en la loma y ladera se mueve hacia la parte baja en el llano del sitio de estudio, debido a la fuerza de los escurrimientos de agua que provocan que el suelo se desplace hacia abajo, sin embargo, no se depositan en el llano inmediato al sitio de estudio. La actividad de ^{137}Cs en los primeros 10 cm del sitio 5 del llano de estudio es menor al límite de detección, se observa un perfil homogéneo entre los 10 y 50 cm con una actividad que no supera 0.8 Bq kg^{-1} en este intervalo de profundidad (Figura 6). Entre 50 y 60 cm la actividad del trazador aumentó a 3.5 Bq kg^{-1} , aunque el inventario es menor que el sitio de referencia, por lo que los procesos que dominan en el llano cerca de la ladera son erosivos.

El inventario del sitio 5 ubicado en el llano ($19^\circ 24' 8.11'' \text{ LN}$ y $99^\circ 53' 41.17'' \text{ LW}$) es de 12.4 Bq kg^{-1} , menor que el inventario de los sitios de referencia, por lo que el proceso dominante en esta zona es erosivo y demuestra que los suelos erosionados son transportados fuera del sitio de estudio con alta probabilidad que lleguen al río la Gavia que los descarga aguas abajo de la cuenca.

Los resultados de la distribución del ^{137}Cs en la Figura 6, demuestran que la parcela localizada en la parte baja de la ladera degradada, presenta la acumulación de sedimentos. Esta afirmación se confirma al comparar el inventario del sitio de referencia (23.8 Bq kg^{-1}) contra el inventario de sitio de estudio 6 (35.5 Bq kg^{-1}) de la parcela localizada a pocos metros del río La Gavia. Se observan los máximos valores en los primeros 8 cm del perfil, posterior

The inventory of site 6 of the plot was 35.5 Bq kg^{-1} , which is higher than the inventory of the reference site with 23.8 Bq kg^{-1} ; thus, the dominant process in this area is deposition. The soils eroded from the hillside were accumulated in the plot near the La Gavia river in the Ejido La Gavia.

CONCLUSIONS

The weighted and retrospective erosion rates of the last 55 years exceed the permissible limit for these types of soils, by a 3-fold average value above such limit. Results indicated that the plot presents erosion in the hilltop, slope and in the plain, in which there is the accumulation of sediments in a single point of the plain.

The study with the tracer confirmed that the high levels of erosion generally observed on the slopes dedicated to livestock grazing, as well as to the cultivation of maize in central Mexico, makes it necessary to implement actions in order to reduce erosion and conserve the soil. Through the construction of terraces and reforestation with pines towards recovering the quality of the soils and the pine forests.

The study affirms the potential of using ^{137}Cs in Mexico to provide information on annual erosion rates and soil redistribution. The use of other tracers such as ^7Be and ^{210}Pb , among others, in the Ejido La Gavia would provide additional information on the soil erosion and sedimentation processes in the study area. They would be eventually useful to evaluate the effectiveness of

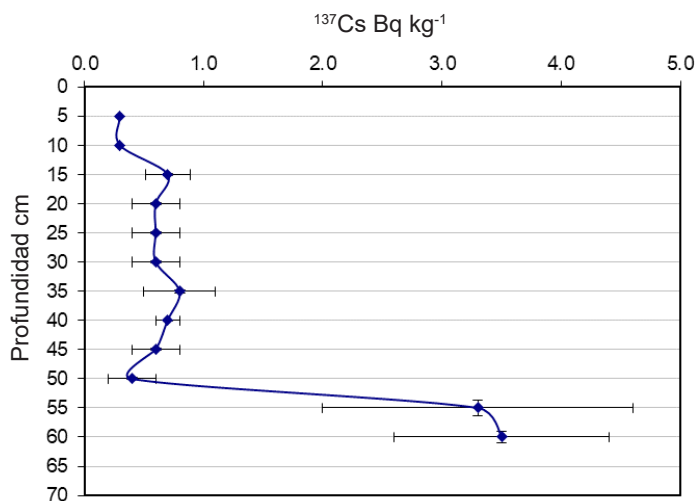


Figura 6. Distribución del ^{137}Cs en el sitio 5 del llano de estudio en el ejido La Gavia, municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México.

Figure 6. Distribution of ^{137}Cs in site 5 of the study plain in the Ejido La Gavia, municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico.

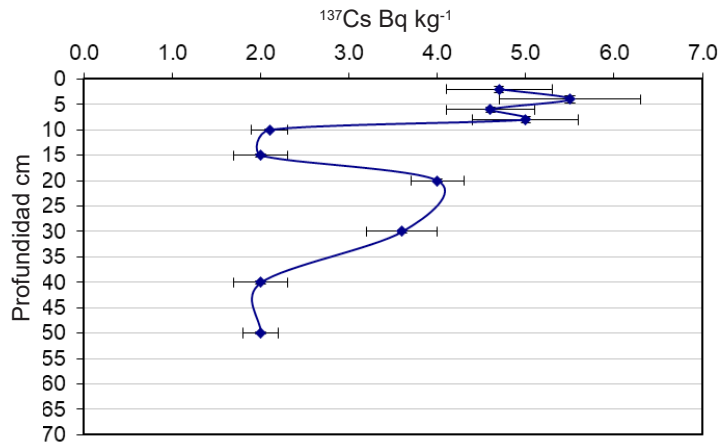


Figura 7. Distribución del ^{137}Cs en el perfil 6 de la parcela del sitio de estudio en el ejido La Gavia, municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México.

Figure 7. Distribution of ^{137}Cs in profile 6 of the plot of the study site in the Ejido La Gavia, municipality of Almoloya de Juárez, State of Mexico.

una disminución a los 15 cm y otro aumento a los 20 cm (Figura 7). La distribución de trazador corresponde con su remoción de las capas más bajas de suelo hacia las superiores desplazadas por el movimiento del arado durante la preparación de la tierra de la parcela.

El inventario del sitio 6 de la parcela es de 35.5 Bq kg^{-1} , que es mayor que el inventario del sitio de referencia con 23.8 Bq kg^{-1} , por lo que el proceso dominante en esta zona es de deposición, lo cual demuestra que los suelos erosionados de la ladera son acumulados en la parcela cerca del río La Gavia en el ejido del mismo nombre.

CONCLUSIONES

Las tasas de erosión ponderada y retrospectiva de los últimos 55 años superan el límite permisible para estos tipos de suelos, en un valor promedio de 3 veces por encima de este límite. Los resultados indican que la parcela presenta erosión en la parte alta, ladera y en el llano en el cual se presenta acumulación de sedimentos en un solo punto de la parte baja.

El estudio con el trazador confirma que los niveles elevados de erosión observados en las laderas dedicadas al pastoreo de ganado, así como al cultivo de maíz en el centro del país, lo que obliga a realizar acciones para frenar la erosión y conservar el suelo mediante la construcción de terrazas y reforestación con pinos para recuperar la calidad de los suelos y los bosques de pino.

practices of conservation to control and mitigate the degradation of Mexican soils.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the International Atomic Energy Agency for the partial funding through the ARCAL RLA5076 project, and the Mexican Agency for International Development Cooperation with the Joint Cooperation Fund between Uruguay and Mexico AUCI-AMEXCID.

— End of the English version —



Se considera que el estudio confirma el potencial del uso de ^{137}Cs en México para proporcionar información sobre las tasas de erosión anual y redistribución del suelo. El uso de otros trazadores como el ^7Be y ^{210}Pb , entre otros, en el ejido La Gavia podría proporcionar información adicional sobre los procesos de erosión/sedimentación del suelo en el área de estudio y resultar útil en el futuro para evaluar la efectividad de las prácticas de conservación para controlar y mitigar la degradación de los suelos mexicanos.

AGRADECIMIENTOS

Al Organismo Internacional de Energía Atómica por el financiamiento parcial a través del proyecto ARCAL RLA5076 y a la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo con el Fondo de Cooperación Conjunta entre Uruguay y México AUCI-AMEXCID.

REFERENCIAS

- Du P, Walling DE. 2011. Using ^{137}Cs measurements to investigate the influence of erosion and soil redistribution on soil properties. *Applied Radiation and Isotopes* 69: 717–726. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.01.022>
- Fulajtar E, Mabit L, Renschler CS, Le A, Yi Z. 2017. Use of ^{137}Cs for soil erosion assessment. *Food and Agriculture Organization of the United Nations-International Atomic Energy Agency*. Rome, Italy. <https://www.fao.org/3/i8211en/i8211en.pdf> (Retrieved: December 2021).
- Gaspar L, Navas A, Walling DE, Machín J, Gómez-Arozamena J. 2013. Using ^{137}Cs and ^{210}Pb to assess soil redistribution on slopes at different temporal scales. *Catena* 102: 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.004>
- Gaspar L, Navas A. 2013. Vertical and lateral distributions of ^{137}Cs in cultivated and uncultivated soils on Mediterranean hillslopes. *Geoderma* 207–208: 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.034>
- Gil R H, Peralta JL, Carrazana J, Riverol M, Aguilar Y, Morejón YM, Oliveira J, Fleitas G. 2015. Utilización de técnicas nucleares para estimar la erosión hídrica en plantaciones de tabaco en Cuba. *Cultivos Tropicales* 36 (4): 7–13.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2014. Conversion models and related software. Guidelines for using fallout radionuclides to assess erosion and effectiveness of soil conservation strategies. IAEA-TECDOC 1741. IAEA. Vienna, Austria. pp. 125–148. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1741_web.pdf (Retrieved: February 2020).
- La Manna L, Gaspar L, Tarabini M, Quijano L, Navas A. 2019. ^{137}Cs inventories along a climatic gradient in volcanic soils of Patagonia: Potential use for assessing medium term erosion processes. *Catena* 181: 104089. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104089>
- Macedo-Miranda G, Ávila-Pérez P, Gil-Vargas P, Zarazúa G, Sánchez-Meza JC, Zepeda-Gómez C, Tejeda S. 2016. Accumulation of heavy metals in mosses: a biomonitoring study. *SpringerPlus* 5: 715. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2524-7>
- Mabit L, Kignalik A, Benmansour M, Toloza A, Geisler A, Gerstmann UC. 2009. Assessment of erosion and deposition rates within an Austrian agricultural watershed by combining ^{137}Cs , ^{210}Pb and conventional measurements. *Geoderma* 150: 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.024>
- Mabit L, Chhem-Kieth S, Toloza A, Vanwalleghem T, Bernard C, Infante Amate J, González de Molina M, Gómez JA. 2012. Radioisotopic and physicochemical background indicators to assess soil degradation affecting olive orchards in southern Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 159: 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.06.014>
- Navas A, López-Vicente M, Gaspar L, Machín J. 2012. Assessing soil redistribution in a complex karst catchment using fallout ^{137}Cs and GIS. *Geomorphology* 196: 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.018>
- Navas A, López-Vicente M, Gaspar L, Palazón L, Quijano L. 2014. Establishing a tracer-based sediment budget to preserve wetlands in Mediterranean mountain agroecosystems (NE Spain). *Science of the Total Environment* 496: 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.026>
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). 2010. Atlas de riesgos del municipio de Almoloya de Juárez y programa interno de protección civil en los inmuebles del ayuntamiento, Secretaría de Desarrollo Social, México, https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo/2013/51/7/be3c681c1f3927ee00b3620e66b093de.pdf (Retrieved: February 2021).
- SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano). 2016. Atlas de riesgos del municipio de Almoloya de Juárez, pp. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, pp. 12–22. http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2016/AR_ALMOLOYA_DE_JUAREZ_MEX_2016.pdf (Retrieved: January 2020).
- Soto J, Gómez J, González A, Remondo J, Díaz de Terán JR, Cendrero A, Alcaide J. 2002. Evolución de los deslizamientos de ladera mediante su caracterización con Cs-137. *Revista Cuaternario y Geomorfología* 16: 73–81.
- Tassano M, Montañez A, Nuñez L, Trasante T, González J, Irigoyen J, Cabral P, Cabrera M. 2021. Spatial cross-correlation between physicochemical and microbiological variables at superficial soil with different levels of degradation. *Catena* 198: 105000. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105000>
- Valenzuela V H, Herrera T, Gaso MI, Pérez-Silva E, Quintero E. 2010. Acumulación de radiactividad en hongos y su relación con roedores en el bosque del Centro Nuclear de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 20: 141–146.
- Velasco H, Torres-Astorga R, Joseph D, Antoine JS, Mabit L, Toloza A, Dercon G, Walling DE. 2018. Adapting the Caesium-137 technique to document soil redistribution rates associated with traditional cultivation practices in Haiti. *Journal of Environmental Radioactivity* 183: 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.12.008>
- Walling DE, He Q, Zhang Y. 2014. Conversion models and related software. *In*: Guidelines for using fallout radionuclides to assess erosion and effectiveness of soil conservation strategies. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/017/46017605.pdf?r=1 (Retrieved: January 2021).

FRIJOL GENÉTICAMENTE MODIFICADO CON LA DEFENSINA RECOMBINANTE *pdf1.2* TOLERANTE A PUDRICIONES DE LA RAÍZ

COMMON BEAN GENETICALLY MODIFIED WITH THE RECOMBINANT DEFENSIN *pdf1.2* TOLERANT TO ROOT ROT DISEASE

Bertha María Sánchez-García¹, María Alejandra Mora-Avilés^{2*}

¹ Instituto Tecnológico de Roque. Carretera Celaya-Juventino Rosas km 8, Apartado Postal 508, Celaya, Gto., México. C. P. 38110.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carr. Celaya-San Miguel de Allende km 6.5, Celaya, Gto., México. C. P. 38110.

*Autor para correspondencia: mora_alejandra@yahoo.com

RESUMEN

Las pudriciones de la raíz en frijol ocasionadas por hongos patógenos, no han podido ser controladas de manera eficiente, ya sea porque los genes de resistencia no están disponibles en la diversidad genética de frijol, o bien porque los métodos de control muestran una efectividad limitada. Líneas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Mayo Anita (FMA) modificadas genéticamente con el gen defensina (*pdf1.2*) de *Arabidopsis thaliana*, se evaluaron en condiciones de confinamiento para determinar la capacidad de protección contra los hongos *Fusarium oxysporum* y *F. lateritium*. Veinticinco plantas de cinco líneas homocigotas T4 FMA-*pdf1.2* L2, L3, L4, L7 y L9 en macetas de 1 L con Sunshine Mix[®] No. 6 se incubaron con *Fusarium oxysporum* 2.0×10^5 conidios mL⁻¹ y 21 d después con *F. lateritium* 2.5×10^5 conidios mL⁻¹. Los testigos no modificados genéticamente fueron plantas de frijol FMA y del cv. Montcalm incubadas y no incubadas con los patógenos. Las plantas se evaluaron 21 d después de cada inoculación de acuerdo con una escala de evaluación semi cuantitativa. La evaluación de las plantas inoculadas con *F. oxysporum* indicó que las cinco líneas FMA-*pdf1.2* mostraron una severidad significativamente menor con respecto a las plantas control; asimismo, entre líneas se observó mejor desempeño de las líneas L3 y L9. Por otro lado, el daño ocasionado por *F. lateritium*, en todas las líneas de frijol FMA-*pdf1.2* fue de hasta 25 % de los tejidos de hipocotilo y raíz, significativamente inferiores ($p \leq 0.05$) a las plantas control,

ABSTRACT

Pathogenic fungi are responsible for root rot in common beans. However, an efficient control of this situation has not been possible, either because the genetic diversity of common beans lacks resistance genes or because control methods have a limited effectiveness. Lines of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Mayo Anita (FMA) —genetically modified with the defensin gene (*pdf1.2*) from *Arabidopsis thaliana*— were evaluated under confinement conditions to determine their protective capacity against the *Fusarium oxysporum* and *F. lateritium* fungi. Twenty-five plants from five homozygous lines (T4 FMA-*pdf1.2* L2, L3, L4, L7, and L9) were placed in 1-L pots containing Sunshine Mix[®] No. 6. Then they incubated with 2.0×10^5 conidia mL⁻¹ of *Fusarium oxysporum* and, 21 days later, with 2.5×10^5 conidia mL⁻¹ of *F. lateritium*. The non-genetically modified controls were FMA common bean plants and cv. Montcalm, incubated and non-incubated with pathogens. The plants were evaluated 21 d after each inoculation, based on a semiquantitative evaluation scale. The evaluation of the plants inoculated with *F. oxysporum* indicated that the five FMA-*pdf1.2* lines showed a significantly lower severity than the control plants; likewise, lines L3 and L9 had a better performance. Meanwhile, *F. lateritium* damaged up to 25 % of the hypocotyl and root tissues of all the FMA-*pdf1.2* common bean lines; this percentage is significantly lower ($p \leq 0.05$) than the damage percentage in the control plants, which reached 50 % of the tissues. There was an inverse correlation between the transcriptional expression levels of the *pdf1.2* gene and the protection degree conferred ($R^2 = -0.93$): the five FMA-

Recibido: junio, 2021. Aprobado: enero, 2022.

Publicado en *Agrociencia* 56: 31-45, 2022.

las cuales alcanzaron daños en el 50 % de los tejidos. Se observó una correlación inversa entre los niveles de expresión transcripcional del gen *pdf1.2* y el grado de protección conferido ($R^2 = -0.93$), las cinco líneas FMA-*pdf1.2* mostraron menor severidad dentro del margen de tolerancia a *F. oxysporum* y *F. lateritium*.

Palabras clave: tolerancia, protección, amplio espectro, hongos patógenos, *Phaseolus vulgaris* L.

INTRODUCCIÓN

La enfermedad pudrición de raíz del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es ocasionada por uno o más hongos patógenos como *Fusarium solani* f. sp. *phaseoli* (Burk.) Snyder & Hans., *F. oxysporum*, *F. lateritium* y *Rhizoctonia solani*, entre los más importantes, y consiste en la invasión de la planta a través de la epidermis, estomas y heridas (Eke *et al.*, 2020). Como resultado de la infección es común observar líneas rojas a lo largo de la base del hipocotilo, así como decoloración y deterioro tanto de las raíces principales como de las secundarias, las cuales culminan en la pudrición del tejido infectado. En casos graves de la enfermedad la planta muestra signos visibles en la parte aérea como clorosis, defoliación y bajo porte (DGSV-CNRF, 2020) y puede causar hasta 80 % de pérdidas en el rendimiento de semilla (SIAP, 2020).

Derivado de la colecta de muestras de frijol realizada en cinco estados productores de frijol en México (Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato y Querétaro), Montiel-González *et al.* (2005) reportaron que las tres especies más frecuentes de *Fusarium* son *F. oxysporum* (39 %), *F. solani* (27 %) y *F. lateritium* (13 %), esta última reportada por primera vez como patógeno importante, el cual en un principio se consideró erróneamente como un patógeno de bajo impacto, debido a que es una especie de crecimiento lento, aunado a que el desarrollo y síntomas de este patógeno estaba encubierto por las otras especies con características de rápido crecimiento (Sánchez-García *et al.*, 2006). El frijol es un cultivo que superó su condición de recalcitrancia para obtener plantas completas a partir de una célula en condiciones *in vitro*. El método más exitoso en términos de eficiencia de regeneración es la organogénesis directa. A partir de

pdf1.2 lines were less severely damaged by *F. oxysporum* and *F. lateritium* (within the tolerance margin).

Keywords: tolerance, protection, broad-spectrum, pathogenic fungi, *Phaseolus vulgaris* L.

INTRODUCTION

The root rot disease of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) is caused by one or more pathogenic fungi; including *Fusarium solani* f. sp. *phaseoli* (Burk.) Snyder & Hans., *F. oxysporum*, *F. lateritium*, and *Rhizoctonia solani*, among the most important. They invade the plant through the epidermis, stomata, and wounds (Eke *et al.*, 2020). Because of the infection, red lines usually are observed along the base of the hypocotyl; discoloration and deterioration of both the main and secondary roots can also be observed. This process culminates in the rotting of the infected tissue. In severe cases of the disease, the plant shows visible signs in the aerial part (*e.g.*, chlorosis, defoliation, and low size) (DGSV-CNRF, 2020) and up to 80 % losses in seed yield are recorded (SIAP, 2020).

Derived from the collection of common bean samples carried out in five common bean-producing states in Mexico (Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato, and Querétaro), Montiel-González *et al.* (2005) reported that the three most frequent *Fusarium* species are *F. oxysporum* (39 %), *F. solani* (27 %), and *F. lateritium* (13 %); the latter was reported for the first time as an important pathogen. It was initially mistaken for a low-impact pathogen, because it is a slow-growing species. Additionally, its development and symptoms were hidden by other species with fast-growing characteristics (Sánchez-García *et al.*, 2006).

Common bean is a crop that has overcome the recalcitrance condition to obtain complete plants from a single cell under *in vitro* conditions. The most efficient regeneration method is direct organogenesis. Based on these efforts, several researchers have published reports about the development of genetically modified common beans with characteristics such as: tolerance to the glufosinate ammonium herbicide (Aragão *et al.*, 2002); resistance to BGMV (Bean Golden

estos esfuerzos se generaron reportes de obtención de frijol modificado genéticamente con características como tolerancia al herbicida glufosinato de amonio (Aragão *et al.*, 2002), resistencia a BGMV (bean golden mosaic virus) mediante iRNA (Bonfim *et al.*, 2007), tolerancia a *Colletotrichum lindemuthianum* (Espinosa-Huerta *et al.*, 2013), tolerancia a estrés hídrico (Cadena-Hernández *et al.*, 2019), y rizosecreción de lectina cisgénica en *P. acutifolius* (Martínez-Alarcón *et al.*, 2019), dentro de los más relevantes.

El frijol cultivar Flor de Mayo Anita (FMA) se modificó genéticamente con la defensina *pdf1.2* de *Arabidopsis thaliana*. Cinco líneas de FMA-*pdf1.2* se evaluaron previamente y se observó resistencia a *C. lindemuthianum*, en comparación con la aislina no transformada (Espinosa-Huerta *et al.*, 2013). El gen *pdf1.2* codifica para una defensina de *Arabidopsis thaliana*, posee una alta homología (> 85 %) con los genes que codifican para proteínas antifúngicas y actúa en el sitio de infección o en regiones remotas no inoculadas del tejido. El mecanismo de acción de las defensinas consiste en la atracción electrostática entre el péptido catiónico y la membrana aniónica del microorganismo, la inserción del péptido en la membrana del patógeno, seguida por la permeabilización de la membrana mediante formación de poros y lisis celular y con ello, la inducción de influjo de Ca^{+2} y eflujo de K^{+} cuando se adhieren a las hifas de hongos (Iqbal *et al.*, 2019; Espinosa-Huerta *et al.*, 2019).

Por lo anterior y derivado de que el gen defensina *pdf1.2* puede proveer protección contra hongos patógenos, el objetivo de este trabajo fue evaluar cinco líneas independientes de frijol FMA-*pdf1.2*, inicialmente caracterizadas por su resistencia a antracnosis; para establecer la capacidad de resistencia (daños menores a la planta y llega a etapa de floración), o tolerancia (daños por la enfermedad y con merma en su potencial de floración) al desarrollo de la infección de hongos patógenos *F. oxysporum* y *F. lateritium*, causantes de pudriciones de raíz. Con lo anterior, definir la protección de amplio espectro de este modelo biotecnológico para el control de diversas especies de hongos patógenos de importancia económica para el frijol.

Mosaic Virus) through iRNA (Bonfim *et al.*, 2007); tolerance to *Colletotrichum lindemuthianum* (Espinosa-Huerta *et al.*, 2013); tolerance to water stress (Cadena-Hernández *et al.*, 2019); and cisgenic lectin rhizosecretion in *P. acutifolius* (Martínez-Alarcón *et al.*, 2019), among the most relevant.

The common bean cultivar Flor de Mayo Anita (FMA) was genetically modified with the defensin *pdf1.2* from *Arabidopsis thaliana*. Five lines of FMA-*pdf1.2* were previously evaluated and were resistant to *C. lindemuthianum*, unlike the non-transformed isolate (Espinosa-Huerta *et al.*, 2013). The *pdf1.2* gene encodes a defensin from *Arabidopsis thaliana*. It has a high homology (> 85 %) with genes encoding antifungal proteins and acts at the site of infection or in remote, non-inoculated regions of the tissue. Defensins have a four-stage action mechanism: the electrostatic attraction between the cationic peptide and the anionic membrane of the microorganism; the insertion of the peptide in the membrane of the pathogen; the permeabilization of the membrane through pore formation and cell lysis; and finally, the induction of Ca^{+2} influx and K^{+} efflux when they adhere to fungal hyphae (Iqbal *et al.*, 2019; Espinosa-Huerta *et al.*, 2019).

Based on the fact that the *pdf1.2* defensin gene can provide protection against pathogenic fungi, the objective of this work was to evaluate five independent lines of FMA-*pdf1.2* common beans, which had initially been characterized by their resistance to anthracnose; in order to establish the resistance (minor damage to the plant and arrival at the flowering stage) or tolerance (damage by the disease and a decrease in the flowering potential) to the development of the infection by the *F. oxysporum* and *F. lateritium* pathogenic fungi, which cause root rot. Then, the broad-spectrum protection of this biotechnological model can be defined, for the control of various species of pathogenic fungi that affect common beans with economically important effects.

MATERIALS AND METHODS

Plant material

Five homozygous lines (FMA-*pdf1.2* L2, L3, L4, L7, and L9) of three generations of the cultivar Flor de

MATERIALES Y MÉTODOS

Material Vegetal

Cinco líneas homocigotas (FMA-*pdf1.2* L2, L3, L4, L7 y L9) del cultivar Flor de Mayo Anita (FMA) (Castellanos *et al.*, 2003), transformadas genéticamente con el gen de defensiva *35Sprom:pdf1.2*, se caracterizaron genotípica y fenotípicamente (tolerancia a *Colletotrichum lindemuthianum*) en tres generaciones (Espinosa-Huerta *et al.*, 2013), como parte de la identificación de las principales características de este modelo biotecnológico en desarrollo. Estas mismas líneas se usaron en este estudio (T4) para desarrollar el bioensayo con hongos patógenos causantes de pudrición de la raíz.

Caracterización y obtención de aislados fúngicos de *Fusarium oxysporum* y *F. lateritium*

Fusarium oxysporum se obtuvo mediante muestreo de suelo en una parcela cultivada con maíz y frijol en el ciclo primavera-verano 2013, en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Celaya, Guanajuato (20° 34' 33.44" N, 100° 4' 19.24" W, altitud 1775 m). Sánchez-García *et al.* (2017) describieron el método de muestreo, el procesamiento de las muestras, la purificación, identificación, caracterización del tipo y nivel de patogenicidad, así como la conservación de las cepas patogénicas de *F. oxysporum*. El patógeno *F. lateritium* se obtuvo mediante muestreo realizado en 17 campos cultivados con frijol, en el estado de Guanajuato (Montiel-González *et al.*, 2005).

Inoculación de plantas de frijol con *Fusarium oxysporum* y *F. lateritium*

De cada línea de frijol FMA-*pdf1.2* así como de los cultivares FMA y Montcalm no modificados genéticamente, se utilizaron 25 semillas para el bioensayo. Las semillas se desinfectaron superficialmente con hipoclorito de sodio al 5 %, seguido de tres enjuagues con agua destilada estéril y se sembraron en charolas germinadoras con 50 cavidades, llenas con vermiculita esterilizada y humedecida con agua de grifo, donde se colocó una semilla por cavidad. Cada semilla se cubrió con 1 cm de vermiculita y se incubaron en invernadero a una temperatura entre 15 y 32 °C, y una incidencia de luminosidad provista por la luz solar a través del techo de cristal en invernadero. Una vez que las plántulas tuvieron las hojas cotiledonares completamente abiertas, en aproximadamente 10 d,

Mayo Anita (FMA) (Castellanos *et al.*, 2003), genéticamente transformada con el gen de defensiva *35Sprom:pdf1.2*, se genotípicamente y fenotípicamente caracterizó (tolerancia a *Colletotrichum lindemuthianum*) (Espinosa-Huerta *et al.*, 2013), como parte de la identificación de las principales características de este modelo biotecnológico en desarrollo. Estas mismas líneas se usaron en este estudio (T4) para desarrollar el bioensayo con hongos patógenos que causan pudrición de la raíz.

Caracterización y colección de aislados fúngicos de *Fusarium oxysporum* y *F. lateritium*

Muestras de *Fusarium oxysporum* se recolectaron del suelo de un cultivo de maíz y frijol común, durante el ciclo primavera-verano 2013, en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Celaya, Guanajuato (20° 34' 33.44" N, 100° 4' 19.24" W, altitud 1775 m). Sánchez-García *et al.* (2017) describieron el método de muestreo, el procesamiento de las muestras, la purificación y identificación, caracterización del tipo, y nivel de patogenicidad, así como la conservación de las cepas patogénicas de *F. oxysporum*. El patógeno *F. lateritium* se obtuvo mediante muestreo realizado en 17 campos cultivados con frijol, en el estado de Guanajuato (Montiel-González *et al.*, 2005).

Inoculación de plantas de frijol con *Fusarium oxysporum* y *F. lateritium*

De cada línea de frijol FMA-*pdf1.2* así como de los cultivares FMA y Montcalm no modificados genéticamente, se utilizaron 25 semillas para el bioensayo. Las semillas se desinfectaron superficialmente con hipoclorito de sodio al 5 %, seguido de tres enjuagues con agua destilada estéril y se sembraron en charolas germinadoras con 50 cavidades, llenas con vermiculita esterilizada y humedecida con agua de grifo, donde se colocó una semilla por cavidad. Cada semilla se cubrió con 1 cm de vermiculita y se incubaron en invernadero a una temperatura entre 15 y 32 °C, y una incidencia de luminosidad provista por la luz solar a través del techo de cristal en invernadero. Una vez que las plántulas tuvieron las hojas cotiledonares completamente abiertas, en aproximadamente 10 d,

Una vez que las plántulas tuvieron las hojas cotiledonares completamente abiertas, en aproximadamente 10 d, se les realizó el bioensayo. Las plántulas se sembraron en charolas germinadoras con 50 cavidades, llenas con vermiculita esterilizada y humedecida con agua de grifo, donde se colocó una semilla por cavidad. Cada semilla se cubrió con 1 cm de vermiculita y se incubaron en invernadero a una temperatura entre 15 y 32 °C, y una incidencia de luminosidad provista por la luz solar a través del techo de cristal en invernadero. Una vez que las plántulas tuvieron las hojas cotiledonares completamente abiertas, en aproximadamente 10 d,

se extrajeron cuidadosamente de la charola y el sistema radicular de las plantas se cortó en una tercera parte. Las raíces de la plántula se sumergieron en una concentración de 2×10^5 conidios mL^{-1} de *F. oxysporum* durante 5 min; posteriormente, se transfirieron a macetas de unilcel de 1 L de capacidad con sustrato Sunshine Mix® No. 6 esterilizado. Las plantas se fertilizaron cada semana con 3 g de urea por maceta. Los tratamientos control consistieron de plantas FMA y Montcalm inoculadas o bien, sumergidas en agua destilada estéril por 5 min y cultivadas en el mismo sustrato Sunshine Mix® No. 6.

Con el objeto de someter a las líneas de frijol a una alta presión patogénica y al mismo tiempo, distinguir el daño ocasionado por cada especie de *Fusarium* en infecciones sucesivas, se realizaron dos inoculaciones en la misma planta. Veintinueve días posteriores a la inoculación con *F. oxysporum*, tiempo estipulado para definir el potencial de una planta ante el ataque de patógenos de la raíz, las plantas se evaluaron de acuerdo con la severidad del daño (ver más adelante), y luego se inocularon con *F. lateritium* (cepa Fla-21), con un volumen de 50 mL de inóculo en concentración de 2.5×10^5 conidios mL^{-1} en la base del hipocotilo. Las plantas no modificadas también fueron inoculadas o bien, se agregaron 50 mL de agua destilada (control absoluto). Las plantas se mantuvieron bajo las mismas condiciones de germinación y se evaluaron 21 días posteriores a su inoculación. Finalmente, las plantas sobrevivientes fueron mantenidas hasta su madurez fisiológica y colecta de semilla T5.

Evaluación del daño ocasionado por los patógenos de raíz en plantas de frijol

La evaluación fue de tipo semi cuantitativa de acuerdo a la escala de Van Schoonhoven y Pastor-Corrales (1987), donde se evaluó la severidad del daño en hipocotilo y tejido de raíz con lesiones, como sigue: 1 = Sin síntomas visibles de la enfermedad (0 %); 3 = Decoloración ligera, sin lesiones necróticas o con un 10 % del hipocotilo y de la raíz cubiertos con lesiones; 5 = Aproximadamente 25 % de los tejidos del hipocotilo y de la raíz están cubiertos por lesiones, con decoloración fuerte, aunque los tejidos se conserven firmes; 7 = Aproximadamente 50 % de los tejidos del hipocotilo y de la raíz están cubiertos con lesiones que se combinan con ablandamiento, pudrición y considerable reducción del sistema radical; 9 = Aproximadamente 75 % o más de los tejidos del hipocotilo y de la raíz están afectados por estados avanzados

for 5 minutes; subsequently, they were transferred to 1-L Styrofoam pots with sterilized Sunshine Mix® No. 6 substrate. The plants were fertilized every week with 3 g of urea per pot. Control treatments consisted of FMA and Montcalm plants, either inoculated or submerged in sterile distilled water for 5 min and grown in the same substrate Sunshine Mix® No. 6.

In order to subject common bean lines to high pathogen pressure, while simultaneously distinguishing the damage caused by each *Fusarium* species in successive infections, two inoculations were performed on the same plant. Twenty-one days after inoculation with *F. oxysporum*, the time stipulated to define the potential of a plant against a root pathogen attack, the plants were evaluated according to the severity of the damage; then inoculated with 50-mL of *F. lateritium* (strain Fla-21) inoculum, with a 2.5×10^5 conidia mL^{-1} concentration at the base of the hypocotyl. Some non-modified plants were also inoculated, while others received 50 mL of distilled water (absolute control). The plants were maintained under the same germination conditions and were evaluated 21 d after inoculation. Finally, the surviving plants were maintained until they reached physiological maturity and T5 seed collection.

Evaluation of the damage caused by root pathogens to common bean plants

A semiquantitative evaluation was performed according to the Van Schoonhoven and Pastor-Corrales scale (1987). The severity of the damage to the hypocotyl and root tissue with lesions was evaluated as follows: 1 = No visible symptoms of the disease (0 %); 3 = Slight discoloration, without necrotic lesions or with 10 % of the hypocotyl and root covered with lesions; 5 = Approximately 25 % of the hypocotyl and root tissues are covered with lesions, with severe discoloration, although the tissues remain firm; 7 = Approximately 50 % of the hypocotyl and root tissues are covered with lesions that are combined with softening, rotting, and considerable reduction of the root system; 9 = Approximately 75 % or more of the hypocotyl and root tissues are affected by advanced rotting stages, in combination with a severe reduction of the root system. The severity values of hypocotyl and root tissue with lesions are interpreted as follows: 1 to 3 as resistant (the plant completely overcame and reached the flowering stage); 4 to 6 as tolerant (the plant resisted the effects

de pudrición, en combinación con una severa reducción del sistema radical. Tejido de hipocotilo y raíz con lesiones donde se interpretan valores de severidad de 1 a 3, la planta es resistente (la planta se sobrepuso completamente y llegó a la etapa de floración), de 4 a 6 como tolerante (la planta sostuvo los efectos de la enfermedad sin perecer, pero vio mermada su potencial de floración en hasta 50 %) y de 7 a 9 como susceptible (la planta pereció en el bioensayo de inoculación sin llegar a la etapa de floración).

Análisis de expresión del gen *pdf1.2*

El ARN celular total se extrajo del tejido de las hojas de al menos cinco plantas por línea en tres repeticiones después de su inoculación con *F. oxysporum*; empleando el método con Trizol® (Reagent, Carisbald, CA, USA) de acuerdo con las instrucciones del fabricante. La primera cadena de ADNc se sintetizó por RT-PCR con One-Step RT-PCR Master Mix de Applied Biosystems (Catálogo N° 4309169). El sistema TaqMan® consistió de los iniciadores y la sonda los cuales se diseñaron utilizando el programa Primer Express v2.0 (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA) a partir de la secuencia del gen *pdf1.2* (NCBI, NM_123809).

Los iniciadores específicos y sondas para detectar el gen *pdf1.2* fueron: sentido 5'-AGT TGT GCG AGA AGC CAA GT-3', antisentido 3'-GCA TGC ATT ACT GTT TCC GCA AA-5' y la sonda TaqMan® 5'-CCC TGA CCA TGT CCC -3' con una etiqueta colorante FAM™ y el enlazante al surco menor (MGB) en el extremo 5', y el colorante desactivador de fluorescencia (NFQ) en el extremo 3'. El control interno 18S ribosomal (4319413E, Applied Biosystem) se marcó con el fluoróforo VIC. Las condiciones de amplificación consistieron en 48 °C por 30 min (transcripción inversa), 95 °C por 10 min (desnaturalización), 45 ciclos (amplificación por PCR), 95 °C por 15 s y 60 °C por 1 min (extensión) (ABI PRISM®, Sistemas de detección de secuencias 7000, Applied Biosystems). La proporción de la expresión relativa se calculó por medio de la normalización del ciclo umbral (Ct) del gen objetivo (*pdf1.2*) con referencia al Ct del gen control (*18S*) para obtener sólo la eficiencia del gen defensina ($\Delta Ct = Ct\ pdf1.2 - Ct18Sr$) (Basu *et al.*, 2019).

Diseño Experimental

El diseño experimental fue completamente aleatorizado, donde se analizaron dos microorganismos patógenos en

of the disease without dying, but its flowering potential was reduced by up to 50 %); and 7 to 9 as susceptible (the plant perished in the inoculation bioassay without reaching the flowering stage).

Expression analysis of the *pdf1.2* gene

Total cellular RNA was extracted from the leaf tissue of at least five plants per line in three replicates after inoculation with *F. oxysporum*, using the method with Trizol® (Reagent, Carisbald, CA, USA) according to the manufacturer's instructions. First cDNA strand was synthesized by RT-PCR with One-Step RT-PCR Master Mix from Applied Biosystems (Catalog No. 4309169). The TaqMan® system consisted of the primers and the probe which were designed using the Primer Express v2.0 program (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA), based on the *pdf1.2* gene sequence (NCBI, NM_123809).

Specific primers and probes used to detect the *pdf1.2* gene were: sense 5'-AGT TGT GCG AGA AGC CAA GT-3', antisense 3'-GCA TGC ATT ACT GTT TCC GCA AA-5', and the TaqMan® probe 5'-CCC TGA CCA TGT CCC -3', with a FAM™ dye label and minor groove binder (MGB) at the 5' end, and nonfluorescent quencher (NFQ) at the 3' end. The 18S ribosomal internal control (4319413E, Applied Biosystem) was labelled with the VIC-fluorophore. Amplification conditions consisted of 48 °C for 30 min (reverse transcription), 95 °C for 10 min (denaturation), 45 cycles (PCR amplification), 95 °C for 15 s, and 60 °C for 1 min (extension) (ABI PRISM®, Sequence Detection Systems 7000, Applied Biosystems). The relative expression ratio was calculated normalizing the cycle threshold (Ct) of the target gene (*pdf1.2*), with reference to the Ct of the control gene (*18S*), in order to determine only the efficiency of the defensin gene ($\Delta Ct = Ct\ pdf1.2 - Ct18Sr$) (Basu *et al.*, 2019).

Experimental design

The experimental design was completely randomized. Two pathogenic microorganisms were analyzed in each of the *pdf1.2*-genetically-modified common bean lines, as well as its non-modified FMA comparator and the Montcalm cultivar, as a pathogenicity control. Each homozygous line consisted of 25 plants. The experimental unit was a pot with a plant. The statistical analysis consisted of an analysis of variance of the severity values and comparison of means through the

cada una de las líneas de frijol modificado genéticamente con el gen *pdf1.2*, su comparador FMA no modificado y el cultivar Montcalm, como testigo de patogenicidad. Cada línea homocigota consistió de 25 plantas. La unidad experimental fue una maceta con una planta. El análisis estadístico consistió de un análisis de varianza de los valores de severidad y comparación de medias a través de la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), con el paquete estadístico Minitab 17 (Minitab Statistical Software).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los niveles de daño se identificaron dentro de la población de plantas FMA y Montcalm no modificadas e inoculadas con *F. oxysporum* o *F. lateritium* con la concentración evaluada, para estandarizar la evaluación de las poblaciones de líneas inoculadas. Así, se estableció la gama completa de daño semi cuantitativo a través de los 21 días de incubación y se validó la escala en el modelo de evaluación de este estudio (Figura 1). Sánchez-García *et al.* (2017) utilizaron este sistema de evaluación con *F. oxysporum*, y se determinó que las plantas de frijol cv. Montcalm inoculadas con esta cepa fueron susceptibles, lo cual confirmó lo observado en este estudio.

Tukey test ($p \leq 0.05$), using the Minitab 17 statistical package (Minitab Statistical Software).

RESULTS AND DISCUSSION

Damage levels within the population of unmodified FMA and Montcalm plants inoculated with the evaluated concentrations of *F. oxysporum* or *F. lateritium* were identified, in order to standardize the evaluation of the populations of inoculated lines. Thus, the complete range of semiquantitative damage was determined throughout the 21 d of incubation and the scale was validated for the evaluation model used in this study (Figure 1). Sánchez-García *et al.* (2017) evaluated *F. oxysporum* using this system and determined that common bean plants cv. Montcalm inoculated with this strain were susceptible, which confirmed our observations.

Inoculation of common bean plants with *Fusarium oxysporum* and *F. lateritium*

The damage caused by *F. oxysporum* to the plants of the FMA-*pdf1.2* lines, 21 d after their inoculation, indicated that the L3, L4, and L9 lines stood out for having an average damage of 3.4



Figura 1. Niveles de severidad ocasionado por *Fusarium oxysporum* y *F. lateritium* en plantas de frijol inoculado. A: sin daño (1); B: 10 % del hipocotilo y raíz con lesiones y coloración (3); C: 25 % del hipocotilo y raíz con lesiones y pérdida de masa radicular (5); D: 50 % del hipocotilo y raíz con pudrición y reducción de masa radicular (7); E: Más del 75 % del tejido con pudrición y pérdida de tejido radicular (9).

Figure 1. Severity levels caused by *Fusarium oxysporum* and *F. lateritium* in inoculated common bean plants. A: no damage (1); B: 10 % of the hypocotyl and root with lesions and coloration (3); C: 25 % of the hypocotyl and root with lesions and loss of root mass (5); D: 50 % of the hypocotyl and root with rotting and reduced root mass (7); E: more than 75 % of the tissue with rot and loss of root tissue (9).

Inoculación de plantas de frijol con *Fusarium oxysporum* y *F. lateritium*

El daño ocasionado por *F. oxysporum* a las plantas de las líneas FMA-*pdf1.2*, 21 días posteriores a su inoculación, indicó que las líneas L3, L4 y L9 destacaron por tener un daño promedio de 3.4, equivalente al 10 % de la superficie con daño o lesión, lo que de acuerdo con la escala de evaluación están ubicadas en el límite superior de plantas resistentes. Las líneas L2 y L7 mostraron un valor de severidad de 4, correspondiente a entre 10 y 25 % de la superficie de hipocotilo y raíz cubiertos por lesiones, mientras que las plantas control FMA y Montcalm mostraron un promedio de severidad de 5, consideradas como moderadamente susceptibles (Figura 2). Este primer bloque de inoculación indica un diferencial cuantitativo en el daño ocasionado por *F. oxysporum* a las líneas FMA-*pdf1.2*; sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas entre líneas, lo cual establece homogeneidad en la respuesta derivada de la expresión del gen *pdf1.2* con altos niveles de inóculo en raíz. Por el contrario, se observó una diferencia significativa entre la población de líneas y las plantas control de FMA y Montcalm (Figura 2).

El análisis de las poblaciones de plantas, 21 días después de su inoculación con *F. lateritium* (42 días posteriores a la inoculación con *F. oxysporum*) indicó que todas las líneas FMA-*pdf1.2* alcanzaron valores de daño de 4.8 a 5.2, equivalente al 25 %

(equivalente a 10 % de la superficie con daño o lesión); according to the evaluation scale they are located among the most resistant plants. The L2 and L7 lines showed a severity value of 4 (10 - 25 % of the hypocotyl and root surface covered by lesions), while the FMA and Montcalm control plants showed an average severity of 5 and were considered moderately susceptible (Figure 2). This first inoculation block indicates a quantitative differential in the damage caused by *F. oxysporum* to the FMA-*pdf1.2* lines; however, these differences were not statistically significant between lines, which establishes homogeneity in the response derived from the expression of the *pdf1.2* gene with high levels of root inoculum. On the contrary, a significant difference was observed between the lines population and the control plants of FMA and Montcalm (Figure 2).

Analysis of plant populations 21 d after inoculation with *F. lateritium* (42 d after inoculation with *F. oxysporum*) indicated that all FMA-*pdf1.2* lines reached 4.8-5.2 damage values, equivalent to 25 % of the hypocotyl and root surface covered by lesions and with noticeable discoloration. This indicates that, although the L2 and L7 lines showed a lower quantitative level of *pdf1.2* expression and had moderate susceptibility values to *F. oxysporum*. The increase in damage observed, after *F. lateritium* inoculation, was not significant and the plants kept their degree of tolerance.

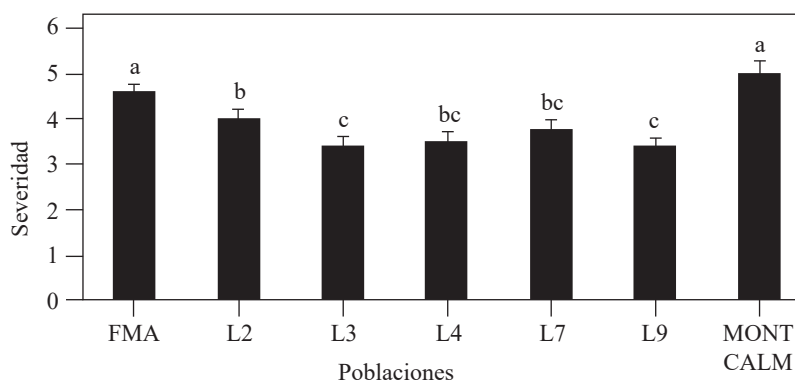


Figura 2. Grado de severidad de pudrición de raíz inducida por *Fusarium oxysporum* en plantas de frijol, 21 días posteriores a su inoculación (Medias con distinta letra en son estadísticamente diferentes, Tukey, $p \leq 0.05$). Las barras representan el error estándar.

Figure 2. Degree of severity of root rot induced by *Fusarium oxysporum* in common bean plants, 21 d after inoculation (Means with different letters in a row are statistically different, Tukey, $p \leq 0.05$). The bars represent the standard error.

de la superficie de hipocotilo y raíz cubiertos por lesiones y con fuerte decoloración. Esto indica que, si bien, las líneas L2 y L7 mostraron cuantitativamente menor nivel de expresión de *pdf1.2*, y además, ya mostraban valores de susceptibilidad moderada a *F. oxysporum*; el incremento de daño observado, posterior a la inoculación con *F. lateritium*, no fue significativo y conservaron el grado de plantas tolerantes. Por su parte, las líneas L3, L4 y L9 con valores de severidad 3 a *F. oxysporum*; incrementaron los niveles de severidad de 4.8 a 5.3 al ser inoculadas con *F. lateritium*, valor considerado dentro del espectro de tolerancia (Figura 3). Lo anterior, establece que las plantas de las poblaciones FMA-*pdf1.2*, alcanzaron el umbral máximo de tolerancia en razón de los niveles de expresión del gen defensina. Finalmente, las poblaciones de las plantas control FMA y Montcalm, superaron en daño a las líneas FMA-*pdf1.2*, con valores de daño entre 6 y 7 es decir, aproximadamente 50 % del tejido de hipocótilos y raíces fueron cubiertos de lesiones que se combinaron con ablandamiento, pudrición y considerable reducción del sistema radical, a los 21 días después de la inoculación con *F. lateritium* (Figuras 3 y 4).

Si bien la respuesta de las plantas de las líneas FMA-*pdf1.2* pudiera considerarse moderada en términos de tolerancia, abre la discusión acerca de las causas de esta diferencia en contraste con las plantas control y la posible señalización de otras proteínas de resistencia inducidas. Por un lado, la

Meanwhile, the severity levels of the L3, L4, and L9 lines with a *F. oxysporum* severity value of 3 increased from 4.8 to 5.3 when they were inoculated with *F. lateritium*, a value considered within the tolerance spectrum (Figure 3). Therefore, the FMA-*pdf1.2* population plants reached the maximum tolerance threshold, as a consequence of the expression levels of the defensin gene. Finally, the damage to the FMA and Montcalm control plants exceeded the FMA-*pdf1.2* lines, with 6-7 damage values: *i.e.*, 21 d after inoculation with *F. lateritium*, approximately 50 % of the hypocotyl and root tissue was covered with lesions that were combined with softening, rotting, and considerable reduction of the root system (Figures 3 and 4).

Although the response of the plants of the FMA-*pdf1.2* lines can be considered moderate in terms of tolerance, it opens the discussion about the causes of this difference in contrast to the control plants and the possible signaling of other induced resistance proteins. On the one hand, the reduction in the severity of the damage in the plants of the FMA-*pdf1.2* lines is probably related to the activity of the PDF1.2 antimicrobial peptide which directly affects *Fusarium* spp., since the unmodified plants (FMA and Montcalm) showed signs of more severe damage than the FMA-*pdf1.2* plants.

Other recombinant defensin models have had similar responses. From moderate protection, such as the MsDef1 defensin of *Medicago truncatula*, which provided tolerance to tobacco leaves

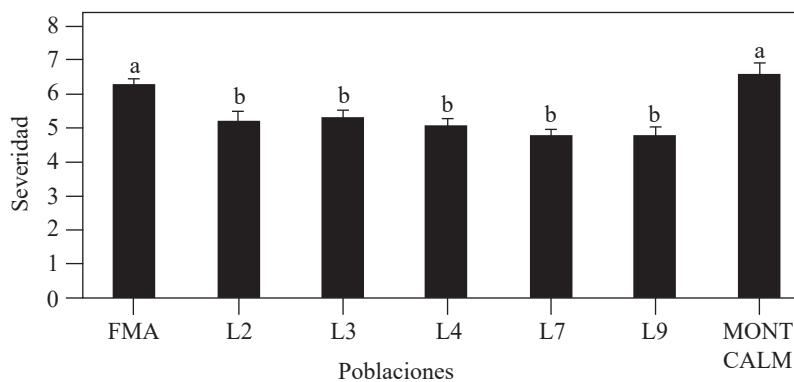


Figura 3. Grado de severidad de pudrición de raíz inducida por *Fusarium lateritium* en plantas de frijol, 21 días posteriores a su inoculación (Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes, Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 3. Degree of root rot severity induced by *Fusarium lateritium* in common bean plants, 21 d after inoculation (Means with different letters in a row are statistically different, Tukey, $p \leq 0.05$).



Figura 4. Análisis de daño en plantas de frijol 21 días después de su inoculación con *Fusarium lateritium*. A: FMA no inoculado (vermiculita); B: FMA inoculado; C: Montcalm (testigo susceptible) inoculado; D: Izquierda: FMA-*pdf1.2*-L9 inoculado (severidad 3), derecha FMA inoculado (severidad 7).

Figure 4. Analysis of damage to common bean plants, 21 d after inoculation with *Fusarium lateritium*. A: non-inoculated FMA (vermiculite); B: inoculated FMA; C: Inoculated Montcalm (susceptible control); D: to the left: inoculated FMA-*pdf1.2*-L9 (severity 3); to the right: inoculated FMA (severity 7).

reducción en la severidad del daño en las plantas de líneas FMA-*pdf1.2* está probablemente relacionada con la actividad del péptido antimicrobiano PDF1.2, directamente contra *Fusarium* spp. ya que las plantas no modificadas (FMA y Montcalm), mostraron señales de daño más severo que en las plantas FMA-*pdf1.2*. Otros modelos de defensina recombinante han mostrado respuestas similares, desde una protección moderada como la defensina MsDef1 de *Medicago truncatula* la cual proporcionó tolerancia a la invasión por *Aspergillus niger* y *Rhizoctonia solani* en hojas de tabaco inoculadas con 0.3×10^6 esporas mL^{-1} de medio salino para ambos hongos patógenos (Deb *et al.*, 2020); hasta un nivel de protección más robusto en cebada (*Hordeum vulgare* L.) proporcionado por la defensina de alubia (*Phaseolus lunatus*), inhibiendo la pérdida de clorofila en follaje 15 días después de haber sido

inoculadas con 0.3×10^6 esporas mL^{-1} de medio salino para ambos hongos patógenos (Deb *et al.*, 2020). Up to more robust level of protection, provided by the bean (*Phaseolus lunatus*) defensin to barley (*Hordeum vulgare* L.), inhibiting chlorophyll loss in foliage, 15 d after being sprayed with *Fusarium oxysporum* (OD = 0.7 in LB liquid medium) (Rehorova *et al.*, 2018).

Breeding crops resistant to various diseases is difficult due to the absence of sources of resistance in the genomes, as is the case of common beans. Previously, our group demonstrated the resistance of the FMA-*pdf1.2* lines to anthracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) (Espinosa-Huerta *et al.*, 2013) which, together with the results of this report, provides evidence of broad-spectrum protection against fungal pathogens in

asperjado con *Fusarium oxysporum* (OD = 0.7 en medio líquido LB) (Rehorova *et al.*, 2018).

Realizar mejoramiento de cultivos para resistencia a varias enfermedades conlleva mayor grado de dificultad derivado de la ausencia de fuentes de resistencia en los genomas, como es el caso de frijol. Previamente, nuestro grupo demostró la resistencia de las líneas FMA-*pdf1.2* a antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*) (Espinosa-Huerta *et al.*, 2013) lo cual con los resultados de este reporte, proporciona indicios de protección de amplio espectro a hongos patógenos en un sistema de expresión constitutiva. En este sentido Su *et al.* (2020) reportaron resultados similares de protección en trigo (*Triticum aestivum* L.) con la defensina DmAMP1W de dalia (*Dahlia merckii*). Los autores pudieron demostrar un aumento significativo de resistencia de amplio espectro a pudrición de raíz común (*Bipolaris sorokiniana*) y mancha ocular (*Rhizoctonia cerealis*) en las generaciones T1 y T2. La condición de amplio espectro y resistencia estable hace que la introducción de péptidos antimicrobianos como la defensina *pdf1.2* sea un buen candidato para incluirlos en programas de mejoramiento. Hasta ahora, este es el primer reporte en el que se consolida la expresión y protección de frijol a varias especies de hongos patógenos por un péptido antimicrobiano.

Otra posible causa por la que las líneas FMA-*pdf1.2* mostraron diferencias significativas en la severidad de pudrición de raíz con respecto a las plantas control puede incluir la inducción de otros péptidos antimicrobianos. Se ha reportado que la expresión de un péptido antimicrobiano puede inducir la expresión de otros, ya sea por infección, o por compuestos químicos como metil jasmonato, nitrato de plata, entre otros. El gen defensina de chile (*J1-1*) expresado en tabaco, no solo mostró supresión a pudrición de raíz ocasionada por *Phytophthora parasitica* var. *nicotianae* y *Pythium aphanidermatum* sino que también indujo la expresión de genes *PR*, los cuales proporcionaron efectos sinérgicos con la defensina (Lee *et al.*, 2018). En el caso de *pdf1.2* la coexpresión de algunas proteínas de defensa ejercen un efecto aditivo en la respuesta inmune estimulando de manera constitutiva las rutas de defensa aun antes de la invasión del

a constitutive expression system. Su *et al.* (2020) reported similar protection results in wheat (*Triticum aestivum* L.) using the DmAMP1W defensin from dahlia (*Dahlia merckii*). The authors were able to demonstrate a significant increase in broad-spectrum resistance to common root rot (*Bipolaris sorokiniana*) and eyespot (*Rhizoctonia cerealis*) in the T1 and T2 generations. Their broad-spectrum and stable resistance condition makes antimicrobial peptides, such as defensin *pdf1.2*, good candidates for inclusion in plant breeding programs. This is, to our knowledge, the first report consolidating the expression and protection of common beans against several species of pathogenic fungi through an antimicrobial peptide. Another possible cause that explains why the FMA-*pdf1.2* lines showed significant differences in the severity of root rot compared to control plants may include the induction of other antimicrobial peptides. It has been reported that the expression of one antimicrobial peptide can induce the expression of others, either by infection or by chemical compounds such as methyl jasmonate, silver nitrate, etc. The chili defensin gene (*J1-1*) expressed in tobacco not only suppressed root rot caused by *Phytophthora parasitica* var. *nicotianae* and *Pythium aphanidermatum*. But also induced the expression of *PR* genes, which had synergistic effects with defensin (Lee *et al.*, 2018). In the case of *pdf1.2*, the co-expression of some defense proteins exerts an additive effect on the immune response, constitutively stimulating the defense pathways even before the invasion of the pathogen takes place (Swaminathan *et al.*, 2021). It is highly possible that several genes associated with resistance proteins in the FMA-*pdf1.2* lines are constitutively active and influence the timely defense response to pathogen attacks. Kashyap *et al.* (2019) corroborated this fact; they reported that the difference between susceptible and resistant wheat genotypes is subject to the duration and magnitude of expression of *pdf1.2*, *PR1*, and *PR5*. In this study, two types of simultaneous response were observed in the control of *Fusarium* spp. in FMA-*pdf1.2* plants. On the one hand, regarding the reduction of the signs of infection, the FMA-*pdf1.2* lines showed less severity in the incidence of *F.*

patógeno (Swaminathan *et al.*, 2021), en este sentido, es altamente posible que varios genes asociados a proteínas de resistencia en las líneas FMA-*pdf1.2* se encuentren constitutivamente activas e influyan en la respuesta oportuna de defensa al ataque del patógeno. Lo anterior es corroborado por Kashyap *et al.* (2019) quienes reportan que la diferencia entre genotipos de trigo susceptibles y resistentes está supeditado a los duración y la magnitud de expresión de *pdf1.2*, *PR1* y *PR5*.

En este estudio se observaron dos tipos de respuesta simultánea en el control de *Fusarium* spp. en plantas FMA-*pdf1.2*. Por un lado, la reducción de los signos asociados a la infección, las líneas FMA-*pdf1.2* mostraron menor severidad en la incidencia de *F. oxysporum* y *F. lateritium*; y por otro, el aplazamiento en la aparición de los mismos con respecto a los observado en las plantas control (FMA y Montcalm) posterior a la inoculación. La mayoría de las plantas tolerantes llegaron a su madurez fisiológica en condiciones de invernadero; sin embargo, los datos de rendimiento no fueron considerados por no ser representativos bajo condiciones de confinamiento.

El retraso en la aparición de signos y reducción de daño, también se reportó en el análisis de transcriptoma de tomate con el locus de resistencia al virus TSWV (*Sw-7*) donde se encontró la participación de *PR-5* a través de su sobreexpresión, lo cual confirió aumento de resistencia y retraso en la acumulación del virus y expresión de síntomas (Padmanabhan *et al.*, 2019). De manera similar, plantas de olivo (*Olea europaea* L.) transformadas con el gen *NPR1* e inoculadas con *Rosellinia necatrix* mostraron un ligero retraso en el desarrollo de la enfermedad con una media bajo la curva de desarrollo de la enfermedad de 7–15 % menor que el control (Narváez *et al.*, 2020).

Lo anterior tiene especial relevancia porque este modelo biotecnológico no conlleva la aplicación de control químico como es el caso de fungicidas y con ello, elimina la contaminación ambiental y la reducción de la diversidad biológica microbiana, así como la afectación a la microbiota antagonista, como lo reportó Granados-Vallejo *et al.* (2019), quienes concluyen que la presencia de defensina no representa un factor de riesgo contra

oxysporum and *F. lateritium*; and on the other hand, there was a delay in their appearance compared to the control plants (FMA and Montcalm). Most of the tolerant plants reached physiological maturity under greenhouse conditions; however, yield data under confinement conditions were not considered because they were not considered representative.

The delay in the appearance of signs and reduction of damage was also reported in the tomato transcriptome analysis with the locus of resistance to the TSWV virus (*Sw-7*). The participation of *PR-5* was found through its overexpression, which conferred increased resistance and delayed virus accumulation and the expression of symptoms (Padmanabhan *et al.*, 2019). Similarly, olive (*Olea europaea* L.) plants transformed with the *NPR1* gene and inoculated with *Rosellinia necatrix* showed a slight delay in disease development, with a means under the disease development curve, 7 – 15 % lower than the control (Narváez *et al.*, 2020).

The foregoing is especially relevant because, unlike fungicides, this biotechnological model does not entail the application of chemical controls; thereby eliminating environmental pollution and preventing reduction in micro-biological diversity. Neither does it has an impact on the antagonistic microbiota, as reported by Granados-Vallejo *et al.* (2019), who concluded that the presence of defensin did not pose a risk factor against microorganisms that did not invade the inter and intracellular space of modified plants, nor against microorganisms not included in the action spectrum of *pdf1.2*. These microorganisms include *Trichoderma harzianum* (pathogen antagonist fungus), *Rhizobium tropici* (nitrogen-fixing bacteria), and *Rhizophagus intraradices* (mycorrhizal fungus).

Relative expression of the *pdf1.2* gene from inoculated common bean plants

The common bean plants of the FMA-*pdf1.2* lines showed differential values of relative transcriptional expression of the *pdf1.2* gene. The L2 (0.49) and L7 (0.63) lines had lower values than the L3 (0.73), L4 (0.68), and L9 (0.90) lines; however, no statistically significant differences were obtained in the expression values of the five lines (Figure 5). The expression values were contrasted

microorganismos que no invaden el espacio inter e intracelular de las plantas modificadas, o bien contra microorganismos no incluidos en el espectro de acción de *pdf1.2* como *Trichoderma harzianum*, hongo antagonista de patógenos, *Rhizobium tropici*, bacteria fijadora de nitrógeno y *Rhizophagus intraradices*, hongo micorrízico.

Expresión relativa del gen *pdf1.2* de las plantas de frijol inoculadas

Las plantas de frijol de las líneas FMA-*pdf1.2* mostraron valores diferenciales de expresión relativa transcripcional del gen *pdf1.2*. Las líneas L2 (0.49) y L7 (0.63) tuvieron valores menores al resto de las líneas L3 (0.73), L4 (0.68) y L9 (0.90); sin embargo, no se obtuvieron diferencias estadísticas significativas en los valores de expresión entre las cinco líneas (Figura 5). Los valores de expresión se contrastaron con los valores de severidad y se encontró una correlación inversa ($R^2 = -0.93$), las líneas L2 y L7 tuvieron valores de expresión del gen *pdf1.2* menores y valores de severidad superiores a L3, L4 y L9, en la inoculación con *F. oxysporum*.

Para el caso de los valores de daño de *F. lateritium* entre las líneas FMA-*pdf1.2*, se observó que si bien éstos incrementaron con respecto a la primera inoculación (*F. oxysporum*), las lesiones se restringieron y se mantuvieron en valores menores a las plantas control. Resultados similares se observaron en la caracterización de la defensina J1-1 de

with the severity values and an inverse correlation was found ($R^2 = -0.93$). Regarding inoculation with *F. oxysporum*, the L2 and L7 lines had lower *pdf1.2* gene expression values and higher severity values than L3, L4, and L9.

In the case of the damage values caused by *F. lateritium* to the FMA-*pdf1.2* lines, it was observed that, although these increased compared to the first inoculation (*F. oxysporum*), the lesions were restricted and kept at lower values than the control plants. Similar results were observed in the characterization of sweet pepper defensin J1-1, whose gene was overexpressed in ripe pepper fruit. The overexpression of that gene not only provided resistance to *Colletotrichum gloeosporioides*, but it also induced restriction of symptoms and inhibition of fungal colonization (Seo *et al.*, 2014). Therefore, the plants with the lowest level of expression reached the same level of tolerance to pathogens as the plants with the highest level of expression. Consequently, a window of opportunity is seen, where the combination of other root rot control systems, such as the use of antagonistic microorganisms, can provide a synergistic effect and thus a reduction in the effects of the disease (Granados-Vallejo *et al.*, 2019).

CONCLUSIONS

Tolerance to *Fusarium* spp. shown by plants of the FMA-*pdf1.2* lines established that the expression

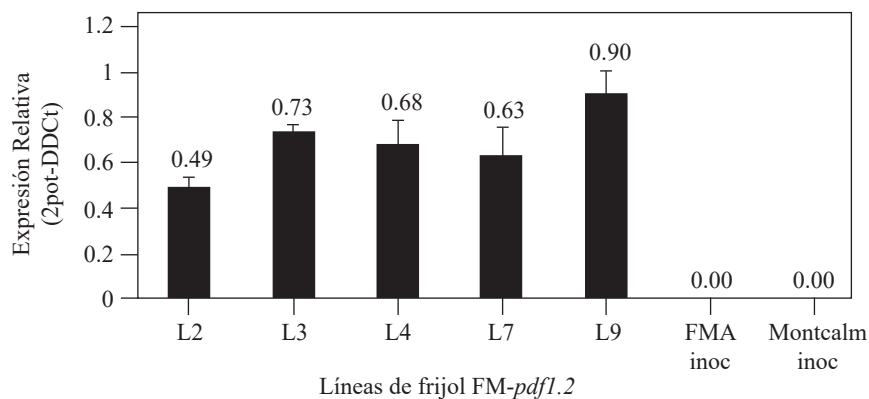


Figura 5. Análisis de la expresión del gen *pdf1.2* mediante PCR Q de plantas de frijol de líneas FMA-*pdf1.2* y plantas control inculadas con *Fusarium oxysporum* y *F. lateritium*.

Figure 5. Analysis of the *pdf1.2* gene expression by Q-PCR of common bean plants from FMA-*pdf1.2* lines and control plants inoculated with *Fusarium oxysporum* and *F. lateritium*.

chile dulce, cuyo gen se sobreexpresó en fruto maduro de chile y se encontró que la sobreexpresión de este gen, no solo proporcionó resistencia a *Colletotrichum gloeosporioides*, sino que también indujo restricción de síntomas e inhibición de la colonización del hongo (Seo *et al.*, 2014).

De lo anterior se establece las plantas con menor nivel de expresión alcanzaron el mismo nivel de tolerancia a los patógenos, que las de mayor nivel de expresión, y se vislumbró una ventana de oportunidad en la que la combinación de otros sistemas de control de pudriciones de raíz, pudieran conceder un efecto sinérgico y con ello una reducción en el efecto de la enfermedad como el empleo de microorganismos antagonistas (Granados-Vallejo *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

La tolerancia a *Fusarium* spp. mostrada por las plantas de las líneas FMA-*pdf1.2* estableció que la expresión del gen defensina proporcionó protección contra patógenos de raíz a las plantas que expresan la proteína. La ventaja que ofrece el gen *pdf1.2* consistió en la reducción de la severidad del daño, así como en una restricción inicial en los síntomas de la enfermedad. El daño ocasionado por *F. lateritium* contribuyó al progreso de la severidad en los tejidos afectados, demostrando que es un patógeno importante del consorcio de las pudriciones de raíz. Los niveles de expresión del gen *pdf1.2* en las diferentes líneas FMA-*pdf1.2*, correlacionaron con el grado de protección en las plantas de las líneas evaluadas y fueron suficientes para la reducción de la incidencia y severidad de la enfermedad ocasionado por *Fusarium* spp. La reducción en la severidad de la pudrición de raíz es una contribución a un sistema agronómico con eficiencia ecológica, derivado de la protección de amplio espectro provista por el gen defensina.

REFERENCIAS

Aragão FJL, Vianna GR, Albino MCM, Rech EL. 2002. Transgenic dry bean tolerant to the herbicide glufosinate ammonium. *Crop Science* 42 (4): 1298–1302. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1298>

Basu S, Pereira AE, Pinheiro DH, Wang H, Valencia-Jiménez A, Siegfried BD, Louis J, Zhou XJ, Vélez AM. 2019. Evaluation of reference genes for real-time quantitative PCR analysis in southern corn

of the defensin gene protected plants through the coded protein against root pathogens. The advantage of the *pdf1.2* gene consisted in the reduction of the severity of the damage, as well as in an initial restriction of the symptoms of the disease. The damage caused by *F. lateritium* contributed to the progress of the severity in the affected tissues, demonstrating that it is a major pathogen in root rot.

The expression levels of the *pdf1.2* gene in the different FMA-*pdf1.2* lines were related to the degree of protection provided to the plants of the evaluated lines and were sufficient to reduce the incidence and severity of the disease caused by *Fusarium* spp. As a result of the broad-spectrum protection provided by the defensin gene, the reduction in the severity of root rot contributes to an ecologically efficient agronomic system.

—End of the English version—



rootworm, *Diabrotica undecimpunctata howardi* (Barber). *Scientific Reports* 9: 10703. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47020-y>

Bonfim K, Faria JC, Nogueira EOP, Mendes EA, Aragão FJL. 2007. RNAi-mediated resistance to bean golden mosaic virus in genetically engineered common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Molecular Plant-Microbe Interactions* 20 (6): 717–726. <https://doi.org/10.1094/MPMI-20-6-0717>

Cadena-Hernández D, Gaxiola-Ariza R, Mora-Avilés MA. 2019. Drought stress tolerance evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Pinto Saltillo modified with *Arabidopsis thaliana* vacuolar pyrophosphatase-1 gene (*avp1*). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10 (6): 1231–1245. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.789>

Castellanos RJZ, Guzmán-Maldonado H, Muñoz-Ramos JJ, Acosta-Gallegos JA. 2003. Flor de Mayo Anita, nueva variedad de frijol para la región central de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26 (3): 209–211.

Deb D, Shrestha A, Sethi L, Das NC, Rai V, Bandhu DA, Bhushan MI, Dey N. 2020. Transgenic tobacco expressing *Medicago sativa* defensin (*Msdef1*) confers resistance to various phyto-pathogens. *Nucleus* 63: 179–190. <https://doi.org/10.1007/s13237-020-00307-2>

DGSV-CNRF. 2020. Podredumbre de raíces por *Fusarium* spp. (Hypocreales: Nectriaceae) en maíz. SADER-SENASICA. Ficha técnica. Dirección General de Sanidad Vegetal-Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria: Tecámac, Estado de México, México.

Eke P, Wakam LN, Fokom R, Ekounda TV, Bedine BM-A, Keumoe R, Fekam BF. 2020. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) root rot in humid lowland:

- Occurrence, and assessment of biotic and agronomic factors for mitigation prospects. *Rhizosphere* 16: 100256, <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100256>.
- Espinosa-Huerta E, Quintero-Jiménez A, Sánchez-García BM, Acosta-Gallegos JA, Mora-Avilés MA. 2013 Resistencia a *Colletotrichum lindemuthianum* en frijol común transgénico, expresando el gen defensina de *Arabidopsis thaliana*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4 (7): 1027–1042.
- Espinosa-Huerta E, Zavaleta-Mejía E, Rojas-Martínez RI, De León-García de Alba C, Gutiérrez-Espinosa MA, Pons-Hernández JL, Mora-Avilés MA. 2019. Evaluación de riesgo ambiental del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) genéticamente modificado con el gen defensina (*pdf1.2*) de *Arabidopsis thaliana* que confiere resistencia a hongos fitopatógenos I. *Agrociencia* 53 (8): 941–956.
- Granados-Vallejo M, Grageda-Cabrera OA, Sánchez-García BM, Mora-Avilés MA. 2019. Efecto de la defensina recombinante (*pdf1.2*) sobre microorganismos benéficos asociados a frijol genéticamente modificado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42 (4): 449-456.
- Iqbal A, Khan RS, Shehryar K, Imran A, Ali F, Attia S, Shah S, Mii M. 2019. Antimicrobial peptides as effective tools for enhanced disease resistance in plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 139 (1): 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01668-6>
- Kashyap PL, Kaur S, Pannu PPS. 2019. Expression analysis of pathogenesis related proteins induced by compatible and incompatible interactions of *Tilletia indica* in wheat plants. *Journal of Mycology and Plant Pathology* 49 (1): 39-47.
- Lee H-H, Kim J-S, Hoang QTN, Kim J-I, Kim YS. 2018. Root-specific expression of defensin in transgenic tobacco results in enhanced resistance against *Phytophthora parasitica* var. *nicotianae*. *European Journal of Plant Pathology* 151: 811-823. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1419-6>
- Martínez-Alarcón D, Mora-Avilés A, Espinoza-Núñez A, Serrano-Jamaina LM, Cruz-Hernández A, Rodríguez-Torres A, Castro-Guillén JL, Blanco-Labra A, García-Gasca T. 2019. Rhizosecretion of cisgenic lectin by genetic manipulation of Tepary bean plants (*Phaseolus acutifolius*). *Journal of Biotechnology* 306S: 100013. <https://doi.org/10.1016/j.btex.2019.100013>
- Montiel-González L, González-Flores F, Sánchez-García BM, Guzmán-Rivera S, Gámez-Vázquez P, Acosta-Gallegos JA, Rodríguez-Guerra R. 2005. Especies de *Fusarium* presentes en raíces de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) con daños de pudriciones, en cinco estados del centro de México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 23 (1): 1–10.
- Narváez I, Pliego-Prieto C, Palomo-Ríos E, Fresta L, Jiménez-Díaz M, Trapero-Casas JL, López-Herrera C, Arjona-López JM, Mercado JA, Pliego-Alfaro F. 2020. Heterologous expression of the *AtNPR1* gene in olive and its effects on fungal tolerance. *Frontiers in Plant Science* 11: 308. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00308>
- Padmanabhan C, Ma Q, Shekasteband R, Stewart KS, Hutton SF, Scott JW, Fei Z, Ling K-S. 2019. Comprehensive transcriptome analysis and functional characterization of PR-5 for its involvement in tomato *Sw-7* resistance to tomato spotted wilt tospovirus. *Scientific Reports* 9: 7673. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44100-x>
- Rehorova K, Viktorova J, Macuchova B, Vlcko T, Stankova L, Jelenova N, Ohnoutkova L, Macek T. 2018. Limen, non-toxic recombinant plant defensin and its effect against pathogenic yeast and fungi. *Journal of Pharmacy and Pharmacology* 6: 945–955. <https://doi.org/10.17265/2328-2150/2018.11.001>
- Sánchez-García BM, Espinosa-Huerta E, Villordo-Pineda E., Rodríguez-Guerra R, Mora-Avilés MA. 2017. Identificación molecular y evaluación antagónica *in vitro* de cepas nativas de *Trichoderma* spp. sobre hongos fitopatógenos de raíz en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Montcalm. *Agrociencia* 51 (1): 63-79.
- Sánchez-García BM, González-Flores F, Pons-Hernández JL, Acosta-Gallegos JA, Cabral-Enciso M, Fraire-Velázquez S, Simpson J, Rodríguez-Guerra R. 2006. *Fusarium lateritium*: nuevo patógeno de la raíz del frijol en México. *Agricultura Técnica en México* 32 (3): 251–257.
- Seo H-H, Park S, Park S, Oh B-J, Back K, Han O, Kim J-I, Kim YS. 2014. Overexpression of a defensin enhances resistance to a fruit-specific anthracnose fungus in pepper. *PLoS ONE* 9: e97936. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097936>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2020. Estadísticas de Producción Agrícola. https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020 (Retrieved: June 2021)
- Su Q, Wang K, Zhang Z. 2020. Ecotopic expression of the antimicrobial peptide DmAMP1W improves resistance of transgenic wheat to two diseases: Sharp eyespot and common root rot. *International Journal of Molecular Science* 21 (2): 647. <https://doi.org/10.3390/ijms21020647>
- Swaminathan S, Reem NT, Lionetti V, Zabolina OA. 2021. Coexpression of fungal cell wall-modifying enzymes reveals their additive impact on *Arabidopsis* resistance to the fungal pathogen, *Botrytis cinerea*. *Biology* 10 (10): 1070. <https://doi.org/10.3390/biology10101070>
- Van Schoonhoven A, Pastor-Corrales MA. 1987. Sistema Estándar para la Evaluación de Germoplasma de Frijol. Centro Internacional de Agricultura Tropical: Cali, Colombia.

PERFIL LEUCOCITARIO, MICRONÚCLEOS Y PROLONGACIONES NUCLEARES ERITROCITARIOS EN GORRIONES (*Centronyx bairdii* y *Ammodramus savannarum*) DEL DESIERTO CHIHUAHUENSE DURANTE EL INVIERNO

LEUKOCYTE PROFILE, MICRONUCLEUS AND ERYTHROCYTARY NUCLEAR PROTRUSIONS IN SPARROWS (*Centronyx bairdii* and *Ammodramus savannarum*) OF THE CHIHUAHUENSE DESERT DURING THE WINTER

Martín Emilio Pereda-Solís¹, Claudia Selene Guillén-González¹, Karina Ramírez-Carreño¹, José Hugo Martínez-Guerrero¹, Daniel Sierra-Franco¹, Manuel Armando Salazar-Borunda¹, Olivia Torres-Bugarín^{2*}

¹ Universidad Juárez del Estado de Durango. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Carretera Durango al Mezquital km 11.5, Durango, Durango, México. C. P. 34307.

² Universidad Autónoma de Guadalajara. Laboratorio de Evaluación de Genotóxicos. Unidad Académica de Ciencias de la Salud. Avenida Patria No. 1201, Lomas del Valle, Zapopan, Jalisco, México. C. P. 45129.

* Autor para correspondencia: oliviatorres@hotmail.com

RESUMEN

Los gorriones de Baird (*Centronyx bairdii*) y chapulín (*Ammodramus savannarum*), son especies cuyas poblaciones están en decremento debido a la pérdida de su hábitat natural y por el uso indiscriminado de agroquímicos en zonas de cultivo aledañas a su hábitat reproductivo. Estas dos especies son objeto de estudios desde el punto de vista ecológico; sin embargo, no existen trabajos que permitan conocer la presencia de anomalías en eritrocitos y conteo leucocitario, biomarcadores del estado de salud. El objetivo de este trabajo fue determinar la frecuencia espontánea de eritrocitos policromáticos (EPC), eritrocitos micronucleados (EMN) y prolongaciones nucleares eritrocitarias (EPN), así como el diferencial leucocitario e índice heterófilo/linfocito (H:L), para establecer el estado de salud de estas especies que habitan en Cuchillas de la Zarca, Durango. Para ello se capturaron 20 organismos de cada especie con redes de niebla, por cada individuo se realizaron dos frotis sanguíneos y se analizaron bajo el microscopio (100x). Entre especies no se observaron diferencias estadísticamente significativas en las frecuencias de los distintos biomarcadores, y son

ABSTRACT

The populations of Baird's (*Centronyx bairdii*) and grasshopper (*Ammodramus savannarum*) sparrows are decreasing as a consequence of the loss of their natural habitat and the indiscriminate use of agrochemicals in farming areas bordering their breeding habitat. Although these two species have been studied from an ecological perspective, there is no research on the presence of abnormalities in their leukocyte and erythrocytes counts, both of them health biomarkers. The objective of this work was to determine the spontaneous rate of polychromatic erythrocytes (PCE), micronucleated erythrocytes (MNE), and nuclear buds (NBs), as well as the leukocyte differential and the heterophil/lymphocyte ratio (H:L), in order to establish the health status of these sparrow species that live in Cuchillas de la Zarca, Durango, Mexico. With this aim, we captured 20 organisms of each species with mist nets. We carried two blood smears per individual which we analysed under the microscope (100x). There were no statistically significant differences among species regarding the frequencies of the various biomarkers, which had similar values to those established for other healthy bird species. Therefore, there is no evidence of genomic instability, nor of genotoxic or cytotoxic effects.

similares a los valores establecidos en otras especies de aves sanas. Por tanto, no hay evidencia de inestabilidad genómica, efecto genotóxico o citotóxico, así mismo no se detectaron alteraciones en el sistema inmune evaluado por el diferencial leucocitario y el índice H:L. Se destaca que este estudio es el primero que establece valores de referencia de estos biomarcadores en estas especies de gorriones.

Palabras Clave: eritrocitos, micronúcleos, prolongaciones nucleares, leucocitos, aves de pastizal, *Centronyx bairdii*, *Ammodramus savannarum*.

INTRODUCCIÓN

Algunas de las poblaciones de aves silvestres de América del Norte están en grave disminución; de ellas las más afectadas están las que habitan los pastizales, ya que el 74 % de las especies se encuentran en situación crítica. Este escenario es debido a la pérdida de 700 millones de individuos de diferentes especies de aves, como consecuencia del aceleramiento de la pérdida de sus hábitats naturales y al uso intensivo de agroquímicos entre otros factores (Quero *et al.*, 2016; Rosemberg *et al.*, 2019). Por su parte, el grupo de gorriones y particularmente los denominados gorrión de Baird (*C. bairdii*) y gorrión chapulín (*A. savannarum*) presentan tasas anuales de crecimiento de -2.1 y -2.5 % respectivamente (Sauer *et al.*, 2017).

El gorrión de Baird se reproduce en el sur de Canadá y norte de los Estados Unidos; inverna en Arizona, Nuevo México, Texas en Estados Unidos y en los estados mexicanos de Chihuahua, Sonora, Durango y Coahuila. El gorrión chapulín (*A. savannarum*) se reproduce desde el sur de Canadá hasta el norte de México, inverna en México y en la parte oeste de Centro América. Estas dos especies de aves pertenecen a la familia Emberizidae. Son aves granívoras y poseen picos con formas distintivas (Sierra Franco *et al.*, 2015).

La salud de las aves se monitorea mediante biomarcadores celulares, de tejidos, fluidos corporales, cambios fisiológicos o bioquímicos (Ceyca *et al.*, 2014). La presencia de anomalías eritrocitarias como eritrocitos micronucleados (EMN) y prolongaciones nucleares eritrocitarias (EPN) son biomarcadores ampliamente utilizados en la

Likewise, we detected no alterations in the immune system, based on the leukocyte differential and the H:L ratio evaluation. This is the first study that establishes reference values for these biomarkers among these particular species of sparrows.

Keywords: erythrocytes, micronuclei, nuclear buds, leukocytes, grassland birds, *Centronyx bairdii*, *Ammodramus savannarum*.

INTRODUCTION

Some of the wild bird populations in North America are in severe decline; the most affected species are those that live in grasslands, since 74 % of them are in critical condition. This is the result of the loss of 700 million individuals of different bird species, as a consequence of the increasingly accelerated loss of their natural habitats and of the intensive use of agrochemicals, among other factors (Quero *et al.*, 2016; Rosemberg *et al.*, 2019). Among the sparrow group, Baird's (*Centronyx bairdii*) and grasshopper (*Ammodramus savannarum*) sparrows have annual growth rates of -2.1 % and -2.5 %, respectively (Sauer *et al.*, 2017).

Baird's sparrow (*C. bairdii*) reproduces in southern Canada and the northern United States and migrates south in winter to Arizona, New Mexico, and Texas (USA) Chihuahua, Sonora, Durango, and Coahuila (Mexico). The reproduction area of the grasshopper sparrow (*A. savannarum*) covers from southern Canada to northern Mexico. This sparrow migrates south in winter to Mexico and western Central America. These two species belong to the family Emberizidae. They are seed-eating birds and have distinctively shaped beaks (Sierra Franco *et al.*, 2015).

Bird health is monitored through cell, tissue, and bodily fluid biomarkers, as well as physiological or biochemical changes (Ceyca *et al.*, 2014). The presence of erythrocyte abnormalities, such as micronucleated erythrocytes (MNE) and nuclear buds (NBs), are widely-used biomarkers in the assessment of genomic instability, as well as genotoxic and cytotoxic damage in different wild species, including birds (Martínez-Quintanilla *et al.*, 2017). Genotoxic damage is usually silent and goes unnoticed; however, it acts directly or

evaluación de inestabilidad genómica, daño genotóxico y citotóxico en diversas especies silvestres entre ellas las aves (Martínez-Quintanilla *et al.*, 2017). El daño genotóxico generalmente es silencioso por lo que pasa inadvertido; sin embargo, actúa directa o indirectamente sobre el ADN y se expresa en diversas formas como mutagénico, teratogénico o cancerígeno. El resultado puede ser catastrófico, ya que pone en riesgo la vida del organismo e incluso puede llevar a la extinción de las especies afectadas y, por tanto, alterar irreversiblemente a los ecosistemas (Torres-Bugarín *et al.*, 2014).

En aves, el sistema inmune se constituye por el sistema de respuesta innata no específica (mediada por células fagocíticas granulocitos y monocitos) y por el de respuesta adquirida (mediada por linfocitos, es específica para patógenos). Los granulocitos (heterófilos, eosinófilos y basófilos) reconocen, fagocitan y degradan agentes extraños. Los heterófilos son células inespecíficas que proliferan en los tejidos durante una respuesta corporal a los procesos inflamatorios y matan a los patógenos, juegan un papel importante en la respuesta inmune innata y su número crece en respuesta a infecciones bacterianas y fúngicas a largo plazo, así como a irregularidades relacionadas con la dieta y el estrés, representan entre el 40 y el 75 % del número total de leucocitos. A su vez, los linfocitos son leucocitos que participan en respuestas inmunes adquiridas, humorales (células B, se desarrollan en la bolsa de Fabricio) y mediadas por células (células T, se desarrollan en el timo). En las aves, los linfocitos representan el grupo más grande de células del sistema inmunológico y representan entre el 20 y el 50 % de todos los glóbulos blancos (Skwarska, 2018).

La proporción heterófilo/linfocito (H:L), comúnmente se utiliza como índice hematológico, es una evaluación relativamente simple de la eficiencia del sistema inmunológico y el estado de salud individual de aves. Además, este parámetro permite evaluar la respuesta corporal al estrés a corto y largo plazo, inducido por el entorno circundante. El nivel de estrés e inmunosupresión no solo se manifiesta por el aumento del número de heterófilos (heterofilia) mediado por corticosterona (llamada

indirectly on DNA and has various mutagenic, teratogenic, or carcinogenic manifestations. The result can be catastrophic, since genotoxic damage endangers the life of the organisms and can even cause the extinction of the affected species, causing irreversible alterations to ecosystems (Torres-Bugarín *et al.*, 2014).

The immune system of birds comprises the nonspecific innate response system (mediated by phagocytic cells, granulocytes, and monocytes) and the acquired response system (mediated by lymphocytes, specifically for pathogens). Granulocytes (heterophils, eosinophils, and basophils) recognize, phagocytose, and degrade foreign agents. Heterophils are nonspecific cells that proliferate in tissues during bodily responses to inflammatory processes and kill pathogens. They play an important role in the innate immune response and their number increases in response to long-term bacterial and fungal infections, as well as to irregularities related to diet and stress. Heterophils represent 40 - 75 % of total leucocytes. Lymphocytes are leucocytes that participate in acquired, humoral (B cells that develop in the bursa of Fabricius) and cell-mediated (T cells that develop in the thymus) immune responses. Lymphocytes are the largest group of cells in the immune system of birds and represent 20 - 50 % of all white blood cells (Skwarska, 2018).

The heterophil/lymphocyte ratio (H:L) is commonly used as a haematological index; it is a relatively simple way to assess the immune system efficiency and individual health of birds. Furthermore, this parameter allows to assess the short- and long-term bodily response to environment-induced stress. Stress and immunosuppression levels not only manifest in a heterophil count increase (heterophilia) mediated by corticosterone (the "stress hormone"), but also in a lymphocyte count decrease (lymphopenia) (Genovese *et al.*, 2013; Skwarska, 2018; Minias, 2019).

As a result of their biological characteristics, *C. bairdii* and *A. savannarum* sparrows are frequently used in various ecological studies. This is, to our knowledge, the first study that describes haematological parameters, which are fundamental for the diagnosis and monitoring of

“hormona del estrés”), sino también por la disminución del número de linfocitos (linfopenia) (Genovese *et al.*, 2013; Minias, 2019; Skwarska, 2018). Por sus características biológicas los gorriones *C. bairdii* y *A. savannarum* con frecuencia se utilizan en diversos estudios ecológicos, por ello el objetivo de este trabajo es describir por primera vez la frecuencia de EMN, EPN, el diferencial leucocitario normal así como el índice H:L los cuales son parámetros de importancia para el diagnóstico y monitoreo de su estado de salud.

MATERIAL, MÉTODOS Y SUJETOS DE ESTUDIO

Zona de estudio

El estudio se realizó en el invierno de 2016-2017, en tres potreros (coordenada central N 26° 16' 37.902", W 105° 8' 53.653") ubicados en el Rancho Santa Teresa perteneciente al municipio de Hidalgo, Durango dentro de la región prioritaria para la conservación de pastizales (RPCP) Cuchillas de la Zarca, comprende el norte de Durango y el extremo sur de Chihuahua, México y forma parte del Desierto Chihuahuense (Figura 1).

La altitud media de la zona es 1850 m y la temperatura del mes más frío oscila entre los -3 °C a 18 °C (Sierra-Franco *et al.*, 2015). El estrato arbustivo está formado por

health in these sparrows. Therefore, the objective of this work was to describe the frequency of micronucleated erythrocytes and NBs, the normal leucocyte differential, and the H:L ratio among those mentioned sparrow species.

MATERIAL, METHODS, AND SUBJECTS OF STUDY

Study area

The study was conducted during the winter of 2016-2017, in three Grasslands (central coordinate 26° 16' 37.902" N, 105° 8' 53.653" W) situated in the Rancho Santa Teresa, that belongs to the municipality of Hidalgo, Durango, within the Cuchillas de la Zarca grassland priority conservation area (GPCA). This area comprises northern Durango and the southern end of Chihuahua, Mexico, and is part of the Chihuahuan Desert (Figure 1).

The mean altitude of the area is 1850 m and the temperature during the coldest month fluctuates between -3 and 18 °C (Sierra-Franco *et al.*, 2015). The shrub stratum comprises species of the genera *Larrea*, *Prosopis*, *Acacia*, *Ephedra*, *Nolina*, *Opuntia*, *Juniperus*, and *Quercus*. The herb stratum is formed by the genera *Bouteloa*, *Aristida*, *Buchloe*, *Andropogon*, *Melinis*, *Muhlenbergia*, *Sporobolus*, *Heteropogon*, and *Pleuraphis* (COTECOCA, 1976).

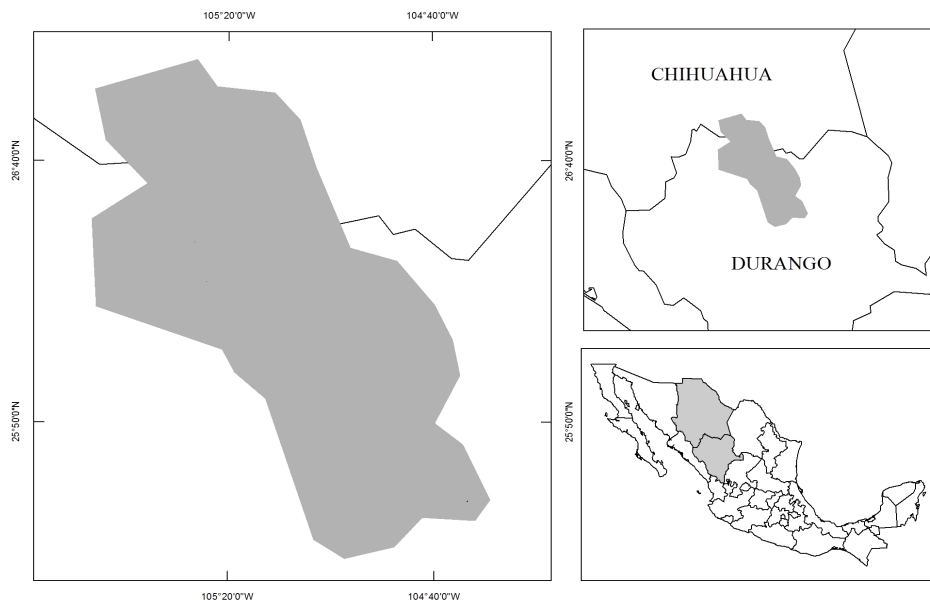


Figura 1. Ubicación del Área de estudio, que corresponde a la región Cuchillas de la Zarca, entre Durango y Chihuahua, México.

Figure 1. Location of study area, Cuchillas de la Zarca region, between Durango and Chihuahua, Mexico.

especies de los géneros *Larrea*, *Prosopis*, *Acacia*, *Ephedra*, *Nolina*, *Opuntia*, *Juniperus* y *Quercus*. El estrato herbáceo está compuesto por los géneros *Buteloa*, *Aristida*, *Buchloe*, *Andropogon*, *Melinis*, *Muhlenbergia*, *Sporobolus*, *Heteropogon* y *Pleuraphis* (COTECOCA, 1976).

Gorrión de Baird (*C. bairdii*) es un ave de pastizal de talla mediana, mide entre 10.5 a 13.0 cm de longitud, el macho es un poco más grande. Presenta un collar con líneas finas de color marrón oscuro en la parte superior del pecho y los costados, ceja ante, una línea central ocre en la corona (Figura 2a). Esta es un ave cautelosa que prefiere caminar que volar. Anida en la parte central del sur de Canadá y del norte de los Estados Unidos, creando sus nidos sobre el suelo. Inverna desde Arizona hacia la parte central del norte de México (Panjabi *et al.*, 2007). Esta ave puede migrar sola o en pequeñas parvadas, una vez que llegan a sus áreas de invernación, no forman parvadas. Habita generalmente en pastizales abiertos con pastos medios o altos, ligeramente pastoreados, mezclados con hierbas y arbustos bajos. Durante el verano se alimenta primordialmente de insectos y en invierno de semillas (Panjabi *et al.*, 2007). Según la lista roja de IUCN (2021), esta especie es evaluada de preocupación menor (PM). A pesar de que la tendencia de la población parece estar disminuyendo, no se cree que la disminución sea suficientemente rápida para acercarse a los umbrales de vulnerabilidad. La disminución de su población está relacionada con la pérdida de hábitat por agricultura y

The Baird's sparrow (*C. bairdii*) is a medium-sized grassland bird that measures between 10.5 and 13.0 cm length; the male is slightly larger than the female. It has a collar with fine dark brown lines in the upper part of the chest and sides, a buff-coloured eyebrow stripe, and a central ochre-coloured line in the crown (Figure 2a). This cautious bird prefers to walk over flying. It nests in central and southern Canada and in the northern United States. They build their nests on the floor; spend the winter in an area that spans from Arizona to central and northern Mexico (Panjabi *et al.*, 2007). This bird can migrate alone or in small flocks, although once they arrive to their wintering areas, they do not flock.

Baird's sparrow usually lives in open, slightly herded grasslands in which medium-sized and tall grasses are mixed with weeds and low shrubs. It mainly eats insects in summer and seeds in winter (Panjabi *et al.*, 2007). According to the International Union for Conservation of Nature - IUCN red list (2021), it has been evaluated as a Least-Concern (LC) species. In spite of the downward trend of their populations, the decline is not believed to be quick enough to reach the vulnerability threshold. The decline in the population of Baird's sparrows is related to the loss of habitat as a consequence of agriculture and is in direct proportion to the reduction of grasslands in Canada (Rosemberg *et al.*, 2019).

The grasshopper sparrow (*A. savannarum*) is medium-to large-sized and short-tailed. It has a brown, black,

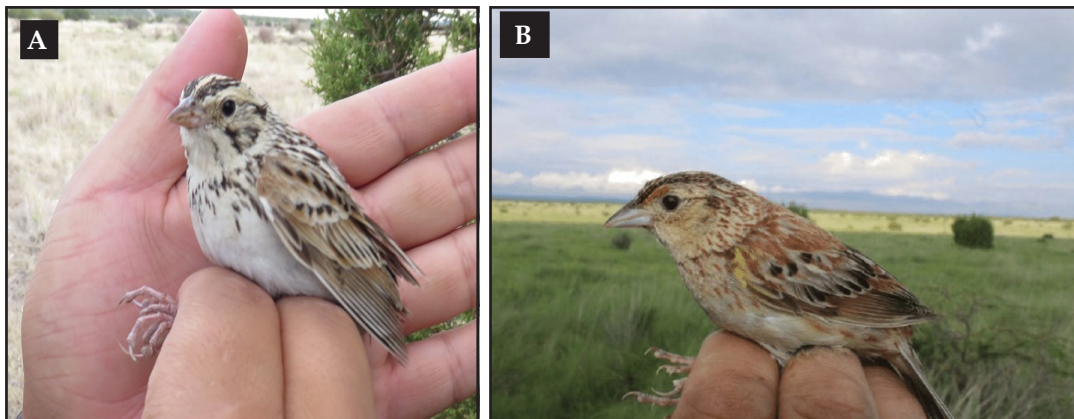


Figura 2. Especies evaluadas en este estudio. A: Gorrión de Baird (*Centronyx bairdii*). B: Gorrión chapulín (*Ammodramus savannarum*). (Fotos: MVZ Karina Ramírez Carreño y Dr. Samuel Arroyo Arroyo).

Figure 2. Species that were evaluated in this study. A: Baird's sparrow (*Centronyx bairdii*). B: Grasshopper sparrow (*Ammodramus savannarum*). [Photos: Karina Ramírez Carreño (BSc in Animal Medicine and Animal Husbandry) and Samuel Arroyo Arroyo (ScD)].

es directamente proporcional a la reducción de la superficie de pastizales en Canadá (Rosemberg *et al.*, 2019). El gorrión chapulín (*A. savannarum*) es de talla mediana-grande, de cola corta. Presenta un patrón café, negro, gris y blanco en la espalda y alas, cabeza café con una línea central delgada, pecho y lados ocre, a menudo con una mancha amarillo-naranja delante del ojo. La cabeza es bastante plana (Figura 2b). El canto es como el zumbido de un insecto. Migra solo en pequeñas parvadas y en los sitios de invernación se mantienen en solitario (Panjabi *et al.*, 2007). Anida desde el sur de Canadá y este de Estados Unidos, en el suelo en la base de un macollo de pastos. Inverna en el sur de Estados Unidos, México y parte de Centroamérica. Existen poblaciones residentes pequeñas en el sur de Estados Unidos, en Sonora, y en otras partes de México. Habita en pastos herbáceos húmedos o secos de altura intermedia, a menudo con vegetación agrupada y arbustos o malezas escasas intercaladas con parches de tierra desnuda (Arguedas-Negrini, 2001). Colecta su alimento sobre el suelo. Durante el verano se alimenta de insectos de preferencia chapulines y en el invierno de semillas (Panjabi *et al.*, 2007). Según la lista roja de UICN (2016), la especie es evaluada como de preocupación menor (LC). Las poblaciones muestran disminución anual del 3.9 % en toda América del Norte para el período 1966-1994. Esta disminución se debe a la pérdida de hábitat, conversión de pastos en cultivos intensivos e inhibición del fuego (Askins *et al.*, 2007).

Captura y procesamiento de aves

La captura de las aves se realizó (licencia de colecta de SEMARNAT SPGA/DGVS/13360/15) mediante el traslado e instalación en el sitio de estudio de cuatro redes de niebla fabricadas con poliéster de 36 mm de malla, 2.6 m de alto por 12 m de largo (modelo KTX de Avian Research Supplies, Association of Field Ornithologists -AFO), y empleando el método de arreo de las aves hacia la red (Sierra-Franco *et al.*, 2019). Las capturas se realizaron durante las primeras horas de la mañana (7:30 a 12:00 h). Las aves recapturadas fueron liberadas inmediatamente para evitar la toma de una segunda muestra.

Toma y procesamiento de muestras

La muestra de sangre se tomó por punción de la vena braquial con jeringa de insulina de 1 mL con aguja 29GX de 13 mm. Por organismo se realizaron dos frotis, los que se dejaron secar a temperatura ambiente, se fijaron

grey, and white pattern on its back and wings, a brown head with a thin central line, and ochre chest and sides, frequently with a yellow-orange spot in front of the eyes. Its head is quite flat (Figure 2b). The song of this bird sounds like the buzzing of an insect. They migrate alone or in small flocks and spends the winter apart from others of their kind (Panjabi *et al.*, 2007). The grasshopper sparrow nests in southern Canada and the western United States. It builds its nests on the floor, at the base of grass clusters. It spends the winter in the southern United States, Mexico, and part of Central America. Small populations of this species reside in the southern United States, as well as in Sonora and other parts of Mexico.

These birds live in wet or dry medium-height herbaceous grasses that often have vegetation clusters and shrubs or scarce underbrush, interspersed with patches of bare land (Arguedas-Negrini, 2001). They collect their food from the floor. They eat insects (preferably grasshoppers) and seeds, in summer and winter, respectively (Panjabi *et al.*, 2007). According to the IUCN red list (2016), it is evaluated as a Low-Concern (LC) species. The 1966-1994 period recorded an annual 3.9 % decrease among grasshopper sparrow populations throughout North America. This decline is a result of the loss of habitat, the conversion of grasslands into intensive farming lands, and fire inhibition (Askins *et al.*, 2007).

Capture and processing of birds

Birds were captured (with SEMARNAT collection permit SPGA/DGVS/13360/15) by moving and installing four 36-mm mesh polyester mist nets (2.6 m high x 12 m long) (model KTX, Avian Research Supplies, Association of Field Ornithologists, AFO) at the study site and by herding the birds towards the net (Sierra-Franco *et al.*, 2019). Captures were carried out during the first morning hours (7:30 - 12:00 h). Recaptured birds were immediately freed to avoid taking second samples.

Drawing and processing samples

The blood sample was drawn by puncturing the brachial vein with a 1-mL insulin syringe with a 13-mm 29GX needle. Two blood smears per organism were prepared, left to dry at room temperature, and fixed in ethanol (80 %) during 10 min. They were then stained with acridine orange 8 (Sigma-Aldrich, USA), a nucleic-acid-specific staining. For this process, the smears were placed in two

en etanol (80 %) por 10 min, se tiñeron con anaranjado de acridina 8 (Sigma-Aldrich, USA), tinción específica para ácidos nucleicos, para ello se coloca en dos cajas para tinción 0.5 L de amortiguador de fosfato en cada una, en uno de ellos se disolvieron 0.05 g de anaranjado de acridina. Posteriormente las muestras se sumergieron en el colorante por 2 min y luego se lavaron con el amortiguador de fosfato de 5 a 8 min. Las muestras se guardaron en una caja porta-laminillas hasta su análisis (Torres-Bugarín *et al.*, 2014).

Análisis de eritrocitos micronucleados y prolongaciones nucleares en eritrocitos

El análisis de eritrocitos micronucleados (EMN) y prolongaciones nucleares eritrocitarias (EPN), se llevó a cabo bajo microscopio equipado con fluorescencia (100x) (Zeiss® modelo Axiostar Plus). Por cada organismo e contaron 10 000 eritrocitos totales para identificar la frecuencia de EMN y EPN. Además, se determinó la frecuencia de eritrocitos policromáticos (EPC) en 1000 eritrocitos totales, la frecuencia de eritrocitos policromáticos micronucleados (EPCMN) y eritrocitos policromáticos con prolongaciones (EPCPN), estos dos últimos en 1000 EPC (Franco-Ramos *et al.*, 2020).

Tinción y análisis leucocitario

Las laminillas se tiñeron con el kit de tinción rápida Diff Quick (hemocolorante rápido) marca HYCEL® y se analizaron con microscopio óptico (Leica DM-500). Con el método del barrido de zig-zag se contabilizaron 100 leucocitos que se registraron con la ayuda de la aplicación móvil WBC®, y en los cuales se diferenciaron las características morfológicas. El índice heterófilo/linfocito (H:L) se calculó como una relación entre el número de heterófilos y el número de linfocitos. Las fracciones individuales de leucocitos (heterófilos, eosinófilos, basófilos, linfocitos y monocitos) o solo heterófilos y linfocitos se contaron para sumar el total de 100 células con el microscopio a 1000x de aumento usando inmersión en aceite.

Análisis estadístico

Se realizó el análisis descriptivo de todas las variables del estudio, además se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar las medianas de las variables entre especies mediante el programa estadístico NCSS 2000.

staining boxes, each one containing 0.5-L of phosphate buffer; 0.05 g of acridine orange were dissolved in one of the boxes. The samples were subsequently submerged in the colorant for 2 min and then washed with the phosphate buffer for 5 to 8 min. Finally, the samples were stored in a smear box awaiting analysis (Torres-Bugarín *et al.*, 2014).

Analyses of micro-nucleated erythrocytes and nuclear buds

The analyses of MNE and NBs were conducted under a Zeiss® Axiostar Plus fluorescence microscope (100x). In order to identify the total MNE and NBs frequency, 10 000 total erythrocytes were counted per organism. In addition, the frequency of PCE was determined in 1000 total erythrocytes, while the frequency of MNPCE and NBsPCE were determined in 1000 PCE (Franco-Ramos *et al.*, 2020).

Staining and leukocyte analysis

Smear slides were stained with the HYCEL® Diff-Quick staining kit — a quick blood stain — and analysed with a Leica DM-500 optical microscope. The zig-zag counting technique was used to record 100 leucocytes with the help of the WBC® mobile application; subsequently, their morphological characteristics were differentiated. The heterophil/lymphocyte ratio (H:L) was estimated as a relation between the amount of heterophils and lymphocytes. The individual parts of leucocytes (heterophils, eosinophils, basophils, lymphocytes, and monocytes) or only heterophils and lymphocytes were counted to add a total of 100 cells, using a microscope with a 1000x magnification and oil immersion.

Statistical analysis

Every variable of the study was subject to a descriptive analysis. Additionally, the Kruskal-Wallis nonparametric test was applied to compare the variable medians among species, using the NCSS 2000 statistical software.

RESULTS AND DISCUSSION

Population description

Forty blood samples from two sparrow species were collected: 20 from *C. bairdii* and the other 20 from *A. savannarum*. Not all samples were analysed due to various reasons, such as insufficient

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción de la población

Se colectaron 40 muestras sanguíneas de dos especies de gorriones de ellas 20 fueron de *C. bairdii* y 20 de la especie *A. savannarum*. No todas las muestras se analizaron, debido a razones diversas entre ellas sangre insuficiente, la sangre se coaguló rápidamente y el tamaño del organismo. No fue posible determinar el sexo debido a que son especies monomórficas y al momento de la colecta éstas no se encontraban en etapa reproductiva.

Eritrocitos policromáticos

La sangre de las aves aparentemente sanas se constituye en mayor proporción por eritrocitos “maduros”; sin embargo, también es posible encontrar eritrocitos inmaduros también denominados EPC, básicamente porque su citoplasma es más denso por su contenido de RNA, incluso el núcleo posee menos cromatina que una célula madura, por ello adquieren coloración más oscura. Éstos duran en circulación aproximadamente 24 h y son utilizados como biomarcadores de la regeneración eritrocitaria (Jones, 2015).

Al analizar la frecuencia de EPC se observó que los valores promedio de las dos especies oscilaron de 4.19 a 4.72 % (Cuadro 1). Estos resultados concuerdan con

blood, quick clotting of the blood, and size of the organism. Determining the sex of the organisms was not possible, because they are a monomorphic species and, during the collection, they were not in their reproductive stage.

Polychromatic erythrocytes

Most erythrocytes in the blood of apparently healthy birds are “mature”; however, it is also possible to find immature erythrocytes (known also as PCE), mainly because its RNA content makes their cytoplasm thicker. Even their nucleus has less chromatin than a mature cell and consequently they develop a darker hue. These erythrocytes remain in circulation around 24 h and are used as biomarkers for erythrocyte regeneration (Jones, 2015).

When PCE frequency is analysed, the average values for both species fluctuate between 4.19 and 4.72 % (Table 1). These results match those described for healthy birds, where PCE frequency is 1-5 % of the erythrocyte total (Campbell, 2015; Jones, 2015). PCE frequency can increase when there is blood loss as a consequence of haemorrhage or anaemia and can decrease as a result of bone marrow suppression, some pathology, or cytotoxicity (Clark, 2015).

Cuadro 1. Frecuencia de micronúcleos y prolongaciones en eritrocitos de gorriones *Centronyx bairdii* y *Ammodramus savannarum*.

Table 1. Frequency of micronuclei and erythrocyte protrusions in *Centronyx bairdii* and *Ammodramus savannarum* sparrows.

Especie	N	EPC/1000 ET	EPCMN/ 1000 EPC	EPCPN/ 1000 EPC	EMN/ 10 000 ET	EPN/ 10 000 ET
		Min. - Max.	Min. - Max.	Min. - Max.	Min. - Max.	Min. - Max.
<i>C. bairdii</i>	20	41.9 ± 16.41a 20.2 - 83.2	0.01 ± 0.03 a 0 - 1	0.04 ± 0.07 a 0 - 2	2.55 ± 3.3 a 0 - 14	10.50 ± 14.58 a 0 - 57
<i>A. savannarum</i>	16	47.28 ± 24.14 a 23.6 - 97.7	0.01 ± 0.05 a 0 - 2	0.07 ± 0.09 a 0 - 3	2.18 ± 2.48 a 0 - 9	9.56 ± 11.48 a 0 - 37

EPC: Eritrocitos policromáticos, EPCMN: Eritrocitos policromáticos con micronúcleos, EPCPN: Eritrocitos policromáticos con prolongaciones nucleares, EMN: Eritrocitos con micronúcleos, EPN: Eritrocitos con prolongaciones nucleares. ET: Eritrocitos totales. Valores promedio ± Desviación estándar con la misma literal en cada columna son estadísticamente similares ($z < 1.96$ Kruskal-Wallis, $p > 0.05$). ♦ PCE: Polychromatic erythrocytes, PCMNE: Polychromatic erythrocytes with micronuclei, EPCPN: Polychromatic erythrocytes with nuclear protrusions, MNE: Micro-nuclei erythrocytes, NBS: Erythrocytes with nuclear protrusions. TE: Total erythrocytes. Mean values ± standard deviation were statistically similar ($z < 1.96$ Kruskal-Wallis, $p > 0.05$).

lo descrito en las aves sanas, en las que se describe que la frecuencia de EPC es en proporción de 1-5 % del total eritrocitario (Campbell, 2015; Jones, 2015). La frecuencia de EPC puede aumentar cuando ocurre pérdida de sangre por hemorragia o anemia, y pueden disminuir por mielo supresión por alguna patología o por citotoxicidad (Clark, 2015).

Eritrocitos policromáticos con micronúcleos y prolongaciones nucleares

Los EPC alcanzan su madurez en circulación en 24 h (EPCMN y EPCPN) por ello cuando poseen micronúcleos o lobulaciones, son utilizados como bioindicadores de efecto de corto plazo por exposición a agentes genotóxicos tanto endógenos como exógenos (Sommer *et al.*, 2020, Martínez-Quintanilla *et al.*, 2017). Este estudio mostró que la frecuencia de EPCMN y EPCPN en los gorriones *C. bairdii* y *A. savannarum* es menor al 1 % en relación a los eritrocitos maduros, lo cual se considera normal, esto en función de las frecuencias descritas para otras especies (Martínez-Quintanilla *et al.*, 2017).

Eritrocitos micronucleados

Las frecuencias de EMN observadas en *C. bairdii* y *A. savannarum* son consistentes con las descritas en 15 especies de paseriformes aparentemente sanas, capturadas en una reserva de la biosfera argentina (Quero *et al.*, 2016), o los descritos en 10 aves en cautiverio (Zúñiga-González *et al.*, 2000), entre ellas dos paseriformes, el zanate mexicano (*Quiscalus mexicanus*) y el bolsero (*Icterus sp.*) cuyas frecuencias de EMN fueron 0.5 EMN/10,000 ET (n=2) y 0 EMN/10,000 ET (n=1). Establecer valores de referencia de micronúcleos espontáneos resulta complicado debido a factores muy diversos, desde el tipo de bazo el cual en la mayoría de las especies es el filtro natural de eritrocitos envejecidos o con inclusiones, que por su fisiología podría eliminar rápidamente cualquier eritrocito anómalo de circulación como en el humano que en su caso es altamente eficiente, o podría no ser tan eficiente como ocurre en el ratón, y que en todo caso no es fácil saber o conocer el tipo de bazo que poseen los organismos hasta que histopatológicamente se analice. Si se detectan EMN en circulación indicará el tipo de bazo. Otros aspectos que determinan la

Polychromatic erythrocytes with micronuclei and nuclear buds

Polychromatic erythrocytes reach maturity in circulation within 24 h (MNPCE and NBsPCE); therefore, when they present micronuclei or lobulations, they are used as bioindicators of short-term effects resulting from exposure to both endogenous and exogenous genotoxic agents (Sommer *et al.*, 2020; Martínez-Quintanilla *et al.*, 2017). This study showed that MNPCE and NBsPCE in *C. bairdii* and *A. savannarum* sparrows have < 1 % frequency, in relation to mature erythrocytes. This situation is considered normal, based on the frequencies described for other species (Martínez-Quintanilla *et al.*, 2017).

Micronucleated erythrocytes

Micronucleated erythrocytes frequencies observed in *C. bairdii* and *A. savannarum* are consistent with those described in 15 species of apparently healthy passerine species captured in a biosphere reserve in Argentina (Quero *et al.*, 2016) or with those described in ten birds in captivity (Zúñiga-González *et al.*, 2000), including two passerines: the Mexican grackle (*Quiscalus mexicanus*) and the oriole (*Icterus sp.*), whose MNE frequencies were 0.5 MNE/10,000 TE (n=2) and 0 MNE/10,000 TE (n=1). Widely varying factors complicate establishing reference values for spontaneous micronuclei. For example, in most species, the spleen works as the natural filter for aged erythrocytes or erythrocytes with inclusions; given its physiology, it could quickly eliminate any abnormal erythrocytes from circulation, as the highly efficient human spleen does; although it could be less efficient, as occurs in mice. Either way, only through a histopathological analysis can the type of spleen that each organism possesses be determined. If MNE are detected in circulation, this will indicate the type of spleen. Other aspects that determine MNE frequency are the influence of anthropogenic activity, habitat, altitude, season, and kinds of available food, as well as age, sex, diet, and migratory behaviour, among others. Therefore, the sample size can help to discern the role that these factors play in this biomarker (Quero *et al.*, 2016; Zúñiga-González *et al.*, 2000).

frecuencia de EMN son la influencia de la actividad antropogénica, hábitat, altitud, época y tipo de alimento disponible, así como la edad, sexo, dieta, comportamiento migratorio, entre otros. Por ello, el tamaño de muestra puede ayudar a discernir el papel que juegan estos factores en este biomarcador (Quero *et al.*, 2016; Zúñiga-González *et al.*, 2000).

Eritrocitos con prolongaciones nucleares

Al igual que los EMN, los EPN se consideran de utilidad como biomarcadores de daño genético. Estas células se identificaron en diferentes especies de aves con incidencia del 80.9 %, con rango de 1 a 9.5/10,000 ET; en cambio, el promedio mínimo se observó en el mosquero cardenal (*Pyrocephalus rubinus*, n=2) y el máximo en el picurero (n=4), con frecuencia similar a la observada en las especies de este estudio (Quero *et al.*, 2016).

Sobre la formación de EPN diversos autores coinciden en señalar que está asociada con las mismas causas que originan los EMN. Ambas frecuencias parecen también estar relacionadas con la edad y el sexo de los individuos. Martínez-Quintanilla *et al.*, (2017) en un estudio realizado con la especie ganso nevado (*Anser caerulescens*) se observó también gran variabilidad en la frecuencia de EPN que se sugiere fue ocasionada por la heterogeneidad de las aves colectadas ya que eran aves de diferente sexo, edad y peso, lo cual se relaciona con la madurez del sistema retículo endotelial de las aves y a su capacidad para remover células dañadas de la circulación.

Diferencial leucocitario y relación H:L

Descripción leucocitaria. Las células leucocitarias observadas fueron heterófilos, eosinófilos, basófilos, monocitos y linfocitos (Cuadro 2). Al microscopio, los heterófilos se observaron de forma redonda, con un núcleo segmentado con dos o tres lóbulos de forma alargada, algunas veces contienen pequeños granos citoplasmáticos. Las células eosinófilas mostraron forma redonda con núcleo de dos a tres lóbulos. Estas células son menores en tamaño comparados con los heterófilos. Los linfocitos se observaron de forma esférica y diferentes

Erythrocytes with nuclear buds

Just like MNE, NBs are considered useful biomarkers of genetic damage. On the one hand, these cells were identified in different bird species with an 80.9 % incidence, within a range of 1 to 9.5/10 000 TE. On the other hand, Quero *et al.* (2016) determined that the minimum average was found in the scarlet flycatcher (*Pyrocephalus rubinus*, n=2), while the maximum was found in the buff-throated saltator (n=4). The frequency was similar to that observed in the species examined in this study.

Other authors agree that the formation of NBs is associated with the same causes that generate MNE. Both frequencies also seem to be related to the age and sex of individuals. In a study on the snow goose (*Anser caerulescens*), Martínez-Quintanilla *et al.* (2017) also observed great variability in NBS frequency; authors suggested that variability was caused by the heterogeneity of the collected birds. The difference in sex, age, and weight is related to the maturity of the reticuloendothelial system of birds and its ability to remove damaged cells from circulation.

Leukocyte differential and H:L ratio

Leukocyte description. The following leukocyte cells were observed: heterophils, eosinophils, basophils, monocytes, and lymphocytes. Observed under the microscope, heterophils were round, had a segmented nucleus with two or three elongated lobes, and sometimes contained small cytoplasmic granules. Eosinophilic cells had a round shape with a two- or three-lobed nucleus. These cells are smaller than heterophils. Lymphocytes were spherical in shape, showed different sizes, and had a large and condensed nucleus. The nucleus takes up much of the cytoplasm in these cells. Basophils present a round shape and a lobed nucleus; they have a darker appearance as a consequence of the cytoplasmic granules that cover them. The cytoplasm contains granules that cover both the nucleus and the cytoplasm itself. Monocytes were characterized by large, irregular nuclei with granulations and have a compact and homogeneous cytoplasm with no granules.

Cuadro 2. Recuento leucocitario (%) y relación heterófilo / linfocitos (H:L) en gorriones *Centronyx bairdii* y *Ammodramus savannarum*.

Table 2. Leukocyte count (%) and heterophil/lymphocyte ratio (H:L) in *Centronyx bairdii* and *Ammodramus savannarum* sparrows.

Especie	N	Heterófilos	Eosinófilos	Linfocitos	Basófilo	Monocitos	Relación H:L
<i>C. bairdii</i>	16	23.0 ± 18.0 a 4 - 72	5.5 ± 5.9 a 0 - 17	69.5 ± 19.5 a 16 - 84	0 ± 1.5 a 0 - 6	4 ± 4.2 a 0 - 13	0.65
<i>A. savannarum</i>	20	14.5 ± 7.6 a 2 - 33	2 ± 5.9 a 0 - 22	77.0 ± 14.0 a 40 - 90	0 ± 0.4 a 0 - 2	9 ± 5.9 a 1 - 24	0.23

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente similares ($z < 1.96$ Kruskal-Wallis, $p > 0.05$). ♦ Values were statistically similar ($z < 1.96$ Kruskal-Wallis, $p > 0.05$).

tamaños, con núcleo grande y condensado. En estas células el núcleo ocupa gran parte del citoplasma. Los basófilos presentaron forma redonda, núcleo lobulado, parecen más oscuros debido a los gránulos citoplasmáticos que lo cubren. El citoplasma presenta gránulos que cubren tanto al núcleo como al citoplasma. Los monocitos se caracterizaron por mostrar núcleo grande de forma irregular con granulaciones, tienen un citoplasma compacto y homogéneo sin gránulos.

Diferencial leucocitario. En el conteo leucocitario de ambas especies se observó que el linfocito es la célula más abundante (69-77 %), probablemente producto de la naturaleza migratoria de las aves de estudio. Campbell (2015) en un estudio con aves anseriformes (migratorias), concluye que son especies linfocíticas, las cuales someten su sistema inmune a múltiples factores como cambios climáticos y un gasto energético mayor, por lo cual deben generar una respuesta adaptativa para producir mayor cantidad de linfocitos.

Relación H:L. Hay evidencias de que las variaciones inter-especies de la relación H:L están limitadas por el desarrollo y obedecen a factores fisiológicos como edad, sexo, estrés ambiental, así como a aspectos filogenéticos, ya que se sabe que las aves no paseriformes (aves más ancestrales) presentan mayor relación de H:L que las paseriformes (Minias, 2019), además los números de heterófilos y linfocitos se correlacionaron positivamente con la duración del período de incubación y masa corporal, pero negativamente con la duración del período

Leukocyte differential. Lymphocytes were found to be the most abundant cells (69-77 %) in the leukocyte count of both species, probably because of the migratory nature of the studied birds. Campbell (2015) concludes that Anseriformes migratory birds are a lymphocytic species whose immune system is subject to multiple factors, such as climate change and a higher energy expenditure; therefore, they must generate an adaptive response in order to produce more lymphocytes.

H:L ratio. Evidence shows that cross-species variations of the H:L ratio are limited by development and respond to physiological factors such as age, sex, environmental stress, as well as phylogenetic aspects (Table 2). Non-passerine birds (more ancestral birds) are known to have a higher H:L ratio than passerines (Minias, 2019). In addition, the number of heterophils and lymphocytes has a positive correlation with the incubation period duration and the body mass; but has a negative correlation with the rearing period duration. This indicates that the constitutive immune function develops mainly during the embryonic phase (Pap *et al.*, 2015).

The second most important leukocyte group were the heterophils, which constitute the first natural protection against bacterial infections and other agents. This parameter is therefore related to immunosuppression, low growth rates, survival, high levels of glucocorticoids, and stress (Minias, 2019).

Eosinophils are one of the leukocyte groups observed in a smaller proportion (2 - 5.5 %).

de cría, lo que indica que la función inmunitaria constitutiva se desarrolla principalmente durante la fase embrionaria (Pap *et al.*, 2015).

El segundo grupo leucocitario en importancia fueron los heterófilos que constituyen la primera resistencia natural contra infecciones bacterianas y otros agentes por lo que este parámetro se relaciona con la inmunosupresión, bajas tasas de crecimiento, supervivencia, niveles elevados de glucocorticoides y estrés (Minias, 2019).

Los eosinófilos es uno de los grupos leucocitarios que se observaron en menor proporción con valores de 2 a 5.5 %. La eosinofilia es difícil de interpretar en las aves porque no se conoce la función exacta del eosinófilo aviar. Independientemente de esto, el conteo de eosinófilos puede ser de utilidad para el diagnóstico de infecciones por parásitos extracelulares como giardiasis, ascariasis y cestodiasis, o afecciones alérgicas, reacciones alérgicas, marcado daño tisular así como indicador del estado de estrés de las aves (Campbell, 2015; Jones, 2015).

La función de los basófilos aviares se conoce poco, pero se presume que es similar a la de los basófilos de los mamíferos, ya que sus gránulos citoplásmicos contienen histamina. Es común que los hemogramas normales no muestren basófilos, pero la basofilia parece estar asociada con enfermedades crónicas, respiratorias o daño tisular, puede ser común en infecciones activas por clamidia (particularmente en periquitos y loros amazónicos) así como en etapas iniciales de los procesos inflamatorios (Campbell, 2015; Jones, 2015).

Los monocitos son células móviles que migran utilizando sus movimientos para fagocitar (Campbell, 2015; Jones, 2015). En los hemogramas aviares se observan en proporciones menores. En un estudio exploratorio realizado con diferentes especies de aves árticas, se observaron monocitos en proporciones de 5 a 11 % (Mallory *et al.*, 2015). Es posible encontrar variaciones al comparar resultados entre estudios, inclusive entre estudios con la misma especie o especies similares, debido a factores como el sexo, edad, estado reproductivo y diferencias ambientales las cuales pueden conducir a ajustes fisiológicos de adaptación en las aves. Los monocitos poseen sustancias químicas biológicamente

Eosinophilia in birds is difficult to interpret, since the exact function of avian eosinophils is unknown. Nevertheless, the eosinophil count may be useful for the diagnosis of infections caused by extracellular parasites (such as giardiasis, ascariasis, and cestodiasis), allergic conditions, allergic reactions, and marked tissue damage. It is also an indicator of the stress status in birds (Campbell, 2015; Jones, 2015).

The function of avian basophils is poorly understood, but it is presumed to be similar to that of mammalian basophils, since their cytoplasmic granules contain histamine. It is common for no basophils to appear in normal hemograms, but basophilia seems to be linked to chronic and respiratory diseases, as well as to tissue damage. It may be common in active chlamydial infections (particularly in Amazon parakeets and parrots), as well as in the early stages of inflammatory processes (Campbell, 2015; Jones, 2015).

Monocytes are mobile cells that migrate using their movements to phagocytose (Campbell, 2015; Jones, 2015). In avian hemograms, these cells are observed in smaller proportions. In an exploratory study about various species of arctic birds, monocytes were observed in proportions of 5 to 11 % (Mallory *et al.*, 2015). It is possible to encounter variations when comparing results, even between studies about the same or similar species. This is caused by factors such as sex, age, reproductive status, and environmental differences that may lead to adaptive physiological adjustments in birds. Monocytes have biologically active chemical substances used in inflammatory processes and to destroy invasive organisms. Monocytosis may be linked to infections with *Mycobacterium*, *Chlamydophila*, and *Aspergillus*, and even tuberculosis, mycosis and neoplastic diseases (Campbell, 2015; Jones, 2015).

The H:L ratio is useful to understand the immune response in birds. With this purpose, Martínez-Quintanilla *et al.* (2017) determined the values of this indicator in various bird species, including the Rufa red knot (*Calidris canutus rufa*) at two points in their migratory route: the first, an intermediate site where birds rest before reaching the wintering site; the second, the final destination of their migratory

activas que utilizan en los procesos de inflamación y la destrucción de organismos invasores. La monocitosis puede estar relacionada con infecciones con *Mycobacterium*, *Chlamydophila*, *Aspergillus* o incluso tuberculosis, micosis y en enfermedades neoplásicas (Campbell, 2015; Jones, 2015).

El índice H:L es de utilidad para conocer la respuesta inmune en las aves, con este propósito Martínez-Quintanilla *et al.* (2017) presentan los valores de este indicador en diversas especies de aves entre las que se encuentra el playero rojizo (*Calidris canutus rufa*) en dos puntos de su ruta migratoria, el primero era un sitio intermedio donde las aves descansan antes de llegar al sitio de invernada, y el otro era el destino final de su migración. En ambos, el índice H:L fue diferente, debido a que en las zonas de reabastecimiento de las aves aún se encuentran energéticamente estresadas y esto genera una respuesta inmune comprometida debido al esfuerzo físico que realizan durante el vuelo, con daño en las células musculares y ocasiona también una redistribución de células fagocíticas, para iniciar la remoción estas células incrementan los valores de los heterófilos. Sin embargo, cuando las aves llegan a su sitio de invernación e inician el incremento de la masa corporal y el almacenamiento de sus reservas energéticas, empiezan a recuperar y mantener los niveles leucocitarios normales. Esto último probablemente es lo que encontramos en las aves de nuestro estudio, ya que al momento de realizar el muestreo las aves tenían unos 30 días de haber llegado al sitio de invernada.

Los valores del índice H:L de *A. savannarum* (0.23) y *C. bairdii* (0.65) fueron similares a los presentados por 11 especies de aves por Martínez-Quintanilla *et al.* (2017). La respuesta inmune puede ser medida a través de los valores leucocitarios y la relación H:L, que se alteran cuando se produce la respuesta de defensa ante agentes extraños, por lo cual siempre es posible que el aumento o disminución de un tipo leucocitario en particular sea consecuencia de que las aves están implicadas en algún proceso infeccioso no determinado, o recuperándose de él (Demina *et al.*, 2019).

La relación H:L es un índice que se utiliza para medir el estrés fisiológico de las aves, pero también sirve como un indicador indirecto de bienestar

journey. The H:L ratio was different in both sites, because these birds are still energetically stressed in their stopover sites. The physical effort made during the flight leads to a compromised immune response, which in turn causes muscle cell damage and a redistribution of phagocytic cells, increasing the values of heterophils in order to start eliminating pathogens. However, when the birds arrive at their wintering site, their body mass starts to increase; then, they begin to store energy reserves, and therefore recover and maintain normal leukocyte levels. This is probably what we observed in our study, since, at the time of the sampling, the birds had already spent approximately 30 d at their wintering site.

The values of the H:L ratio for *A. savannarum* (0.23) and *C. bairdii* (0.65) were similar to those recorded by Martínez-Quintanilla *et al.* (2017) for 11 bird species. The immune response can be measured through leukocyte values and the H:L ratio, which change when defence mechanisms respond to external agents. Therefore, it is always possible that the reason why a particular leukocyte type increases or decreases is that the birds are undergoing or recovering from some undetermined infectious process (Demina *et al.*, 2019).

The H:L ratio is an index used to measure physiological avian stress, but it is also useful as an indirect indicator of animal welfare in birds, since it can be affected by different stress-inducing causes. In the initial phase of stress, birds exhibit heterophilia and lymphopenia, followed by heteropenia and lymphocytosis (Campbell, 2015). Many authors have considered this pattern as one of the variables with the highest predictive value for stress (Campbell, 2015), even more reliable than measuring cortisol. Finally, the group of leukocyte cells in which variations caused by (internal or external) parasites or in response to hypersensitivity reactions were observed matches eosinophils (Campbell, 2015). In the case of this study, the values of eosinophils for *A. savannarum* (2 %) and *C. bairdii* (5.5 %) may be considered similar, based on previous studies about different bird species (Mallory, 2015), where the range recorded for eosinophils was 1 to 6 %.

animal en las aves, ya que puede verse afectado por distintas causas que conlleven a estrés. En la fase inicial del estrés, las aves presentan heterofilia y linfopenia, seguidas de heteropenia y linfocitosis (Campbell, 2015). Este patrón ha sido considerado por muchos autores como una de las variables con mayor valor predictivo del estrés (Campbell, 2015) y de mayor confianza que la misma medición de cortisol. Por último, el grupo de células leucocitarias que se observa con variación por parasitosis (interna o externa) o en respuesta a reacciones de hipersensibilidad corresponde al de los eosinófilos (Campbell, 2015), en el caso de este estudio los valores de eosinófilos para *A. savannarum* (2 %) y *C. bairdii* (5.5 %), se pueden considerar similares de acuerdo con trabajos previos en diferentes especies de aves (Mallory, 2015) donde el rango para eosinófilos fue de 1 a 6 %.

CONCLUSIONES

Previo a este trabajo no se había descrito la frecuencia de EMN espontáneos, EPN de sangre periférica, el diferencial leucocitario ni el índice H:L de los gorriones *C. bairdii* y *A. savannarum*. Esta investigación representa el primer esfuerzo para determinar valores de referencia para estas especies que enfrentan grave declive poblacional.

Los valores celulares determinados en este estudio para las aves objetivo son consistentes con los observados en otras especies de aves aparentemente sanas por lo que no constituyen evidencia de la presencia de alguna enfermedad de los organismos analizados.

REFERENCIAS

- Arguedas-Negrini N. 2001. Distribution, habitat and behavior of grasshopper sparrows, *Ammodramus savannarum* (Passeriformes: Emberizidae) in northeastern Nicaragua. *Revista de Biología Tropical* 49 (2): 703–707.
- Askins RA, Chávez-Ramírez F, Dale BC, Haas CA, Herkert JR, Knopf FL, Vickery PD. 2007. Conservation of grassland birds in North America: understanding ecological process in different regions. *Ornithological Monographs* 64: 1–64. <https://doi.org/10.2307/40166905>
- Campbell TW. 2015. *Exotic Animal Hematology and Cytology* (Fourth edition); John Wiley & Sons: New Jersey, USA. <https://doi.org/10.1002/9781118993705>
- Ceyca JP, Torres-Bugarín O, Castillo-Guerrero JA, Betancourt-Lozano M. 2014. Seabird Embryos as Biomonitoring of Micronucleogenic Genotoxic Agents: Potential Application for the Coasts of Mexico. *Avian*

CONCLUSIONS

To our knowledge, prior to this study, the frequency of spontaneous micro-nucleated erythrocytes peripheral blood nuclear buds, leucocyte differential and heterophil/lymphocyte ratio had not been described for *C. bairdii* and *A. savannarum* sparrows. Therefore, this research constitutes the first effort to establish reference values for these species, which are facing severe population decline.

The cell values determined in this study for the target birds are consistent with those observed in other apparently healthy bird species; therefore, they do not constitute evidence of the presence of any disease in the analysed organisms.

—End of the English version—



Biology Research 7 (4): 223–234. <https://doi.org/10.3184/175815514X14162211300859>

Clark P. 2015. Assessment of avian erythrocytes that exhibit variant nuclear morphology. *Comparative Clinical Pathology* 24: 485–490. <https://doi.org/10.1007/s00580-014-1926-6>

COTECOCA (Comisión Técnico Consultiva para la Determinación Regional de Coeficientes de Agostadero). 1976. Comisión Técnico Consultiva para la Determinación Regional de Coeficientes de Agostadero. SARH. Durango.

Demina I, Tsvey A, Babushkina O, Bojarinova J. 2019. Time-keeping programme can explain seasonal dynamics of leucocyte profile in migrant bird. *Journal of Avian Biology* 2019: e02117. <https://doi.org/10.1111/jav.02117>

Franco-Ramos RS, López-Romero CA, Torres-Ortega H, Oseguera-Herrera D, Lamoreaux-Aguayo JP, Molina-Noyola D, Juárez-Vázquez CI, Torres-Bugarín O. 2020. Evaluation of anti-cytotoxic and anti-genotoxic effects of *Nigella sativa* through a micronucleus test in BALB/c mice. *Nutrients* 12 (5): 1317. <https://doi.org/10.3390/nu12051317>

Genovese KJ, He H, Swaggerty CL, Kogut MH. 2013. The avian heterophil. *Developmental & Comparative Immunology* 41 (3): 334–340. <https://doi.org/10.1016/j.dci.2013.03.021>

IUCN (International Union for Conservation of Nature). 2021. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-3. <https://www.iucnredlist.org> (Retrieved: December 2021).

Jones MP. 2015. Avian haematology. *Clinics in Laboratory Medicine* 35 (3): 649–659. <https://doi.org/10.1016/j.cll.2015.05.013>

Mallory ML, Little CM, Boyd ES, Ballard J, Elliott KH, Gilchrist HG, Hipfner JM, Petersen A, Shutler D. 2015. Leucocyte profiles of Arctic marine birds: correlates of migration and breeding phenology.

- Conservation Physiology 3 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1093/conphys/cov028>
- Martínez-Quintanilla MC, Torres-Bugarín O, JH Martínez, TG Delgado, JM Salas, y ME Pereda. 2017. Relación heterófilo/linfocito, frecuencia espontánea de eritrocitos micronucleados y prolongaciones nucleares en el ganso nevado (*Chen caerulescens*): Una propuesta como posible biomonitor de estrés y genotóxicos ambientales. Huitzil, Revista Mexicana de Ornitología 18 (1): 102–111. <https://doi.org/10.28947/hrmo.2017.18.1.268>
- Minias P. 2019. Evolution of heterophil/lymphocyte ratios in response to ecological and life-history traits: A comparative analysis across the avian tree of life. Journal of Animal Ecology 88 (4): 554–565. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12941>
- Panjabi A, Landoski G and Sparks R. 2007. Wintering Bird Inventory and Monitoring in Priority Conservation Areas in Chihuahuan desert Grasslands in Mexico: 2007 pilot results. Rocky Mountain Bird Observatory, Brighton, CO, Final technical report IMXP-LAT-TNC07-01. 72. <https://www.birdconservancy.org/wp-content/uploads/2014/06/Chihuahuan-Desert-wintering-grassland-bird-2007-technical-report-final.pdf> (Retrieved: January 2022).
- Pap PL, Vágási CI, Vincze O, Osváth G, Veres-Száska J, Cziráj G. 2015. Physiological pace of life: the link between constitutive immunity, developmental period, and metabolic rate in European birds. Oecologia 177: 147–158. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3108-2>
- Quero AAM, Ferré DM, Zarco A, Cuervo PF, Gorla BMN. 2016. Erythrocyte micronucleus cytome assay of 17 wild bird species from the central Monte desert, Argentina. Environmental Science and Pollution Research 23 (24): 25224–25231. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7638-5>
- Rosemberg KV, Dokter AM, Blancher PJ, Sauer JR, Smith AC, Smith PA, Stanton LC, Panjabi A, Helft L, Parr M, Marra PP. 2019. Decline of the North American avifauna. Science 366 (6461): 120–124. <https://doi.org/10.1126/science.aaw1313>
- Sauer JR, Pardieck KL, Ziolkowski D, Smith AC, Hudson M-A, Rodriguez V, Berlanga H, Niven DK, Link WA. 2017. The first 50 years of the North American Breeding Bird Survey. The Condor 119 (3): 576–593. <https://doi.org/10.1650/CONDOR-17-83.1>
- Sierra-Franco D, Pereda-Solís ME, Martínez-Guerrero JH, Ruvalcaba I. 2015. Morphometric characterization of the grasshopper sparrow (*Ammodramus savaianum*) and Baird's sparrow (*Ammodramus bairdii*) during the wintering season. Open Journal of Ecology 5 (12): 574–581. <https://doi.org/10.4236/oje.2015.512048>
- Sierra-Franco D, Martínez-Guerrero JH, Pereda-Solís ME, Hennegan Strasser E. 2019. Patrón de movimientos y ámbito hogareño invernal de aves de pastizal en el noroeste de México. Biotecnia 21: 41–47. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v21i3.1010>
- Skwarska J. 2018. Variation of heterophil-to-lymphocyte ratio in the Great Tit *Parus major* – A review. Acta Ornithologica 53 (2): 103–114. <https://doi.org/10.3161/00016454AO2018.53.2.001>
- Sommer S, Buraczewska I, Kruszewski M. 2020. Micronucleus Assay: The State of Art, and Future Directions. International Journal of Molecular Science 21 (4): 1534. <https://doi.org/10.3390/ijms21041534>
- Torres-Bugarín O, Ramos-Ibarra ML, Ruíz BS, Flores GA, Zavala MG. 2014. La prueba de micronúcleos: biomarcador de contaminación genotóxica, mutagénica y/o teratogénica. In: Pacífico Mexicano. Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias, Botello AV, Páez-Osuna F, Méndez-Rodríguez L, Betancourt-Lozano M, Álvarez-Borrego S, Lara-Lara R (eds.); CIBNOR: La Paz, BCS, México, pp. 819–831.
- Zúñiga-González G, Torres-Bugarín O, Luna-Aguirre J, González-Rodríguez A, Zamora-Pérez A, Gómez-Meda BC, Ventura-Aguilar AJ, Ramos-Ibarra ML, Ramos-Mora A, Ortiz GG, Gallegos-Arreola MP. 2000. Spontaneous micronuclei peripheral blood erythrocytes from 54 animal species (mammals, reptiles, and birds): Part two. Mutation Research 467: 99–103. [https://doi.org/10.1016/s1383-5718\(00\)00021-8](https://doi.org/10.1016/s1383-5718(00)00021-8)

INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN LÁSER ROJA EN EL VIGOR DE SEMILLAS DE TOMATE AFECTADAS POR ENVEJECIMIENTO

INFLUENCE OF RED LASER RADIATION ON THE VIGOR OF TOMATO SEEDS AFFECTED BY AGING

Carlos Francisco de Jesús Rivera-Talamantes^{1*}, Alexandre Michtchenko¹, Andrei Budagovsky²,
Gabriela González-López¹, Ekaterina Grosheva²

¹ Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME-Zacatenco. Av. Instituto Politécnico Nacional S/N, Edificio 5 Tercer Piso, Ciudad de México, México. C. P. 07738.

² Michurinsk State Agrarian University. Internationalnaya Street 101, Michurinsk, Tambov Oblast, Russia. P. B. 393740.

* Autor para correspondencia: carlosrivera182mx@hotmail.com

RESUMEN

La pérdida de vigor en semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) por acción de envejecimiento es una condición normal. Este estudio proporciona una referencia futura en cuanto a las posibles aplicaciones de tratamiento con radiación láser roja en semillas de tomate antes de la siembra para mejorar el vigor de semillas envejecidas. El objetivo de este estudio fue analizar los efectos de la irradiación láser en semillas de tomate envejecidas, sobre la tasa de germinación y crecimiento. Se hipotetiza que al menos un tratamiento de irradiación láser roja podría mejorar el vigor de las semillas. Dos grupos de semillas fueron utilizadas, uno con 11 años de envejecimiento y otro con semillas envejecidas 11 años más 24 h de envejecimiento artificial. Para la radiación se utilizó un diodo láser rojo 660 nm con una potencia de 100 mW, a una densidad de radiación de 0.2 mW cm⁻², ocho tiempos de exposición a la radiación láser y un testigo como control. Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza y las medias fueron comparadas por la prueba de Tukey (HSD; $p \leq 0.05$). En semillas con 11 años de envejecimiento, el tratamiento láser a 120 s mejoró el vigor de las semillas en 125 %, a consecuencia de un aumento en el crecimiento de la radícula (167 %, $p \leq 0.05$) respecto al control (100 %). Por otro lado, el tratamiento láser a 60 s mejoró la tolerancia al estrés por envejecimiento artificial, el índice de vigor aumentó 143 % respecto al control (100 %), como consecuencia de una mejora en

ABSTRACT

The loss of vigour in tomato seeds (*Solanum lycopersicum* L.) due to aging is a normal condition. This study provides a future reference in regard to the possible applications pre-sowing of red laser radiation treatments on tomato seeds to improve the vigour of the aged seeds. The objective of the study was to analyse the effects of laser radiation on aged tomato seeds, on the rate of germination and growth. It is hypothesized that at least one treatment of red laser radiation could improve the seed vigour. Two groups of seeds were used, one with 11 years of aging and another with seeds aged 11 years plus 24 h of artificial aging. For the radiation, a red laser diode of 660 nm was used with a potency of 100 mW, at a radiation density of 0.2 mW cm⁻², eight exposure times to the laser radiation and a control. The data were subjected to an analysis of variance and the means were compared with the Tukey test (HSD; $p \leq 0.05$). In seeds with 11 years of aging, the laser treatment at 120 s improved seed vigour by 125 %, resulting from an increase in the growth of the radicle (167 %, $p \leq 0.05$) compared to the control (100 %). On the other hand, the laser treatment at 60 s improved the tolerance to stress from artificial aging, the vigour index increased 143 % compared to the control (100 %), as a result of an improvement in germination of 162 % and in the hypocotyl growth (130 %, $p \leq 0.05$), compared to the control (100 %). Red laser radiation on tomato seeds affected by natural or artificial aging can influence the processes of photo morphogenesis and increase seed vigour.

Recibido: abril, 2021. Aprobado: enero, 2022.

Publicado en *Agrociencia* 56: 61-73. 2022.

germinación del 162 % y en el crecimiento del hipocótilo (130 %, $p \leq 0.05$), respecto al control (100 %). La radiación láser roja sobre semillas de tomate afectadas por envejecimiento natural o artificial puede influir en los procesos de foto morfogénesis e incrementar el vigor de las semillas.

Palabras clave: semillas de tomate; radiación láser; mejoramiento del vigor; estímulo en longitud de radícula e hipocótilo, germinación.

INTRODUCCION

El tomate (*Solanum lycopersicum*), miembro de la familia de Solanaceae, se encuentra entre los vegetales más cultivados a nivel mundial y tiene altos valores económicos y nutricionales. En 2019, el área de siembra de tomate en todo el mundo fue de 5 millones de hectáreas, con un rendimiento de 180 millones de toneladas (FAOSTAT, 2019).

Las semillas vigorosas son un elemento clave para el éxito de un cultivo (Finch-Savage y Bassel, 2016). El vigor de la semilla es una propiedad compleja que determina su potencial para una emergencia y desarrollo rápido y uniforme en una amplia gama de condiciones de campo, depende fundamentalmente de la capacidad de resistir el almacenamiento prolongado y los efectos nocivos del envejecimiento (Rajjou *et al.*, 2012). A medida que aumenta el tiempo de almacenamiento las semillas envejecen, lo que provoca el deterioro fisiológico de las semillas (Suresh *et al.*, 2019). El vigor también se refiere al período de tiempo máximo durante el cual las semillas mantienen la viabilidad para germinar (Ku *et al.* (2014).

Para uso agrícola, las semillas envejecidas pierden funciones biológicas que disminuyen su viabilidad con el tiempo, lo que se manifiesta en un mal establecimiento del cultivo en el campo (Jacob *et al.*, 2016). Los principales impactos de la variación en el vigor de las semillas se manifiestan a través de un efecto negativo directo sobre la emergencia de las plántulas y, por lo tanto, un efecto indirecto sobre el rendimiento (Tekrony y Egli, 1991).

En el envejecimiento artificial de semillas se imita el envejecimiento a largo plazo con temperatura y humedad alta. Esto acelera el metabolismo y provoca la acumulación de alteraciones nocivas asociadas

Keywords: tomato seeds; laser radiation; improvement of vigour; stimulus in length of radicle and hypocotyl, germination.

INTRODUCTION

The tomato (*Solanum lycopersicum*), a member of the Solanaceae family, is among the most cultivated vegetables in the world and has high economic and nutritional value. In 2019, the area sown with tomato throughout the world was 5 million hectares, with a yield of 180 million tons (FAOSTAT, 2019).

Vigorous seeds are a key element for the success of a crop (Finch-Savage and Bassel, 2016). Seed vigour is a complex property that determines potential for emergence and rapid and uniform development under a wide range of field conditions; it depends fundamentally on the capacity to resist extended storage and the harmful effects of aging (Rajjou *et al.*, 2012). As storage time of the seeds increases the seeds age, which provokes the physiological deterioration of the seeds (Suresh *et al.*, 2019). Vigour also refers to the maximum period of time during which the seeds maintain viability for germination (Ku *et al.* (2014).

For agricultural use, the aged seeds lose biological functions that decrease their viability over time, which is manifested in a poor establishment of the crop in the field (Jacob *et al.*, 2016). The main impacts of the variation in seed vigour are expressed through a direct negative effect on the emergence of the seedlings, and therefore, an indirect effect on yield (Tekrony and Egli, 1991).

The artificial aging of seeds, with high temperature and humidity, imitate long-term natural aging; these conditions accelerate the metabolism and induce the accumulation of harmful alterations associated with aging (Fleming *et al.*, 2018). The artificial aging technique in seeds reproduces natural aging because, in natural and artificial aging, the same physical and chemical effects occur (Suresh *et al.*, 2019).

An important factor in the establishment of a crop is the germination of the seed. Germination is controlled by internal and external factors, such as genetics, seed structure, seed chemistry, moisture and temperature (Lei *et al.*, 2013). The capacity

con el envejecimiento (Fleming *et al.*, 2018). El envejecimiento artificial de las semillas reproduce el envejecimiento natural porque en el envejecimiento natural y artificial ocurren los mismos impactos físicos y químicos (Suresh *et al.*, 2019).

Un factor importante en el establecimiento de un cultivo es la germinación de la semilla, la germinación está controlada por factores internos y externos, como la genética, la estructura de la semilla, la química de la semilla, la humedad y la temperatura (Lei *et al.*, 2013). La capacidad de una planta para maximizar la germinación, el crecimiento y la productividad fotosintética de las semillas depende de su capacidad para detectar, evaluar y responder a la calidad, cantidad y dirección de la luz (Swathy *et al.*, 2021).

Algunos investigadores utilizan métodos físicos como la radiación láser para mejorar los procesos de germinación, crecimiento y productividad en las plantas (Ćwintal y Dziwulska-Hunek, 2013; Prośba-Białczyk *et al.*, 2013). En *Vigna radiata*, el pretratamiento de semillas con irradiación láser a $\lambda = 632.8$ nm y $\lambda = 488$ nm mejoró la longitud del hipocótilo en 22.5 y 28 % en radícula en comparación con el testigo (Janayon y Guerrero, 2019). Swathy *et al.* (2021) aplicaron tratamientos con radiación láser He-Ne en semillas de berenjena, observaron una mejora sustancial en el índice de germinación, el tiempo de germinación y el índice de vigor de la semilla respecto al control. Los tratamientos físicos como la irradiación láser en semillas antes de la siembra son ambientalmente seguros, porque solo modifican procesos bioquímicos y fisiológicos en las semillas que, en consecuencia, aceleran la emergencia de plántulas y mejoran el desarrollo de las plantas (Podlesny *et al.*, 2012).

El uso de bioestimulación láser para mejorar cultivos es una técnica que está en desarrollo. El objetivo de este estudio fue analizar los efectos de la irradiación láser roja en semillas de tomate afectadas por envejecimiento, sobre los caracteres de germinación y crecimiento inicial de plántulas, con la finalidad de mejorar y preservar el vigor de las semillas de tomate. Se hipotetiza que al menos un tratamiento de irradiación láser roja mejorará el vigor de las semillas.

of a plant to maximize germination, growth and photosynthetic productivity of the seeds depends on the capacity to detect, evaluate and respond to the quality, amount and direction of the light (Swathy *et al.*, 2021).

Some researchers utilize physical methods such as laser radiation to improve the processes of germination, growth and productivity in the plants (Ćwintal and Dziwulska-Hunek, 2013; Prośba-Białczyk *et al.*, 2013). In *Vigna radiata*, the pre-treatment of seeds with laser radiation at $\lambda = 632.8$ nm and $\lambda = 488$ nm improved the length of the hypocotyl by 22.5 and 28 % in the radicle compared to the control (Janayon and Guerrero, 2019). Swathy *et al.* (2021) applied treatments with He-Ne radiation in eggplant seeds observing a substantial improvement in the germination index, germination time and vigour index of the seed in regard to the control. The physical treatments such as laser radiation in seeds prior to sowing are environmentally safe, because only biochemical and physiological processes in the seed are modified, thus accelerating the emergence of the seedlings and improving plant development (Podlesny *et al.*, 2012).

The use of laser bio-stimulation to improve crops is a technique which is under development. The objective of this study was to analyse the effects of red laser radiation on tomato seeds affected by aging, on the characters of germination and initial growth of seedlings, with the aim of improving and preserving the vigour of the tomato seeds. It was hypothesized that at least one treatment of red laser radiation would improve the seed vigour.

MATERIALS AND METHODS

The project was developed in the bio-photonics laboratory of the Michurinsk State Agrarian University, located in the city of Michurinsk, Russia, during the month of July of 2019.

Details of the seed lot

Tomato (*Solanum lycopersicum*) seeds variety Orange were used. The seeds were supplied by Michurinsk State Agrarian University. At the start of the experiment the seeds had an age of approximately 11 years, during

MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto se desarrolló en el laboratorio de bio-fotónica de la Universidad Estatal Agraria de Michurinsk, ubicada en la ciudad de Michurinsk, Russia, durante el mes de julio del 2019.

Detalles del lote de semillas

Se utilizó la variedad de tomate (*Solanum lycopersicum*), la cual fue proporcionada por la Universidad Estatal Agraria de Michurinsk. Al iniciar el experimento las semillas tenían una edad aproximada de 11 años, durante los cuales se mantuvieron almacenadas con una temperatura media de 19 ± 4 °C y un porcentaje de humedad relativa del 25 ± 5 %. La selección de semillas fue según lo estipulado en las reglas internacionales para prueba de semillas (ISTA, 2017).

Procedimiento para inducir el envejecimiento artificial

En el procedimiento para inducir el envejecimiento artificial, se tomaron cuatro grupos de 250 semillas seleccionadas y se trataron térmicamente a 45 ± 2 °C con una humedad relativa del 100 ± 5 % durante 24 h. La temperatura era constante y la humedad controlada, de acuerdo a lo descrito por Seyyedi *et al.* (2018) y Han *et al.* (2014). Para este procedimiento se utilizó un termostato (TSO-1/80 SPU, Himmedservis, Rusia). Antes de iniciar el procedimiento se verificaron la temperatura y el porcentaje de humedad, las semillas se colocaron en cajas de Petri con una capa de papel filtro, después se pusieron dentro del termostato, posteriormente se cerró la puerta del termostato herméticamente y se mantuvo sin luz durante todo el procedimiento (24 h).

Prueba de germinación

La prueba de germinación fue en cajas Petri con tres capas de papel filtro humedecido con agua destilada (Kornarzyński *et al.*, 2018). Se utilizaron 25 semillas por caja de Petri, cuatro réplicas para cada tratamiento (Hadi *et al.*, 2018; Badran y Savin, 2018). La temperatura de germinación fue alrededor de 22 ± 5 °C, y la germinación fue con luz controlada durante el día y sin luz durante la noche (12/12 h).

Proceso de radiación láser de semillas

Antes del proceso de radiación, las semillas se sumergieron en agua desmineralizada durante 60 min. Luego se

which they had been stored with a mean temperature of 19 ± 4 °C and a percentage of relative humidity of 25 ± 5 %. Seed selection was according to what is stipulated in the international rules for seed testing (ISTA, 2017).

Procedure for inducing artificial aging

In the procedure for inducing artificial aging, four groups of 250 selected seeds were taken and thermally treated at 45 ± 2 °C with a relative humidity of 100 ± 5 % during 24 h. The temperature was constant, and humidity was controlled according to what was described by Seyyedi *et al.* (2018) and Han *et al.* (2014). For this procedure a thermostat was used (TSO-1/80 SPU, Himmedservis, Russia). Prior to initiating the procedure, the temperature and percentage of humidity were verified, and the seeds were placed in Petri dishes with a layer of paper filter, then were placed in the thermostat. Next, the door of the thermostat was hermetically closed and maintained without light throughout the procedure (24 h).

Germination test

The germination test was done in Petri dishes with three layers of filter paper moistened with distilled water (Kornarzyński *et al.*, 2018). 25 seeds were used per Petri dish, with four replications for each treatment (Hadi *et al.*, 2018; Badran and Savin, 2018). The temperature of germination was around 22 ± 5 °C, and germination was with controlled light during the day and without light during the night (12/12 h).

Process of laser radiation of seeds

Prior to the radiation process, the seeds were submerged in demineralized water during 60 min. Next, the excess water was removed, and the seeds were dried with filter paper, and the laser radiation treatments were applied. For the radiation, an experimental laser diode module was used (Figure 1-2 A), with a potency of 100 mW and wavelength of 660 nm continuous mode, at power density in the irradiation plane of 0.2 mW cm^{-2} . The radiation density was verified prior to each treatment with a potentiometer Ophir model 7Z01560 made in Israel and a filter at 1 cm^{-2} (Figure 1-2 B). Eight exposure times of exposure to radiation are proposed (1, 7.5, 15, 30, 60, 120, 240 and 480 s) and two controls without treatment (control "C" and control plus artificial aging "C.T").

During the process of laser radiation, the seeds were found in a Petri dish with a layer of filter paper,

retiró el exceso de agua y se secaron con papel filtro, y se aplicaron los tratamientos con radiación láser. Para la radiación, se utilizó un módulo diodo láser experimental (Figura 1-2-a), con una potencia de 100 mW y longitud de onda de 660 nm modo continuo, a una densidad de potencia superficial en el plano de irradiación de 0.2 mW cm⁻². La densidad de radiación fue verificada antes de cada tratamiento con un medidor de potencia Ophir modelo 7Z01560 hecho en Israel y un filtro a 1 cm (Figura 1-2-b), se proponen ocho tiempos de exposición a la radiación (1, 7.5, 15, 30, 60, 120, 240 y 480 s) y dos testigos sin tratamientos (control "C" y control más envejecimiento artificial "C.T").

Durante el proceso de radiación láser, las semillas se encontraban en una caja de Petri con una capa de papel filtro, ordenadas dentro de una superficie circular de 9 cm de diámetro. Para homogeneizar la radiación láser se colocaron en una superficie rotacional estacionaria y fueron uniformemente aceleradas (1.81 x 10⁻³ g). El tiempo de exposición a la radiación láser se definió con un software que activa un controlador que enciende el láser C, la radiación láser C, incidió sobre las semillas E, que se encontraban en una superficie giratoria F, uniformemente acelerada por un motor G, los tiempos de exposición se monitoreaban con unidad de procesamiento A) (Figura 1-1).

Cálculo del vigor

Los valores del índice de vigor se calcularon con la siguiente ecuación (Mariappan *et al.*, 2014):

ordered within a circular surface of 9 cm diameter. To homogenize the laser radiation, they were placed on a stationary rotational surface and were uniformly accelerated (1.81 × 10⁻³ xg). Exposure time to the laser radiation was defined with a software that activates a driver B that turns on the laser C, the laser radiation D impact on the seeds E that were on a rotating surface F uniformly accelerated by a motor G, the exposure times were monitored with a processing unit A (Figure 1-1). The values of the vigour index were calculated with the following equation (Mariappan *et al.*, 2014):

$$V = G(\%)*T$$

where: V is the vigour index, G is germination (%), T is total length (mm) of the seedling (hypocotyl plus radicle).

Germination

The percentage of germination was calculated based on the total number of seeds germinated at the end of the experiment and the values of the germination index were calculated with the following equation (Almutairi, 2016):

$$\text{Stimulus (\%)} = \left(\frac{G_F}{n} \right) * (100)$$

where: G_F is the total number of seeds germinated at the end of the experiment and n is the total number of seeds in the test.

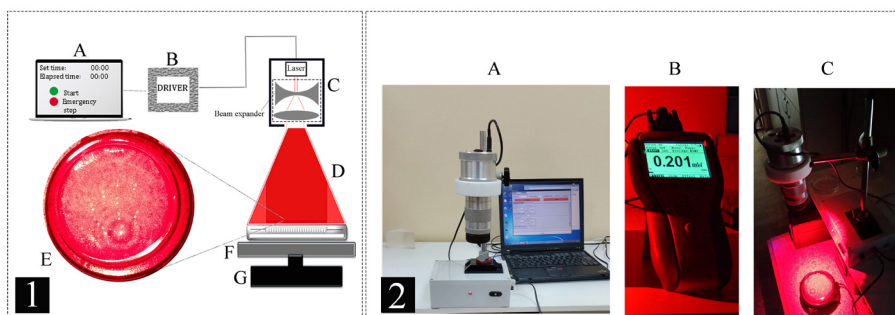


Figura 1. 1: Diagrama del proceso de radiación. A: software para definir y activar el tiempo de radiación láser, B: controlador, C: módulo láser, D: radiación láser 660 nm, E: semillas, F: motor con superficie giratoria. 2). A: Módulo láser y unidad de control. B: medidor de potencia laser con filtro de un cm, C: proceso de radiación.

Figure 1. 1: Diagram of the radiation process. A: software to define and activate the time of laser radiation, B: driver, C: laser module, D: laser radiation 660 nm, E: seeds, G: motor with F: rotational surface. 2). A: laser module and control unit, B: meter of laser power density with filter of 1 cm², C: radiation process.

$$V = G(\%)*T$$

donde: V es el índice de vigor, G es germinación (%), T es la longitud total (mm) de la plántula (hipocótilo más radícula).

Germinación

El porcentaje de germinación se calculó con base en el número total de semillas germinadas al final del experimento y los valores del índice de germinación se calcularon con la ecuación siguiente (Almutairi, 2016):

$$\text{Estímulo (\%)} = \left(\frac{G_p}{n} \right) * (100)$$

donde: G_p es el número total de semillas germinadas al final del experimento y n es el número total de semillas en la prueba.

Porcentaje de estímulo

El porcentaje de estímulo se calculó adoptando la siguiente ecuación:

$$\text{Estímulo (\%)} = \left(\frac{A_n}{A_c} \right) * (100)$$

donde: Estímulo (%) es el estímulo producido por algún tratamiento, A_n es el valor medio de un parámetro en análisis producido por algún tratamiento, A_c es el valor medio de un parámetro en análisis del grupo sin tratamiento (control).

Análisis de los datos

Para la evaluación de los efectos de estimulación provocados por la radiación láser se consideraron cuatro factores: germinación, vigor, longitud de hipocótilo y longitud de radícula. La evaluación ocurrió 11 días después de comenzar el experimento. El software STATISTICA se utilizó para procesar los datos con ANOVA y la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (HSD; $p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efectos producidos por radiación láser sobre semillas con 11 años de envejecimiento

En condiciones naturales, las semillas almacenadas durante mucho tiempo están sujetas a envejecimiento, a razón de la velocidad y magnitud del

Percentage of stimulus

The percentage of stimulus was calculated adopting the following equation:

$$\text{Stimulus (\%)} = \left(\frac{A_n}{A_c} \right) * (100)$$

where: Stimulus (%) is the stimulus produced by a given treatment, A_n is the mean value of a parameter in analysis produced by a given treatment, A_c is the mean value of a parameter in analysis of the group without treatment (control).

Analysis of the data

For the evaluation of the effects of stimulation provoked by the laser radiation, four factors were considered: germination, vigour, length of hypocotyl and length of radicle. The evaluation occurred 11 days after the start of the experiment. The software STATISTICA was used to process the data with ANOVA and the Tukey's test of multiple comparison of means (HSD; $p \leq 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

Effects produced by laser radiation on seeds with 11 years of aging

Under natural conditions, the seeds stored over a long time are subject to aging. According to the rate and magnitude of aging, the vigour and viability of the seeds are negatively affected (Huang *et al.*, 2021). The use of physical methods such as red laser radiation is an option for increasing seed vigour (Mohammadi *et al.*, 2012); the effects produced will depend on the treatment applied.

The interaction among the seeds and the eight times of exposure to the radiation tested generated some significant effects ($p \leq 0.05$; Table 1). The treatments with 120 and 480 s accelerated the dynamic of germination (Figure 2), the fourth day of evaluation showed a stimulus in germination of 100 % for 120 s and 98 ± 2 % for 480 s compared to the control (0 %). On the other hand, at day 5 the difference was reduced to 4 %, which shows that the germination levels were not significantly affected, but the velocity of germination was improved.

The treatment at 120 s of laser radiation improved seed vigour by 120 % compared to the control (C,

envejecimiento, el vigor y la viabilidad de las semillas se ven afectados negativamente (Huang *et al.*, 2021). El uso de métodos físicos como la radiación láser roja es una opción para incrementar el vigor de las semillas (Mohammadi *et al.* 2012), los efectos producidos dependerán del tratamiento aplicado. La interacción entre las semillas y los ocho tiempos de exposición a la radiación probados, generaron algunos efectos significativos ($p \leq 0.05$; Cuadro 1), Los tratamientos con 120 y 480 s aceleraron la dinámica de germinación (Figura 2), el cuarto día de evaluación mostraron un estímulo en germinación del 100 % para 120 s y 98 ± 2 % para 480 s respecto al control (0 %). Por otro lado, al día 5 la diferencia se redujo al 4 %, lo que muestra que los niveles de germinación no se afectaron significativamente, pero la velocidad de germinación si fue mejorada. El tratamiento a 120 s de radiación láser mejoró el vigor de la semilla en 126 % respecto al control (C, 100 %) y fue el tratamiento con mejores resultados (Cuadro 1).

Li *et al.* (2017), encontraron que la luz roja (640 a 660 nm) promovía la longitud del tallo, el área foliar, la sacarosa, las concentraciones de azúcar soluble y almidón, así como el número y volumen de granos de almidón en el cloroplasto del algodón (*Gossypium hirsutum*).

100 %) and was the treatment with best results (Table 1).

Li *et al.* (2017) found that the red light (640 to 660 nm) promoted stem length, leaf area, saccharose, concentrations of soluble sugar and starch, as well as the number and volume of starch grains in the chloroplast of cotton (*Gossypium hirsutum*).

The stimulating effect of red laser radiation did not generate the same impact in the radicle and hypocotyl. With the treatment at 120 s of laser radiation, growth of the radicle was significantly affected ($p \leq 0.05$), generated an elongation in the length of the radicle in 167 ± 4 % compared to the control (100 ± 9 %), and in growth of hypocotyl no significant effect was generated. The diode laser radiation 660 nm did not show significant effects in short exposure times (Table 1). Therefore, in the second part of this study (seeds affected by natural aging plus 24 h of artificial aging) the radiation times of 1, 5 and 15 s were discarded. In this first stage (seeds with 11 years of aging), the stimulus provoked by the treatments with laser radiation in the growth factor caused a multimodal behaviour with three statistically significant values at 30, 120 and 240 s A maximum value was found at 120 s (Figure 3), after this maximum value the stimulus produced by the laser radiation decreased.

Cuadro 1. Germinación, vigor, crecimiento de radícula e hipocótilo (media ± EEs) de semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad Orange con 11 años de envejecimiento, después de tratamientos por radiación láser roja.

Table 1. Germination, vigour, growth of radicle and hypocotyl (mean ± EE) of seeds of tomato (*Solanum lycopersicum*) variety Orange with 11 years of aging, after the treatments with red laser radiation.

T ^t (s)	G [‡]		V [§]		R [¶]		H [‡]	
	Media (%)	Estímulo (%)	Media índice	Estímulo (%)	Longitud (mm)	Estímulo (%)	Longitud (mm)	Estímulo (%)
C	94 ± 3.4	100.0 ± 3.7	1963.1	100.0	7.47 ± 0.7	100 ± 9	13.41 ± 1.1	100 ± 6
1	96 ± 2.3	102.2 ± 2.4	2012.6	102.5	7.43 ± 0.5	99 ± 6	13.55 ± 0.8	100 ± 5
5	98 ± 1.2	104.3 ± 1.2	2219.4	113.0	8.35 ± 0.5	112 ± 6	14.29 ± 0.8	104 ± 4
15	98 ± 1.2	104.3 ± 1.2	2033.8	103.6	7.42 ± 0.5	99 ± 6	13.33 ± 0.8	104 ± 4
30	96 ± 0	102.1 ± 0	2239.3	114.1	11.77 ± 0.8	158 ± 7 ^{††}	11.55 ± 0.8	86 ± 5
60	92 ± 0	97.9 ± 0	2061.7	105.0	9.23 ± 0.7	123 ± 8	13.18 ± 1	102 ± 6
120	100 ± 0	106.4 ± 0	2486.8	126.7	12.48 ± 0.5	167 ± 4 ^{††}	12.39 ± 0.5	88 ± 3
240	98 ± 1.2	104.3 ± 1.2	2157.1	109.9	10.48 ± 0.7	140 ± 6 ^{††}	11.56 ± 0.7	84 ± 5
480	100 ± 0	106.4 ± 0	2000.2	101.9	9.51 ± 0.5	127 ± 6	10.49 ± 0.6	75 ± 4

^tT: tiempo en segundos; [‡]G: germinación; [§]V: vigor; [¶]R: radícula; [‡]H: hipocótilo; ^{††}Diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$). ♦ ^tT: tiempo en segundos; [‡]G: germinación; [§]V: vigor; [¶]R: radícula; [‡]H: hipocótilo; ^{††}Diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$). ♦ ^tT: time in seconds; [‡]G: germination; [§]V: vigour; [¶]R: radicle; [‡]H: hypocotyl; ^{††}Statistically significant differences ($p \leq 0.05$).

El efecto estimulante de la radiación láser roja no genera el mismo impacto en radícula e hipocótilo. Con el tratamiento a 120 s de radiación láser el crecimiento de la radícula se vio afectado significativamente ($p \leq 0.05$), generó una elongación en el largo de la radícula en $167 \pm 4 \%$ comparada con el control ($100 \pm 9 \%$), y en crecimiento de hipocótilo no generó efecto significativo. La radiación láser de diodo 660 nm no mostró efectos significativos en pequeños tiempos de exposición (Cuadro 1). Por esta razón, en la segunda parte de este trabajo (semillas con envejecimiento natural más 24 h de envejecimiento artificial) se descartaron los tiempos de radiación 1, 5 y 15 s. En esta primera etapa (semillas con 11 años de envejecimiento), el estímulo provocado por los tratamientos con radiación láser en el factor crecimiento, provocaron un comportamiento multimodal con tres valores estadísticamente significativos a 30, 120 y 240 s, se encontró el valor máximo a 120 s (Figura 3), después de este valor máximo el estímulo producido por la radiación láser disminuyó.

Efectos producidos por la radiación láser en semillas con envejecimiento artificial

En germinación, el control (C.T.) mostró una germinación de $32 \pm 4.6 \%$, el tratamiento con 60 s de radiación láser generó un estímulo fuerte en la dinámica de germinación (Figura 4); y se expresó una mejora de $162 \pm 8.9 \%$ en la germinación final respecto al control 100% (Cuadro 2).

En el vigor de las semillas los mejores resultados se obtuvieron con el tratamiento 60 s de radiación láser, con una estimulación del 195% ($p \leq 0.05$), respecto al control (C.T, 100% ; Cuadro 2). Por otro lado, los tratamientos con 30 y 120 s generaron un deterioro significativo en el vigor de las semillas de más del 55% respecto al control (C.T, 100%).

En el análisis de crecimiento de la plántula, el tratamiento con 60 s de radiación láser mostró los mejores resultados, en hipocótilo generó un estímulo del 130.8% y en radícula un 111% respecto al control (C.T. 100% ; Cuadro 2). Los tratamientos con 30 y 120 s de radiación láser generaron un decremento en el crecimiento de la plántula en radícula e hipocótilo ($p \leq 0.005$).

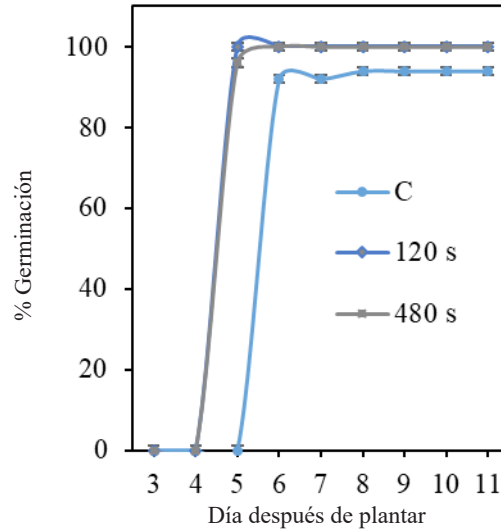


Figura 2. Estímulo en dinámica de germinación en semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad Orange con 11 años de envejecimiento natural, irradiadas con radiación láser roja (660 nm).

Figure 2. Stimulus in germination dynamic in tomato seeds (*Solanum lycopersicum*) variety Orange with 11 years of natural aging, radiated with red laser radiation (660 nm).

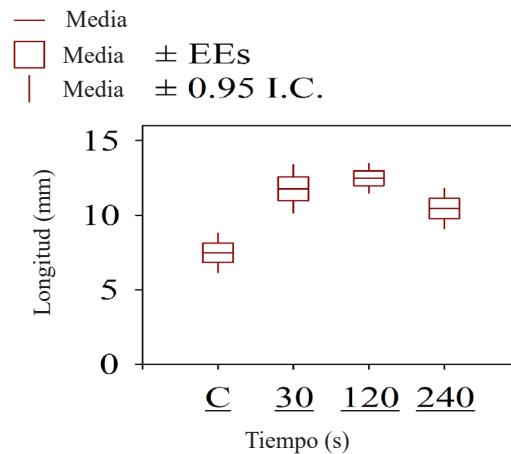


Figura 3. Efectos en crecimiento de hipocótilo y radícula de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad Orange provenientes de semillas con 11 años de envejecimiento irradiadas con radiación láser roja (660 nm). EEs: Error estándar; I.C.: intervalo de confianza. Los datos representados por C, 30, 120 y 240 s pertenecen a la parte de radícula.

Figure 3. Effects on growth of hypocotyl and radicle of tomato plants (*Solanum lycopersicum*) variety Orange from seeds with 11 years of aging radiated with red laser radiation (660 nm). EE: Standard error; I.C., confidence interval. The data represented by C, 30, 120 and 240 s pertain to the part of the radicle.

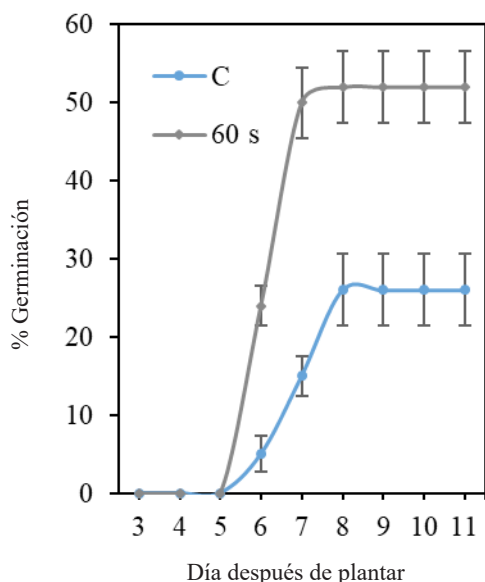


Figura 4. Estímulo en dinámica de germinación en semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad Orange con 11 años de envejecimiento más 24 h de envejecimiento artificial, irradiadas con radiación láser roja (660 nm).

Figure 4. Stimulus in germination dynamic in tomato seeds (*Solanum lycopersicum*) variety Orange with 11 years of aging plus 24 h of artificial aging, radiated with red laser radiation (660 nm).

Yang *et al.* (2012), sometieron semillas de trigo a tratamientos con radiación UV-B, el tratamiento UV-B redujo la tasa de germinación y crecimiento

Effects produced by laser radiation in seeds with artificial aging

In germination, the control (C.T.) showed a germination of $32 \pm 4.6 \%$, the treatment with 60 s of laser radiation generated a strong stimulus in germination dynamic (Figure 4); and an improvement of $162 \pm 8.9 \%$ was expressed in the final germination compared to the control 100 % (Table 2).

In seed vigour the best results were obtained with the treatment 60 s of laser radiation, with a stimulation of 195 % ($p \leq 0.05$), compared to the control (C.T., 100 %; Table 2). On the other hand, the treatments with 30 and 120 s generated a significant deterioration in seed vigour of more than 55 % compared to the control (C.T., 100 %).

In the analysis of seedling growth, the treatment with 60 s of laser radiation showed the best results; in hypocotyl it generated a stimulus of 130.8 % and in radicle, 111 % compared to the control (C.T., 100 %; Table 2). The treatments with 30 and 120 s of laser radiation generated a decrease in growth of the seedling in radicle and hypocotyl ($p \leq 0.05$).

Yang *et al.* (2012) subjected wheat seeds to treatments with radiation UV-B, the UV-B treatment reduced the rate of germination and growth significantly ($p \leq 0.05$) in regard to the control, and afterwards they used red laser radiation to reactivate the seeds,

Cuadro 2. Germinación, vigor, crecimiento de radícula e hipocótilo (media \pm EEs) de semillas tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad Orange con 11 años de envejecimiento más 24 h de envejecimiento artificial, después de tratamientos con radiación láser roja.

Table 2. Germination, vigour, growth of radicle and hypocotyl (mean \pm EE) of tomato seeds (*Solanum lycopersicum*) variety Orange with 11 years of aging plus 24 h of artificial aging, after treatments with red laser radiation.

T [†] (s)	G [‡]		V [§]		R [¶]		H ^{‡‡}	
	Media (%)	Estímulo (%)	Media índice	Estímulo (%)	Longitud (mm)	Estímulo (%)	Longitud (mm)	Estímulo (%)
C. T	32 \pm 4.6	100 \pm 14.4	944	100.0	16.2 \pm 3.5	100.0	13.3 \pm 3	100.0
C	96 \pm 2.4	300 \pm 2.5	5376	569.5	35.8 \pm 1.8	221.0	20.2 \pm 1.5	151.9
30	28 \pm 6.9	87.5 \pm 24.7	420	44.5	9 \pm 2.2	55.6 ^{††}	6 \pm 1.9	45.1 ^{††}
60	52 \pm 4.6	162.5 \pm 8.9	1840.8	195.0	18 \pm 2	111.1 ^{††}	17.4 \pm 1.9	130.8 ^{††}
120	20 \pm 6.9	62.5 \pm 37.7	292	30.9	9 \pm 2.8	55.6 ^{††}	5.6 \pm 2	42.1 ^{††}
240	36 \pm 6.9	112.5 \pm 9.5	738	78.2	13.5 \pm 2.7	80.2	7.5 \pm 1.9	56.4
480	36 \pm 2.3	112.5 \pm 6.4	802.4	106	14 \pm 2.6	86.4	8 \pm 1.6	60.2

[†]T: tiempo en segundos; [‡]G: germinación; [§]V: vigor; [¶]R: radícula; ^{‡‡}H: hipocótilo; ^{††}Diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$). ♦ [†]T: time in seconds; [‡]G: germination; [§]V: vigour; [¶]R: radicle; ^{‡‡}H: hypocotyl; ^{††}Statistically significant differences ($p \leq 0.05$).

significativamente ($p \leq 0.05$) respecto al control, y después de eso usaron radiación láser roja para reactivar las semillas, encontraron que con tratamientos de radiación láser roja es posible mitigar los efectos generados por el tratamiento UV-B 15.4 % en germinación y 60 % en crecimiento. Gao *et al.* (2018), afectaron semillas de *Arabidopsis thaliana* silvestre (ecotipo Columbia-0) con radiación UV-B, luego evaluaron los efectos de la radiación láser roja y observaron que la reparación del daño UV-B de las semillas se activa con láser He-Ne debido a la sobrerregulación de algunos genes que codifican proteínas sensibles a UV-B. Esto sugiere que la radiación láser 600 nm puede servir como opción de mejoramiento del vigor de semillas sometidas a estrés.

Los tratamientos con envejecimiento artificial utilizados en este estudio disminuyeron notablemente la viabilidad de las semillas, la germinación se redujo del 96 % al 32 %. La reducción en la germinación estuvo acompañada de una germinación retardada y no sincronizada. El tratamiento con radiación láser de 60 s mostró un estímulo en germinación (162 %) respecto al control (C.T., 100 %), en crecimiento de hipocótilo y radícula el efecto fue positivo (111 %, radícula; 130 %, hipocótilo; Cuadro 2). Una explicación alternativa e hipotética que requiere evidencia es que la radiación láser roja, mejora el porcentaje de germinación y crecimiento de las plántulas.

Los tratamientos con envejecimiento artificial (C.T.) causaron una pérdida en el vigor de las semillas muy grande en comparación con el control (C) alrededor del 470 % (Cuadro 2). Dichos resultados demostraron que el tratamiento de envejecimiento artificial funcionó. En términos de vigor en semillas afectadas por envejecimiento artificial, el tratamiento con 60 s fue mejor (195 %) que el control (C.T., 100 %; Cuadro 2). Los tratamientos a 30 y 120 s de radiación láser roja provocaron efectos negativos fuertes ($p \leq 0.05$) en crecimiento de radícula e hipocótilo, los cuales ocasionaron un decremento en el crecimiento de la plántula (Figura 5). El tratamiento de envejecimiento artificial puede provocar un cambio en la sensibilidad a la luz roja de las terminales foto sensitivas presentes en las semillas. Los tratamientos de radiación láser dan evidencia

they found that with red laser radiation treatments it is possible to mitigate the effects generated by the UV-B treatment by 15.4 % in germination and 60 % in growth.

Gao *et al.* (2018) affected seeds of wild *Arabidopsis thaliana* (ecotype Columbia-0) with UV-B radiation, and later evaluated the effects of red laser radiation, observing that the repair of the damage from UV-B of the seeds is activated with He-Ne laser due to the over-regulation of some genes that codify proteins sensitive to UV-B. This suggests that the 600nm laser radiation can serve as an option of improvement of vigour in seeds subjected to stress.

The treatments with artificial aging utilized in this study notably decreased the viability of the seeds; germination was reduced from 96 % to 32 %. The reduction in germination was accompanied by a delayed and unsynchronized germination.

The treatment with laser radiation of 60 s showed a stimulus in germination (162 %) regarding the control (C.T., 100 %), in growth of hypocotyl and radicle the effect was positive (111 %, radicle; 130 %, hypocotyl; Table 2) compared to the control (C.T., 100 %). An alternative and hypothetical explanation that requires evidence is that the red laser radiation improved the percentage of germination and growth of the seedlings.

The treatments with artificial aging (C.T.) caused a very large loss in seed vigour compared to the control (C) of around 470 % (Table 2). These results demonstrated that the treatment of artificial aging worked.

In terms of vigour in seeds affected by artificial aging, the treatment with 60 s was better (195 %) than the control (C.T., 100 %; Table 2). The treatments at 30 and 120 s of red laser radiation caused strong negative effects ($p \leq 0.05$) in growth of radicle and hypocotyl, which decreased the growth of the seedling (Figure 5). The treatment of artificial aging can cause a change in the sensitivity to red light of the photosensitive terminals which are present in the seeds.

The treatments of laser radiation gave evidence of positive effects for increasing the vigour of the seeds affected by artificial and natural aging. At the seedling level the effects are visible in

de efectos positivos para aumentar el vigor de las semillas afectadas por envejecimiento artificial y natural. A nivel de plántula los efectos son visibles en cambios morfológicos, en tanto que la magnitud y el efecto dependerá de la dosis de radiación suministrada. Es importante buscar técnicas de aplicación de la dosis de radiación, que ayuden a definir la sinergia entre los tratamientos de radiación láser roja y las semillas de tomate, que en consecuencia influyan positivamente el vigor de las semillas.

CONCLUSIONES

Los caracteres de germinación y crecimiento en semillas de tomate variedad Orange envejecidas se pueden mejorar con tratamientos de radiación láser roja. La regeneración de semillas envejecidas (11 años) se logró a partir de la sinergia entre los tratamientos de radiación láser roja y las terminales foto sensitivas de las semillas.

Los tratamientos con radiación láser roja pueden mejorar el vigor de semillas de tomate envejecidas natural o artificialmente. Este estudio demostró el uso del láser de diodo rojo (660 nm) como una herramienta potencial para mejorar la germinación y el crecimiento en plántulas de tomate provenientes de semillas de tomate variedad Orange con más de 11 años de envejecimiento natural.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Estatal Agraria de Michurinsk (laboratorio de Bio-fotónica) por facilitar sus instalaciones para la ejecución de este proyecto. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento económico y a la SEPI ESIME Zacatenco.

REFERENCIAS

- Almutairi ZM. 2016. Influence of silver nano-particles on the salt resistance of tomato (*Solanum lycopersicum*) during germination. *International Journal of Agriculture and Biology* 18 (2): 18: 449–457. <https://doi.org/10.17957/ijab/15.0114>
- Badran A, Savin i. 2018. Effect of Nano-Fertilizer on Seed Germination and First Stages of Bitter Almond Seedlings' Growth Under Saline Conditions. *BioNanoScience* 8: 742–751. <https://doi.org/10.1007/s12668-018-0531-6>.
- Ćwintal M, Dziwulska-Hunek A. 2013. Effect of electromagnetic stimulation of alfalfa seeds. *International Agrophysics* 27 (4): 391–401. <https://doi.org/10.2478/intag-2013-0009>

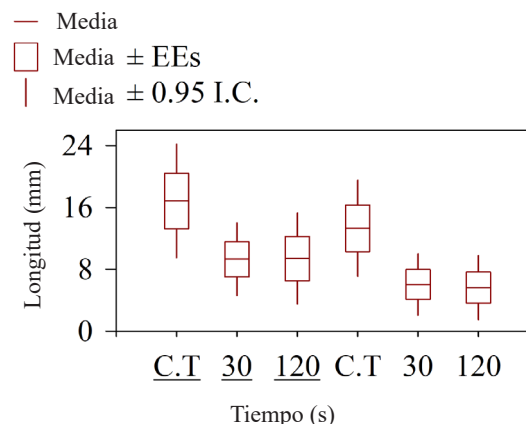


Figura 5. Efectos representativos ($p \leq 0.05$) en crecimiento de hipocótilo y radícula de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad Orange provenientes de semillas con 11 años de envejecimiento más 24 h de envejecimiento artificial irradiadas con radiación láser roja 660 nm. EE: Error estándar; I.C.: intervalo de confianza. (Los datos representados por C.T., 30, y 120 s pertenecen a la parte de radícula y C.T., 30, 120 al hipocótilo).

Figure 5. Representative effects ($p \leq 0.05$) in growth of hypocotyl and radicle of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum*) variety Orange from seeds with 11 years of aging plus 24 h of artificial aging radiated with red laser radiation 660 nm. EE: standard error; I.C.: confidence interval. (The data represented by C.T., 30 and 120 s pertain to the radicle portion and C.T., 30, 120 s, to the hypocotyl).

morphological changes, while the magnitude and the effect will depend on the dose of radiation applied. It is important to find techniques of application of the radiation dose that help to define the synergy between the red laser radiation treatments and the tomato seeds, which in consequence positively affect seed vigour.

CONCLUSIONS

The characters of germination and growth in aged seeds of tomato variety Orange can be improved with red laser radiation treatment. The regeneration of aged seeds (11 years) was achieved from the synergy between the red laser radiation treatments and the photosensitive terminals of the seeds.

The treatments with red laser radiation can improve vigour of tomato seeds aged naturally or artificially. This study demonstrated the use of the red diode laser (660 m) as a potential tool for

- FAOSTAT. 2019. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Area harvested/production Quantity.
- Finch-Savage WE, Bassel GW. 2016. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany* 67: 567–591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>
- Fleming MB, Patterson EL, Reeves PA, Richards CM, Gaines TA, Walters C. 2018. Exploring the fate of mRNA in aging seeds: protection, destruction, or slow decay?. *Journal of Experimental Botany* 69: 4309–4321. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery215>
- Gao L, Li Y, Shen Z, Rong H. 2018. Responses of He-Ne laser on agronomic traits and the crosstalk between UVR8 signaling and phytochrome B signaling pathway in *Arabidopsis thaliana* subjected to supplementary ultraviolet-B (UV-B) stress. *Protoplasma* 255: 761–771. <https://doi.org/10.1007/s00709-017-1184-y>
- Hadi S, Midhat S, Ahmed MZ, Hameed A, Khan MA, Gul B. 2018. Seed germination and seedling growth responses of toothbrush tree (*Salvadora persica* Linn.) to different interacting abiotic stresses. *Flora* 243: 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.04.002>
- Han Z, Ku L, Zhang Z, Zhang J, Guo SL, Liu H, Zhao R, Ren Z, Zhang L, Su H, Dong L, Chen Y. 2014. QTLs for seed vigor-related traits identified in maize seeds germinated under artificial aging conditions. *PLoS ONE* 9 (3): e92535. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092535>
- Huang Y, Cai S, Ruan X, Xu J, Cao D. 2021. CSN improves seed vigor of aged sunflower seeds by regulating the fatty acid, glycometabolism, and abscisic acid metabolism. *Journal of Advances Research* 33: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.01.019>
- ISTA (International Seed Testing Association). 2017. International Rules for Seed Testing Bassersdorf, Switzerland. <https://www.seedtest.org/en/home.html>.
- Jacob SR, Kumar MBA, Varghese E, Sinha SN. 2016. Hydrophilic polymer film coat as a micro-container of individual seed facilitates safe storage of tomato seeds. *Scientia Horticulturae* 204: 116–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.04.010>.
- Janayon RVB, Guerrero RA. 2019. Laser irradiation of mung bean (*Vigna radiata* L.) at two wavelengths for enhanced seedling development. *International Journal of Optics*. <https://doi.org/10.1155/2019/3479562>
- Kornarzyński K, Dziwulska-Hunek A, Kornarzyńska-Gregorowicz A, Sujak A. 2018. effect of electromagnetic stimulation of amaranth seeds of different initial moisture on the germination parameters and photosynthetic pigments content. *Scientific Reports* 8: 14023. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32305-5>
- Ku L, Cui X, Cheng F, Guo S, Qi J, Tian Z, Han T, Ren Z, Zhang L, Su H, Chen Y. 2014. Genetic dissection of seed vigour under artificial ageing conditions using two joined maize recombinant inbred line populations. *Plant Breeding* 133: 728–737. <https://doi.org/10.1111/pbr.12221>
- Lei L, Zhu X, Wang S, Zhu M, Carver BF, Yan L. 2013. TaMFT-A1 is associated with seed germination sensitive to temperature in winter wheat. *PLoS* improving the germination and growth in tomato seedlings variety Orange with more than 11 years of natural aging.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors acknowledge the Michurinsk State Agrarian University (Bio-photonics laboratory) for facilitating their installations for the execution of this project. Also, to the National Council on Science and Technology (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT) for the economic financing and to the SEPI ESIME Zacatenco.

—End of the English version—



ONE 8: e73330. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073330>

Li H, Tang C, Xu Z. 2017. Effects of different light quality on growth, photosynthetic characteristic and chloroplast ultrastructure of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 29 (2): 104–113. <https://doi.org/https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-10-1387>

Mariappan N, Srimathi P, Sundaramoorthi L, Sudhakar K. 2014. Effect of growing media on seed germination and vigor in biofuel tree species. *Journal of Forestry Research* 25: 909–913. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0484-8>

Mohammadi S, Shekari F, Fotovat R, Darudi A. 2012. Effect of laser priming on canola yield and its components under salt stress. *International Agrophysics* 26 (1). <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0007-9>

Podlesny J, Stochmal A, Podlena A, Misiak LE. 2012. Effect of laser light treatment on some biochemical and physiological processes in seeds and seedlings of white lupine and faba bean. *Plant Growth Regulation* 67: 227–233. <http://dx.doi.org/10.1007/s10725-012-9681-7>

Prośba-Białczyk U, Szajsner H, Grzyś E, Demczuk A, Sacała E, Bąk K. 2013. Effect of seed stimulation on germination and sugar beet yield. *International Agrophysics* 27 (2): 195–201. <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0085-8>

Rajjou L, Duval M, Gallardo K, Catusse J, Bally J, Job C, Job D. 2012. Seed germination and vigor. *Annual Review of Plant Biology* 63: 507–533. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105550>

Seyyedi SM, Tavakkol-Afshari R, Daneshmandi MS. 2018. The relationships between fatty acids and heterotrophic seedling growth in winter canola cultivars during accelerated seed aging process. *South African Journal of Botany* 119: 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.09.034>

Suresh A, Shah N, Kotecha M, Robin P. 2019. Evaluation of biochemical and physiological changes in seeds of *Jatropha curcas* L. Under natural aging, accelerated

- aging and saturated salt accelerated aging. *Scientia Horticulturae* 255: 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.014>
- Swathy PS, Kiran KR, Joshi MB, Mahato KK, Muthusamy A. 2021. He-Ne laser accelerates seed germination by modulating growth hormones and reprogramming metabolism in brinjal. *Scientific Reports* 11: 7948. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86984-8>
- Tekrony DM, Egli DB. 1991. Relationship of seed vigor to crop yield: a review. *Crop Science* 31: 816-822. <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100030054x>
- Walck JL, Hidayati SN, Dixon KW, Thompson K, Poschlod P. 2011. Climate change and plant regeneration from seed. *Global Change Biology* 17 (6): 2145-2161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02368.x>
- Yang L, Han R, Sun Y. 2012. Damage repair effect of He-Ne laser on wheat exposed to enhanced ultraviolet-B radiation. *Plant Physiology and Biochemistry* 57: 218-221. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.06.003>

ÁREA FOLIAR Y RENDIMIENTO DE *Physalis angulata* L. EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE POBLACIÓN Y UREA DE LIBERACIÓN LENTA

LEAF AREA AND YIELD OF *Physalis angulata* L. AS FUNCTIONS OF POPULATION DENSITY AND SLOW RELEASING UREA

Adrián Ordoñez-Monroy¹, Edgar Jesús Morales-Rosales², José Antonio López-Sandoval^{2*},
Edgar Javier Morales-Morales², Gabriela Salomón-Hernández²

¹ Facultad de Ciencias Agrícolas. Campus Universitario El Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México. C. P. 50200.

² Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento. Campus Universitario El Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México. C. P. 50200.

* Autor para correspondencia: jalopezsa@uaemex.mx

RESUMEN

En el género *Physalis* existen especies que tienen usos alimenticios, medicinales y artesanales. El tomate milpero (*Physalis angulata* L.) se cultiva en algunas localidades de Jalisco por su importancia en la elaboración de salsas. Con la hipótesis de que el manejo de la densidad de plantación y aplicación de fertilización pueden mejorar el rendimiento del cultivo de tomate. El objetivo de este estudio fue evaluar el área foliar y rendimiento de *P. angulata* L. en función de dosis de urea de liberación lenta y densidades de plantación, bajo condiciones de temporal a campo abierto. Se evaluaron nueve tratamientos, resultantes de la combinación de tres densidades de plantación y tres dosis de fertilizante. El diseño experimental fue en bloques completos al azar con arreglo factorial. Los datos se analizaron con análisis de varianza y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). La relación entre el rendimiento y las variables de estudio se estimó con regresiones lineales simples. Los resultados indicaron que con 2.5 plantas m^{-2} se obtuvo el rendimiento mayor (6.4 Mg ha^{-1}); mientras que con 140 unidades de urea de liberación lenta el rendimiento promedio fue de 5.76 Mg ha^{-1} . El efecto de interacción mostró que con las densidades de 2.0 y 2.5 plantas m^{-2} y con 120 kg de urea de liberación lenta se obtuvieron las producciones de fruto mayores, 6.44 y 6.87 Mg ha^{-1} . Por cada unidad de aumento en las variables: área foliar, índice de área foliar, número de frutos

ABSTRACT

The genus *Physalis* includes species used for food, medicinal and artisanal purposes. The wild tomato (*Physalis angulata* L.), which is common in the mixed maize cultivation called "the milpa", is cultivated in some localities of Jalisco because of its importance in the preparation of sauces. It is hypothesized that the management of planting density and fertilization application can improve the yield of this tomato. The objective of this study was to evaluate the leaf area and yield of *P. angulata* L. as a function of slow-release urea doses and planting densities, under open-field rainfed conditions. Nine treatments were evaluated, resulting from the combination of three planting densities and three fertilizer doses. The experimental design was randomized complete blocks with factorial arrangement. The data were analyzed with analysis of variance and the means of the treatments were compared with Tukey's test ($p \leq 0.05$). The relationship between yield and study variables was estimated with simple linear regressions. The results indicated that with 2.5 plants m^{-2} the highest yield was obtained (6.4 Mg ha^{-1}); while with 140 units of slow-release urea the average yield was 5.76 Mg ha^{-1} . The interaction effect showed that with densities of 2.0 and 2.5 plants m^{-2} and with 120 kg of slow-release urea, the highest fruit yields were obtained, 6.44 and 6.87 Mg ha^{-1} . For each unit increase in the variables leaf area, leaf area index, number of fruits per plant and fruit weight

Recibido: abril, 2021. Aprobado: diciembre, 2021.

Publicado en *Agrociencia* 56: 74-87. 2022.

por planta y peso de frutos por planta, se incrementó el rendimiento del fruto. El rendimiento de *P. angulata* respondió de manera diferente a las densidades de plantación y a las dosis de urea de liberación lenta. El mejor rendimiento puede obtenerse con la densidad de plantación de 2.5 plantas m² y con la aplicación de 30.4 g m² de urea de liberación lenta.

Palabras clave: crecimiento, densidad de plantación, urea de liberación lenta, tomate milpero, *Physalis angulata*, rendimiento.

INTRODUCCIÓN

Los centros de origen de la agricultura y la domesticación ayudan a la evolución de las variedades locales, sobre la base de una historia de uso y manejo de especies nativas y cultivadas (Vargas *et al.*, 2016). El género *Physalis* en México incluye plantas silvestres y domesticadas que se utilizan como medicinales, ornamentales, forrajeras, artesanales, ceremoniales, industriales, trampas vegetales y comestibles, como fruta, salsas, quelite y otros usos culinarios (Puente *et al.*, 2011; Rengifo y Vargas, 2013).

Las especies del género *Physalis* se concentran en México en la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur y la Faja Volcánica Transmexicana. *P. angulata* se distribuye en la mayor parte del país, excepto en la península de Baja California y se localiza con abundancia mayor en Jalisco, Tabasco y Chiapas (López-Sandoval *et al.*, 2015).

Physalis angulata L. es un germoplasma nativo, se siembra como hortaliza en el oeste de México (Valdivia *et al.*, 2016) y representa un cultivo alternativo al tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Hornem.) (Vargas *et al.*, 2016). Esta especie en México se conoce como tomate milpero y es una opción para la agricultura de subsistencia para pequeños productores, porque significa una fuente de ingreso económico, debido a su costoso valor comercial y sus posibilidades de cultivo en superficies agrícolas reducidas (Junior *et al.*, 2017). Este tomate de cáscara silvestre no se ha evaluado lo suficiente desde el punto de vista agronómico para aumentar sus rendimientos e incrementar su valor como cultivo hortícola.

per plant, fruit yield increased as well. The yield of *P. angulata* responded differently to planting densities and slow-release urea doses. The best yield could be obtained with the planting density of 2.5 plants m² and with the application of 30.4 g m² slow-release urea.

Keywords: growth, planting density, slow-release urea, field tomato, *Physalis angulate* L., yield.

INTRODUCTION

The centers of origin of agriculture and domestication help the evolution of local varieties, based on a history of use and management of native and cultivated species (Vargas *et al.*, 2016). The genus *Physalis* in Mexico includes wild and domesticated plants producing fruits that have medicinal, ornamental, forage, artisanal, ceremonial, and industrial use. As well as plant traps and edibles, such as fruit, sauces, *quelites* and other culinary applicabilities (Puente *et al.*, 2011; Rengifo and Vargas, 2013).

Species of the genus *Physalis* are concentrated in Mexico in the Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur and the Trans Mexican Volcanic Belt. *P. angulata* is distributed throughout most of the country, except for the Baja California peninsula, and is found in greater abundance in Jalisco, Tabasco and Chiapas (López-Sandoval *et al.*, 2015).

Physalis angulata L. is a native germplasm planted as a vegetable in western Mexico (Valdivia *et al.*, 2016), and represents an alternative crop to the husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Hornem.) (Vargas *et al.*, 2016). This wild species in Mexico is known as “milpero” tomato and it is an option for subsistence agriculture for small producers, since it represents a source of economic income, due to a high commercial value and possibilities of cultivation in reduced agricultural surfaces (Junior *et al.*, 2017). Yet, this wild tomato is not sufficiently evaluated from an agronomic point of view to increase the yield and value of the species as a horticultural crop.

The proper management of plant nutrition, through the timely application of fertilizers, is part of the production process that, in combination with other

El manejo adecuado de la nutrición vegetal, a través de la aplicación oportuna de fertilizantes, es parte del proceso de producción que en combinación con otros factores fomenta el incremento en rendimiento y la calidad de las cosechas (Ramos *et al.*, 2002). En el crecimiento y producción de *P. angulata* L. se evaluó la influencia de diferentes concentraciones de nitrógeno (N) en un sistema hidropónico. Los resultados mostraron que con el nivel más elevado de N en la solución nutritiva (224 mg L⁻¹) la altura de planta, producción de fruta, y acumulación de N total en hoja y tallo, incrementó respecto al tratamiento control (Da Silva *et al.*, 2017). En *Physalis peruviana* L. y *Physalis pubescens* L. se evaluaron cantidades de nitrógeno distintas; se observó que con 250 y 350 kg ha⁻¹ se incrementó el rendimiento de los frutos y la biomasa por planta (Junior *et al.*, 2017). Golubkina *et al.* (2018) encontraron que en el manejo orgánico de los cultivares Konditer 1 y Konditer 2 de *P. angulata* mostraron un alto potencial de rendimiento con valores de 11.3 y 11.0 Mg ha⁻¹ en ese orden; debido al aumento en biomasa de la planta que influyó en el mayor peso del fruto.

La urea como fertilizante presenta la ventaja de proporcionar un alto contenido de nitrógeno (46%), el cual es esencial en la nutrición de la planta. El inconveniente principal de este fertilizante es la pérdida de nitrógeno (N) en forma de amoníaco (NH₃), proveniente de su descomposición al aplicarla en el suelo (Morales-Morales *et al.*, 2019).

El fertilizante de liberación lenta tiene un recubrimiento o microencapsulación que lo hace diferente del fertilizante convencional. Este fertilizante revestido, es un material semipermeable, que controla la penetración del agua, libera los nutrientes más solubles que las plantas utilizan de acuerdo con sus necesidades y reduce las pérdidas por volatilización después de la fase de hidrólisis y por lixiviación luego de la nitrificación del amonio (Shavit *et al.*, 2013; Morales-Morales *et al.*, 2019).

La fertilización nitrogenada debe considerar los aspectos agronómicos y ambientales para aumentar el rendimiento de la planta y contribuir a la menor contaminación de los sistemas agrícolas y hacerlos más sostenibles (Constanza *et al.*, 2015). Los abonos de liberación lenta integran estas dos

factors, promotes increased yield and crop quality (Ramos *et al.*, 2002). The influence of different concentrations of nitrogen (N) on the growth and production of *P. angulata* L. was evaluated in a hydroponic system. The results showed that with the highest level of N in the nutrient solution (224 mg L⁻¹) plant height, fruit production, and total N accumulation in leaf and stem increased compared to the control (Da Silva *et al.*, 2017). In *Physalis peruviana* L. and *Physalis pubescens* L., different amounts of nitrogen were evaluated; it was observed that 250 and 350 kg ha⁻¹ increased fruit yield and biomass per plant (Junior *et al.*, 2017). Golubkina *et al.* (2018) found that in organic management of *P. angulata* cultivars Konditer 1 and Konditer 2 showed high yield potential with values of 11.3 and 11.0 Mg ha⁻¹ in that order; due to the increase in plant biomass that influenced the higher fruit weight.

The use of urea as a fertilizer has the advantage of providing a high nitrogen content (46%), which is essential for plant nutrition. The main drawback of this fertilizer is the loss of nitrogen (N) in the form of ammonia (NH₃), coming from decomposition when applied to the soil (Morales-Morales *et al.*, 2019).

Slow-release fertilizer has a coating or microencapsulation that makes it different from conventional fertilizer. This coated fertilizer is a semi-permeable material, which controls water penetration, releases the most soluble nutrients that plants use according to their needs and reduces losses by volatilization after the hydrolysis phase and by leaching after ammonium nitrification (Shavit *et al.*, 2013; Morales-Morales *et al.*, 2019).

Nitrogen fertilization should consider agronomic and environmental aspects to increase plant yield and contribute to less pollution of agricultural systems and make them more sustainable (Constanza *et al.*, 2015). Slow-release fertilizers integrate these two visions and the application of this type of fertilizer is expected to increase the yield of *P. angulata* under rainfed conditions.

In order to determine the plant population and the appropriate distance between individuals, detailed studies of plant growth are very useful as they allow the quantitative assessment of the duration

visiones y se espera que la aplicación de este tipo de fertilizante aumente el rendimiento de *P. angulata* a campo abierto en condiciones de temporal. Para determinar la población de plantas y la distancia apropiada entre individuos, los estudios detallados del crecimiento de los vegetales son de gran utilidad porque permiten cuantificar aspectos como: duración del ciclo, definición de las etapas de desarrollo y distribución de los fotoasimilados por órganos (Azofeifa y Moreira, 2004). El tomate de cáscara (*P. ixocarpa* Brot. ex. Hornem.) es una especie cercana a *P. angulata*, ya que pertenecen a la misma sección taxonómica; en la especie cultivada se encontró, que en condiciones de campo abierto la densidad de población adecuada es 20 750 plantas ha⁻¹ la cual se logró con hileras separadas a 1.20 m de ancho y 0.40 m entre plantas (Peña *et al.*, 2014). Esta investigación propone hallar densidades de plantación más adecuadas para el crecimiento y desarrollo del tomate de cáscara nativo, bajo la hipótesis de que el manejo de la densidad de siembra y fertilización con urea de liberación lenta pueden mejorar el rendimiento del cultivo. El objetivo del estudio fue evaluar el área foliar y rendimiento de *Physalis angulata* L. en condiciones de temporal a campo abierto, en función de la densidad de plantación y dosis diferentes de urea de liberación lenta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del sitio experimental

El ensayo se efectuó en 2018 en condiciones de temporal a campo abierto en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento, el cual se ubica en 19° 24' N, 99° 54' O, y 2611 m de altitud. El clima es templado subhúmedo, con temperatura media anual 12.8 °C. La precipitación pluvial anual es 900 mm, con lluvias en verano y menos de 300 mm de precipitación en invierno.

Manejo del cultivo

La semilla de *Physalis angulata* se sembró (6 abril 2018) en charolas de poliestireno con 200 cavidades; como sustrato turba (70%) y Agrolita® (30%). En el trasplante, el sistema radical de la plántula se sumergió en un enraizador identificado en forma comercial como Rooter QF (ácido indolbutírico, ácido indolacético, ácido naftalacético, nicotinamida y ácido fúlvico) para estimular el

of the cycle, definition of developmental stages, and distribution of photoassimilates by organs (Azofeifa and Moreira, 2004). Husk tomato (*P. ixocarpa* Brot. ex. Hornem.) is a species close to *P. angulata*, since they belong to the same taxonomic section; in the cultivated species it was found that in field conditions the adequate population density is 20 750 plants ha⁻¹, which was achieved with rows separated at 1.20 m width and 0.40 m between plants (Peña *et al.*, 2014). This research proposes to find more adequate planting densities for the growth and development of a native wild tomato, under the hypothesis that the management of planting density and fertilization with slow-release urea can improve crop yield. Then, the objective of this study was to evaluate the leaf area and yield of *Physalis angulata* L. under rainfed conditions, as a function of planting density and different doses of slow-release urea.

MATERIALS AND METHODS

Location of the experimental site

The experiment was conducted in 2018 under rainfed conditions at the Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento, which is located at 19° 24' N, 99° 54' W, and 2611 m altitude. The climate is temperate sub-humid, with average annual temperature 12.8 °C. Annual rainfall is 900 mm, with rains in summer, and less than 300 mm in winter.

Crop management

Physalis angulata seed was sown (April 6, 2018) in polystyrene trays with 200 cavities with peat (70%) and Agrolite® (30%) as substrate. At transplanting, the root system of the seedling was immersed in a rooter commercially identified as Rooter QF (indolbutyric acid, indolacetic acid, naphthalacetic acid, nicotinamide and fulvic acid) to stimulate root growth and plant adaptation to field conditions. This activity was made when plants had two pairs of expanded leaves, 35 days after planting (dds).

The initial level of nitrogen in the soil where the crop was transplanted was 0.16% of total N; this indicated medium nitrogen availability (FAO, 2013). As base fertilization in pure form, 80 kg of triple calcium phosphate (P₂O₅) and 120 kg of potassium chloride (K₂O) were applied manually at the time of transplanting (Vargas *et al.*,

crecimiento de raíces y la adaptación de la planta a las condiciones de campo. Esta actividad se efectuó cuando el vegetal tuvo dos pares de hojas expandidas, 35 días después de la siembra (dds).

El nivel inicial de nitrógeno en el suelo, donde se trasplantó el cultivo, fue de 0.16% de N total; esto indica que su nivel de disponibilidad es mediano (FAO, 2013). Se aplicó como fertilización base en forma pura, 80 kg de fosfato de calcio triple (P_2O_5) y 120 kg de cloruro de potasio (K_2O) al momento del trasplante, de forma manual (Vargas *et al.*, 2016). Para prevenir la incidencia de hongos se asperjó Mancozeb 80% PH en dosis de 1 kg ha⁻¹ cada 7d, el control de maleza fue manual.

Diseño experimental y variables evaluadas

Para contrastar los tratamientos se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones en arreglo factorial que incluyó como tratamientos tres densidades de plantación: 3.3, 2.5 y 2.0 plantas m⁻² y tres niveles de nitrógeno: 21.7, 26.1 y 30.4 g m⁻², como fuente la urea de liberación lenta (46% N) equivalentes a 100, 120 y 140 unidades de nitrógeno ha⁻¹.

Cada unidad experimental (tratamiento) constó de 5 surcos. La distancia entre surco y surco fue de 1 m. La distancia entre plantas fue de 0.30 m, 0.40 m y 0.50 m, para cada una de las densidades de plantación. Cada tratamiento consistió en una parcela de 10 m² (5 × 2 m), donde la parcela útil fue de 3 m² (3 × 1 m).

El periodo de cosecha se inició a los 99d después del trasplante (ddt) hasta los 120ddt, cuando se efectuaron cuatro cortes y en cada uno se tomó una muestra de cinco plantas por tratamiento, para evaluar las siguientes variables. Área foliar (AF, cm²) se estimó con un integrador marca LI-COR 3100 (Lincoln, Nebraska, USA) sin incluir el pecíolo. Índice de área foliar (IAF) se calculó con el AF, la densidad de plantas m⁻² (DP) y el área sembrada (AS), con la relación:

$$IAF = \frac{(AF)(DP)}{AS}$$

Además, en cada uno de los cortes se contó el número de frutos por planta (NFP), el peso de fruto (PF, g) y el rendimiento (REN, Mg ha⁻¹). Todas las variables evaluadas se sumaron en cada uno de los cortes en el periodo de cosecha.

2016). To prevent fungal incidence, Mancozeb 80% PH was sprayed at a dose of 1 kg ha⁻¹ every 7d, and weed control was manual.

Experimental design and variables evaluated

To contrast the treatments, a randomized complete block design was used with four replications in a factorial arrangement that included three planting densities as treatments: 3.3, 2.5 and 2.0 plants m⁻² and three nitrogen levels: 21.7, 26.1 and 30.4g m⁻², as a source of slow-release urea (46% N) equivalent to 100, 120 and 140 units of nitrogen ha⁻¹.

Each experimental unit (treatment) consisted of 5 furrows. The distance between furrows was 1m. The distance between plants was 0.30m, 0.40m and 0.50m, for each of the planting densities. Each treatment consisted of a plot of 10m² (5×2m), where the useful plot was 3m² (3×1m).

The harvest period started at 99d after transplanting (ddt) until 120ddt, when four cuttings were made and samples of five plants per treatment were taken to evaluate the following variables. Leaf area (AF, cm²) was estimated with a LI-COR 3100 integrator (Lincoln, Nebraska, USA) without including the petiole. Leaf area index (IAF) was calculated with the AF, plant density m⁻² (DP) and area sown (AS), with the ratio:

$$IAF = \frac{(AF)(DP)}{AS}$$

In addition, the number of fruits per plant (NFP), fruit weight (PF, g) and yield (REN, Mg ha⁻¹) were recorded for every sample. All the variables evaluated were added for each of the cuttings during the harvest period to obtain a cumulative value in the end.

Statistic analysis

With the data collected, an analysis of variance was performed; where statistical variation was detected, the Tukey test for comparison of means ($p \leq 0.05$) was performed in SAS® (SAS Institute, 2004). In the case of the interaction, Tukey's test was applied as follows:

$$Tukey = q_t Nt \alpha \sqrt{\frac{CME}{n}}$$

Análisis estadístico

Con los datos recopilados se efectuó el análisis de varianza y donde hubo variación estadística se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) en el programa SAS (SAS Institute, 2004). En el caso de la interacción, la prueba de Tukey se aplicó así:

$$Tukey = q_r Nt \alpha \sqrt{\frac{CME}{n}}$$

donde N es el número total de observaciones, t número de niveles del factor, n tamaño de muestra de cada nivel del factor, CME cuadrado medio del error, $q_r Nt$ distribución en el intervalo de Student de las variables en t grupos y $N-t$ grados de libertad, con a probabilidad de error.

Para explicar el incremento en el REN y las variables AF, IAF y NFP se estimaron las rectas de regresión lineal correspondientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

Las diferencias entre la densidad de plantación (D) y urea de liberación lenta (U) fueron significativas en todas las variables, excepto en número de frutos por planta para el factor (U). La interacción D×U fue significativa en el área foliar y rendimiento de fruto. Los coeficientes de variación fueron bajos y oscilaron entre 3.02 y 4.79% para peso de fruto y rendimiento (Cuadros 1 y 2).

Densidad de plantación

El número de plantas ha^{-1} determina la superficie foliar de las plantas cultivadas. El área foliar es un parámetro indispensable para determinar índices de crecimiento y predecir la producción de biomasa, la eficiencia en el uso de la radiación y el potencial de rendimiento (Ali and Singh, 2017).

En esta investigación para *P. angulata* la densidad de plantación influyó en el rendimiento de fruto, con 2.5 plantas m^{-2} se logró una producción de 6.41 Mg ha^{-1} , lo cual se debió al mayor promedio en las variables IAF y NFP (Cuadro 1). López-Sandoval *et al.* (2018) encontraron resultados similares cuando evaluaron la tasa de asimilación neta en genotipos silvestres de *Physalis* en dos localidades en el

where N is the total number of observations, t is the number of factor levels, n is the sample size of each factor level, CME is the mean square of the error, $q_r Nt$ is the Student's interval distribution of the variables in the t groups and $N-t$ degrees of freedom, with a probability of error.

To explain the increase in REN and the variables AF, IAF and NFP, the corresponding linear regression were estimated.

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of variance

The differences between planting density (D) and slow-release urea (U) were significant for all variables, except number of fruits per plant for the factor (U). The D×U interaction was significant for leaf area and fruit yield. Coefficients of variation were low and ranged from 3.02 to 4.79% for fruit weight and yield (Tables 1 and 2).

Planting density

The number of plants ha^{-1} determines the leaf area of the cultivated plants. Leaf area is a key variable for determining growth indices and predicting biomass production, radiation use efficiency and yield potential (Ali and Singh, 2017).

In this research for *P. angulata*, planting density influenced fruit yield; with 2.5 plants m^{-2} a production of 6.41 Mg ha^{-1} was achieved, which was due to the higher average in IAF and NFP variables (Table 1). López-Sandoval *et al.* (2018) found similar results when they evaluated the net assimilation rate in wild genotypes of *Physalis* in two locations in the State of Mexico, *P. angulata* achieved on average a fruit production of 6.04 Mg ha^{-1} .

In another research, yield and fruit quality of *P. angulata* were estimated at a density of 2.5 plants m^{-2} , where cultivars 'Violet', 'Karolek', 'Lakomka', 'Lezhhy', 'Konditer 1' and 'Konditer 2' reached yields that fluctuated between 7.7 ('Lezhky') and 11.3 Mg ha^{-1} ('Konditer 1') (Golubkina *et al.*, 2018). Jimenez *et al.* (2012) stated that the factors contributing to low yields in the cultivation of wild species of the genus *Physalis* are the use of genotypes with little genetic improvement. The

Cuadro 1. Análisis de varianza y prueba de medias de las variables área foliar (AF), índice de área foliar (IAF), número de frutos por planta (NFP), peso de fruto (PF) y rendimiento de fruto (REN), para los factores densidad de plantación (D) y urea de liberación lenta (U) en *Physalis angulata*. Verano 2018.

Table 1. Analysis of variance and comparison of means for the variables leaf area (AF), leaf area index (IAF), number of fruits per plant (NFP), fruit weight (PF) and fruit yield (REN), for the factors planting density (D) and slow-release urea (U) in *Physalis angulate*, Summer 2018.

Factor (variable independiente)	AF (cm ²)	IAF	NFP	PF (g)	REN (Mg ha ⁻¹)
Densidad de plantación (D)	†	†	†	†	†
D1 (3.3 m ⁻²)	1885 c	0.62 c	48.4 b	2.80 c	4.48 c
D2 (2.5 m ⁻²)	4926 b	1.23 a	60.44 a	4.23 b	6.41 a
D3 (2.0 m ⁻²)	5721 a	1.14 b	62.11 a	4.49 a	5.58 b
Tukey ($p \leq 0.05$)	202.5	0.05	4.27	0.19	0.42
Urea de liberación lenta (U)	†	†	ns	†	†
U1 (100 kg ha ⁻¹)	3868 b	0.93 c	55.22 a	3.70 b	5.11 b
U2 (120 kg ha ⁻¹)	4232 a	1.01 b	58.44 a	3.83 ab	5.60 a
U3 (140 kg ha ⁻¹)	4431 b	1.06 a	57.33 a	4.00 a	5.76 a
Tukey ($p \leq 0.05$)	202.5	0.05	4.27	0.19	0.42
D×U	¶	ns	ns	ns	¶
CV (%)	3.04	3.03	4.70	3.02	4.79

Valores medios de tratamientos con letra diferente en una columna dentro de cada factor de estudio indican diferencia estadística ($p \leq 0.05$). CV: coeficiente de variación. Diferencias estadísticas con † $p \leq 0.01$, ¶ $p \leq 0.05$ y ns, sin diferencia estadística. D×U= interacción entre densidad de plantación y urea de liberación lenta. ♦ Mean values of treatments with different letter per column within each study factor indicate statistical difference ($p \leq 0.05$). CV: coefficient of variation. Statistical differences at † $p \leq 0.01$, ¶ $p \leq 0.05$ and ns, no statistical difference. D×U= interaction between planting density and slow-release urea.

Cuadro 2. Análisis de variancia de las variables área foliar (AF), índice de área foliar (IAF), número de frutos planta⁻¹ (NFP), peso de fruto (PF) y rendimiento de fruto (REN), para los factores densidad de plantación (D) y urea de liberación lenta (U) en *Physalis angulata*. Verano de 2018.

Table 2. Analysis of variance of the variables leaf area (AF), leaf area index (IAF), number of fruit plant⁻¹ (NFP), fruit weight (PF) and fruit yield (REN), for the factors planting density (D) and slow-release urea (U) in *Physalis angulate*, Summer 2018.

Fuente de variación	GL	AF (cm ²)	IAF	NFP	PF (g)	REN (Mg ha ⁻¹)
Bloques	3	3774090 ^{ns}	0.201 ^{ns}	39.92 ^{ns}	0.312 ^{ns}	2.043 [¶]
Urea de liberación lenta (U)	2	6584200 [†]	0.350 [†]	31.94 ^{ns}	0.625 [†]	1.303 [†]
Densidad de plantación (D)	2	98377000 [†]	2.606 [†]	1335.93 [†]	19.716 [†]	22.479 [†]
U×D	4	6546970 [¶]	0.233 ^{ns}	118.55 [†]	0.141 ^{ns}	1.288 [¶]
Error experimental	24	14007700	0.748	119.17	1.322	2.728
Total	35	121190000	4.068	1698.52	21.518	28.441

Diferencias estadísticas con † $p \leq 0.01$, ¶ $p \leq 0.05$; ns, sin diferencia estadística. ♦ Statistical differences at † $p \leq 0.01$, ¶ $p \leq 0.05$; ns, no statistical difference.

Estado de México, *P. angulata* logró en promedio una producción de fruto de 6.04 Mg ha⁻¹.

En otra investigación, se estimó el rendimiento y calidad de fruto de *P. angulata* en densidad de 2.5 plantas m⁻², donde los cultivares 'Violet', 'Karolek', 'Lakomka', 'Lezhhy', 'Konditer 1' y 'Konditer 2' presentaron rendimientos que fluctuaron entre 7.7 ('Lezhky') y 11.3 Mg ha⁻¹ ('Konditer' 1) (Golubkina *et al.*, 2018). Jiménez *et al.* (2012) afirmaron que los factores que contribuyen a los rendimientos bajos en el cultivo de especies silvestres del género *Physalis*, son el uso de genotipos con proceso escaso de mejora genética. La gran diversidad de especies silvestres de *Physalis* que existen en México, como *P. angulata* ofrece una oportunidad de estudios agronómicos, para la adaptación de esta especie y el aprovechamiento de este material genético cada vez más valorado, lo cual puede incrementar su rendimiento y diversificar las fuentes de alimentación (Cobaleda *et al.*, 2013).

Otro estudio efectuado por Ponce *et al.* (2012) donde valoraron el efecto de la densidad de plantación y poda en tomate de cáscara (*P. ixocarpa*) en condiciones de invernadero, descubrieron que el rendimiento de fruto fue de 10.6 Mg ha⁻¹ con una densidad de plantación de 18 plantas m⁻². En Rusia, en condiciones de campo abierto en *P. ixocarpa* obtuvieron 0.0058 Mg ha⁻¹ de fruto con una densidad de población de 4 plantas m⁻² (Naumova *et al.*, 2019). La tendencia de los estudios anteriores indica que en la especie cultivada *Physalis ixocarpa*, a mayor densidad de población se obtiene incremento en el rendimiento. En *Physalis angulata*, el objeto de esta investigación hubo un incremento del rendimiento en la densidad de plantación intermedia.

Urea de liberación lenta

Los fertilizantes de liberación lenta o controlada suministran los nutrientes a la planta de forma prolongada en el tiempo. Esto permite reducir el número de aplicaciones y unidades de fertilizantes. Se mantienen niveles adecuados de nitrógeno en el suelo durante todo el ciclo de desarrollo de la planta, se minimizan las pérdidas y se evita el exceso o defecto que caracteriza a otras formas de aplicación más tradicionales (Morales-Morales *et al.*, 2019).

great diversity of wild *Physalis* species existing in Mexico such as *P. angulata* offers an opportunity for agronomic studies, for the adaptation of this species and the use of increasingly valued genetic material, which can increase yield as well, diversifying food sources (Cobaleda *et al.*, 2013).

Another study conducted by Ponce *et al.* (2012), where they assessed the effect of planting and pruning density on husk tomato (*P. ixocarpa*) under greenhouse conditions, found that fruit yield was 10.6 Mg ha⁻¹ with a planting density of 18 plants m⁻². In Russia, they obtained 0.0058 Mg ha⁻¹ of fruit with a stocking density of 4 plants m⁻² (Naumova *et al.*, 2019) in *P. ixocarpa* under open field conditions. Previous studies indicated a trend in the cultivated species *Physalis ixocarpa*, the higher the population density, the higher the yield increased. In *Physalis angulata*, the subject of this research, there was an increase in yield with the intermediate planting density.

Slow-release urea

Slow or controlled release fertilizers supply nutrients to the plant over an extended period of time. This allows reducing the number of applications and fertilizer units. Adequate levels of nitrogen are maintained in the soil throughout the plant development cycle; therefore, losses are minimized, also excess or deficiency, which are characteristic in other more traditional forms of application, is avoided (Morales-Morales *et al.*, 2019).

In *P. angulata*, an increase in yield would be explained by the increase in slow-release urea. With the application of 26.1g m⁻² urea (120kg N ha⁻¹) and 30.4g m⁻² (140kg ha⁻¹), respective yield values of 5.6 Mg ha⁻¹ and 5.76 Mg ha⁻¹ were obtained (Table 1). In the first case, the NFP was influenced by NFP, and in the second by PF. With an increase in NFP and PF, yield increased (Table 1). López-Sandoval *et al.* (2018) added 200 kg N ha⁻¹ of conventional urea to different *Physalis* species and found that yield ranged between 2.73 Mg ha⁻¹ (*P. microcarpa*) and 14.73 Mg ha⁻¹ (*P. ixocarpa*). In this study, it was also observed that *P. angulata* produced 7.1 Mg ha⁻¹ of fruit in Texcoco, Mexico (López *et al.*, 2018). Silva *et al.* (2015) found in Colombia that the yield

En *P. angulata* se favoreció un aumento en el rendimiento que se podría explicar por el incremento de la urea de liberación lenta. Con la aplicación de 26.1 g m⁻² de urea (120 kg N ha⁻¹) y 30.4 g m⁻² (140 kg ha⁻¹) se obtuvieron valores de rendimiento respectivos de 5.6 Mg ha⁻¹ y 5.76 Mg ha⁻¹ (Cuadro 1). En el primer caso influyó el NFP y en el segundo el PF. Con el aumento en el NFP y el PF se incrementa el rendimiento (Cuadro 1). López-Sandoval *et al.* (2018) adicionaron 200 kg N ha⁻¹ de urea convencional a especies diferentes de *Physalis* y encontraron que la amplitud del nivel de producción estuvo entre 2.73 Mg ha⁻¹ (*P. microcarpa*) y 14.73 Mg ha⁻¹ (*P. ixocarpa*). En este estudio, también se observó que *P. angulata* produjo 7.1 Mg ha⁻¹ de fruto en Texcoco, México (López *et al.*, 2018). Silva *et al.* (2015) encontraron en Colombia que la producción de *P. peruviana* (uchuva) en respuesta a dosis de fertilización nitrogenada fue 3.01, 3.48 y 4.49 Mg ha⁻¹ con 80, 150 y 300 kg de urea ha⁻¹, en ese orden; un rendimiento inferior comparado con *P. angulata* en este estudio. En otro estudio sobre la demanda de nitrógeno en *Physalis ixocarpa* se observó que para obtener el rendimiento de 2.16 kg de fruto por planta, la demanda de nitrógeno es de 8.03 g en la biomasa aérea total, lo cual equivale a 3.71 kg de N por Mg de fruto fresco (Castro-Brindis *et al.*, 2004). En otra investigación, al evaluar diferentes fuentes de fertilizantes nitrogenados en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) se encontró que los abonos orgánicos ocasionaron cambios en la porosidad del suelo, produciendo lixiviación de nitrógeno. Los fertilizantes de rápida liberación (nitrato de calcio y sulfato de amonio) obtuvieron mejor comportamiento en masa seca foliar, nitrógeno foliar y eficiencia aparente de recuperación, mientras que los fertilizantes de lenta liberación (urea recubierta, lombricompost y gallinaza) lo hicieron en las propiedades del suelo, la eficiencia interna de utilización y el uso eficiente del agua (Daza-Torres *et al.*, 2018). La fertilización de liberación lenta indica aumento en los rendimientos de especies cultivadas y silvestres, como se demuestra en esta investigación con el tomate milpero nativo *P. angulata*.

of *P. peruviana* (cape gooseberry) in response to nitrogen fertilization doses was 3.01, 3.48 and 4.49 Mg ha⁻¹ with 80, 150 and 300 kg of urea ha⁻¹, in that order; a lower yield compared to *P. angulata* in this study. In another study on nitrogen demand in *Physalis ixocarpa*, it was observed that in order to obtain a yield of 2.16kg of fruit per plant, the nitrogen demand was 8.03g in the total aerial biomass, which is equivalent to 3.71kg of N per Mg of fresh fruit (Castro-Brindis *et al.*, 2004).

In another research, when evaluating different sources of nitrogen fertilizers in basil (*Ocimum basilicum* L.), it was found that organic fertilizers caused changes in soil porosity, producing nitrogen leaching. Fast-release fertilizers (calcium nitrate, and ammonium sulfate) performed better for foliar dry mass, foliar nitrogen and apparent recovery efficiency; whereas slow-release fertilizers (coated urea, vermicompost, and poultry manure) did so for soil properties, with efficiency in nutrient utilization and water use (Daza-Torres *et al.*, 2018). Slow-release fertilization promotes increased yields in cultivated and wild species, as it was demonstrated in this research with the native milpero tomato *P. angulata*.

Interaction of planting density with slow-release urea (D×U)

The use of two factors to increase crop yield, in this case planting densities and doses of slow-release urea, is an alternative to generate greater growth and quantity of photo-assimilates by the species (Morales-Morales *et al.*, 2019). With the density of 2 plants m⁻² (D3) and 140 nitrogen units per hectare, the largest leaf area was attained with 6036 cm² per plant (Figure 1). In cape gooseberry (*P. peruviana*), leaf area is an indicator of higher photosynthetic activity, which is expressed in a higher yield (Aguilar-Carpio *et al.*, 2018). It is likely that higher values in both leaf number and leaf area are the result of greater nutrient availability, which favors growth and biomass production (Hawkesford *et al.*, 2012).

Interacción de la densidad de plantación con la urea de liberación lenta (D×U)

El uso de dos factores para incrementar el rendimiento de los cultivos, en este caso densidades de plantación y dosis de urea de liberación lenta, es una alternativa para generar mayor crecimiento y cantidad de fotoasimilados por las especies (Morales-Morales *et al.*, 2019). Con la densidad de 2 plantas m⁻² (D3) y 140 unidades de nitrógeno por hectárea se logró la mayor superficie foliar con 6036 cm² planta⁻¹ (Figura 1). En uchuva (*P. peruviana*) el área foliar es indicador de mayor actividad fotosintética, la cual se refleja en un mayor rendimiento (Aguilar-Carpio *et al.*, 2018). Es probable que los valores mayores tanto en número de hojas como en área foliar sean resultado de mayor disponibilidad nutrimental, lo cual favorece el crecimiento y la producción de biomasa (Hawkesford *et al.*, 2012). La dosis de nitrógeno aplicada a cada densidad de plantación influyó en forma directa en el rendimiento de fruto (Figura 2). En las densidades D2 y D3 con 120 kg N ha⁻¹ se alcanzaron los rendimientos máximos 6.44 y 6.87 Mg ha⁻¹, lo cual sugiere que esa cantidad de urea de liberación lenta y con

The dose of nitrogen applied at each planting density directly influenced fruit yield (Figure 2). At densities D2 and D3 with 120 kg N ha⁻¹, the maximum yields 6.44 and 6.87 Mg ha⁻¹ were obtained, suggesting that this amount of slow-release urea and at those planting densities were adequate. When evaluating yield in different *Physalis* species, López-Sandoval *et al.* (2018) found that with densities of 4.2 plants m⁻² with 200kg N ha⁻¹ (in the form of conventional urea) in Texcoco, Mexico a maximum of 7.0 Mg ha⁻¹ was obtained in *Physalis angulata*. Silva *et al.* (2015) reported 4.49 Mg ha⁻¹ in *Physalis peruviana*, where the best treatment was 300 (N)-150 (P)-300 (K), with 1.6 plants per m² in the Altiplano de Pasto, Colombia.

Relationship between yield and the variables leaf area, leaf area index, number of fruits per plant and fruit weight

Vegetative and reproductive growth in cape gooseberry (*P. peruviana* L.) develops during most of the life cycle simultaneously, therefore, leaf traits such as leaf area and leaf area index are important in the photosynthetic action of the plant, which is

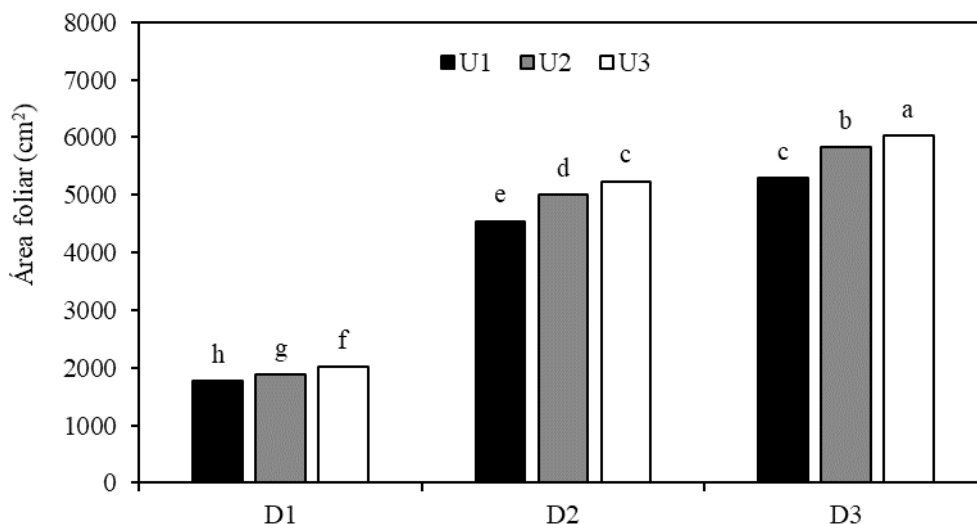


Figura 1. Área foliar de *Physalis angulata* en respuesta a la interacción densidad de plantación y dosis de liberación lenta (D×U) en el verano 2018. Medias con literal diferente indican diferencia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$). D, densidad de plantación. (D1: 3.3 m⁻²; D2: 2.5 m⁻²; D3: 2.0 m⁻²). U, urea de liberación lenta (U1: 100 kg ha⁻¹; U2: 120 kg ha⁻¹; U3: 140 kg ha⁻¹).

Figure 1. Leaf area of *Physalis angulata* in response to the interaction planting density and slow-release urea (D×U) dose during Summer 2018. Means with different literals indicate statistical difference (Tukey, $p \leq 0.05$). D, planting density. (D1: 3.3 m⁻²; D2: 2.5 m⁻²; D3: 2.0 m⁻²). U, slow-release urea (U1: 100 kg ha⁻¹; U2: 120 kg ha⁻¹; U3: 140 kg ha⁻¹).

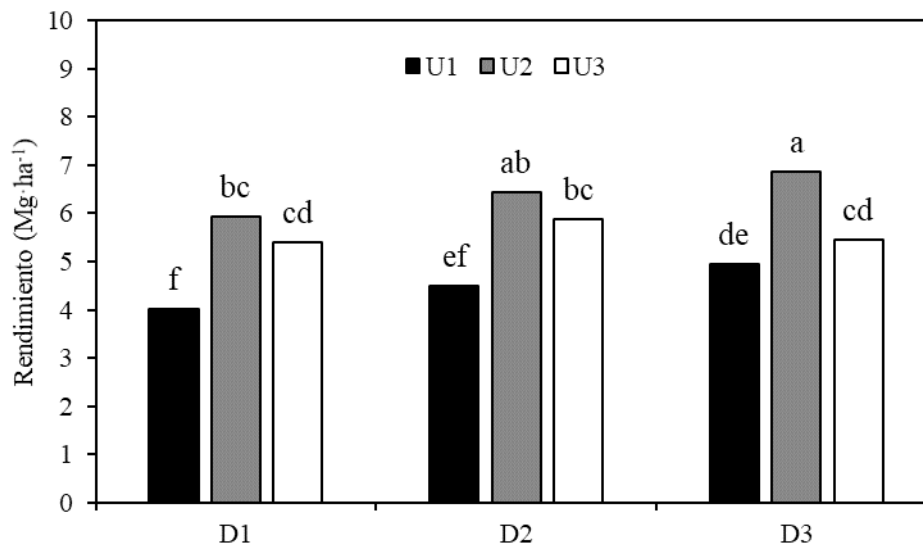


Figura 2. Rendimiento de fruto de *Physalis angulata* en respuesta a la interacción entre densidad de plantación y dosis de urea de liberación lenta (D×U) durante el verano 2018. Medias con literal distinta indican diferencia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$). D, densidad de plantación (D1: 3.3 m²; D2: 2.5 m²; D3: 2.0 m²). U, urea de liberación lenta (U1: 100 kg ha⁻¹; U2: 120 kg ha⁻¹; U3: 140 kg ha⁻¹).

Figure 2. Fruit yield of *Physalis angulata* in response to the interaction between planting density and slow-release urea (D×U) dose during Summer 2018. Means with different literals indicate statistical difference (Tukey, $p \leq 0.05$). D, planting density (D1: 3.3 m²; D2: 2.5 m²; D3: 2.0 m²). U, slow-release urea (U1: 100 kg ha⁻¹; U2: 120 kg ha⁻¹; U3: 140 kg ha⁻¹).

esas densidades de plantación es la adecuada. López-Sandoval *et al.* (2018) al evaluar el rendimiento en diferentes especies de *Physalis* encontraron que con densidades de 4.2 plantas m² con 200 kg N ha⁻¹ (en forma de urea convencional) en Texcoco, México se logró un máximo de 7.0 Mg ha⁻¹ en *Physalis angulata*. Silva *et al.* (2015) reportaron 4.49 Mg ha⁻¹ en *Physalis peruviana*, donde el tratamiento mejor fue 300 (N)-150 (P)-300 (K), con 1.6 plantas por m² en el Altiplano de Pasto, Colombia.

Relación entre el rendimiento y las variables área foliar, índice de área foliar, número de frutos por planta y peso de fruto.

El crecimiento vegetativo y reproductivo en uchuva (*P. peruviana* L.) se desarrolla durante la mayor parte del ciclo de vida de manera simultánea, por ello, los rasgos foliares como la superficie de la hoja y el índice de área foliar son importantes en la acción fotosintética de la planta, lo cual se refleja en mayor rendimiento del cultivo (Ali and Singh, 2017).

reflected in higher crop yield (Ali and Singh, 2017). In this study on *P. angulata*, the regression lines between yield and leaf area (0.55) and leaf area index (0.79) obtained (Figures 3A and 3B) show significant coefficients of determination. The REN=1397.6 (FA)-3498.3 indicates that for each unit increased in yield the amount of AF increased by 2100.7 (cm²). These figures show that as leaf area increases, leaf area index increases, and as a consequence fruit yield also increases. López-Sandoval *et al.* (2018) found a positive trend between leaf area and fruit yield in species other than *Physalis*; because as the value in leaf area increased, fruit yield also increased. Fischer *et al.* (2014) reported that there was an increase in fruit yield in *P. peruviana* due to a higher length development of branches and consequently a high leaf area index (IAF of 8) under greenhouse conditions.

The regression lines between yield and fruit number (0.70) and fruit weight (0.64) obtained (Figures 3C and 3D) show significant coefficients of

En este estudio con *P. angulata*, las rectas de regresión entre el rendimiento y área foliar (0.55) e índice de área foliar (0.79) presentadas en las Figuras 3(A) y 3(B) muestran un coeficiente de determinación significativo. El $REN=1397.6 (AF)-3498.3$ indica que por cada unidad de aumento del rendimiento la cantidad de AF se incrementa en 2100.7 (cm^2). En estas figuras se observa que a medida que se incrementa el área foliar, crece el índice de área foliar, y como consecuencia el rendimiento del fruto aumenta. López-Sandoval *et al.* (2018) encontraron una tendencia positiva entre el área foliar y la producción de fruto en especies distintas de *Physalis*; porque al aumentar el valor en el área foliar, también incrementaba el rendimiento de fruto. En este sentido, Fischer *et al.* (2014) informaron que existe un aumento en la producción de frutos en *P. peruviana* debido a un desarrollo longitudinal mayor de ramas y por consiguiente un alto índice de área foliar (IAF de 8) bajo condiciones de invernadero.

determination. The $REN=0.69 (FP)+0.073$ indicates that for each unit increased in yield, the amount of PF increased by 0.763 (g). In those figures, it is observed that as the value of these variables increased the yield also increased. Golubkina *et al.* (2018) confirmed the yield increase with the increase in the number and weight of fruits, observing that in *P. angulata* with 53 fruits and 8g per plant, the cultivar 'Konditer 1' expressed maximum yield, 11.3 $Mg ha^{-1}$.

CONCLUSIONS

The milpero tomato (*Physalis angulata*) obtained the highest yield with the maximum application of slow-release urea. The highest yield was obtained at a planting density of 2.5 plants m^{-2} . Leaf area, leaf area index, number of fruits per plant and fruit weight per plant positively affected yield. For each unit of increase in these variables, an increase in fruit yield was obtained. The regression lines

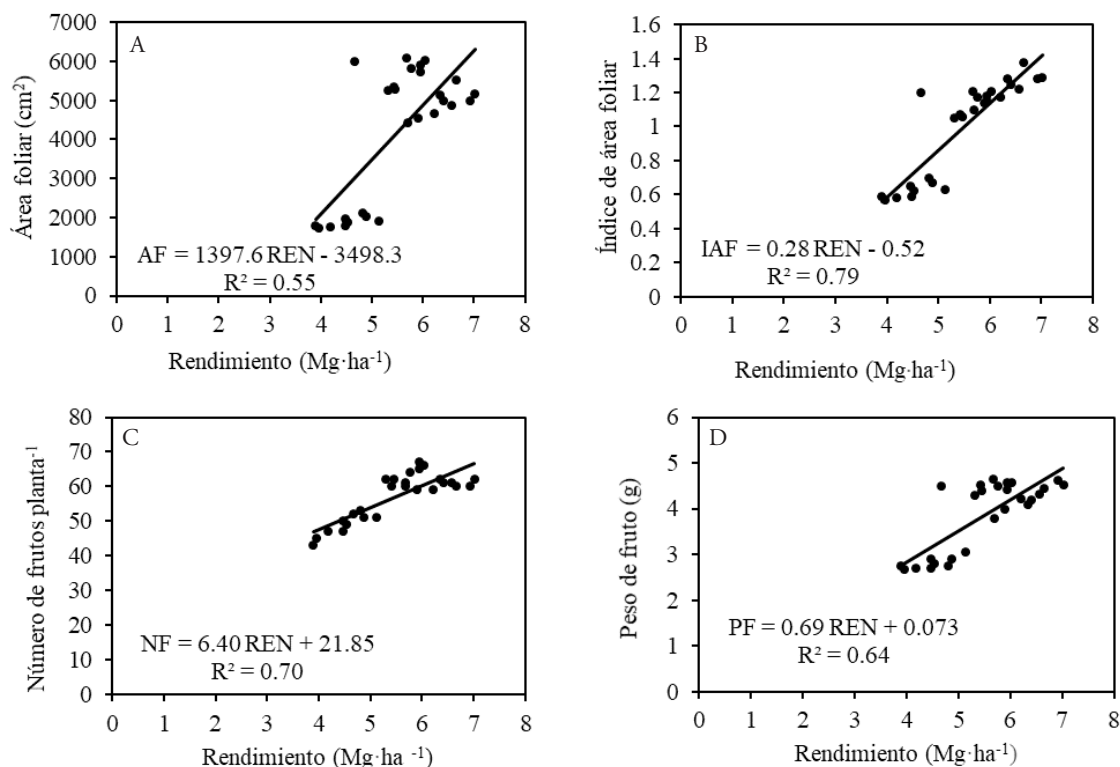


Figura 3. Relación entre el rendimiento y área foliar (A), índice de área foliar (B), número de frutos por planta (C) y peso de fruto (D). AF, área foliar. IAF, índice de área foliar. NF, número de frutos. PF, peso de frutos en *Physalis angulata*.

Figure 3. Relationship between yield and A, leaf area; B, leaf area index; C, number of fruits per plant; and D, fruit weight. AF, leaf area. IAF, leaf area index. NF, number of fruits. PF, fruit weight in *Physalis angulata*.

Las rectas de regresión entre el rendimiento y el número de frutos (0.70) y el peso del fruto (0.64) obtenidos (Figuras 3C y 3D) muestran un coeficiente de determinación significativo. El $REN=0.69(PF)+0.073$ indica que por cada unidad de aumento del rendimiento la cantidad de PF se incrementa en 0.763 (g). En estas figuras se observa que a medida que incrementa el valor de estas variables la producción también aumenta. Golubkina *et al.* (2018) confirmaron el incremento del rendimiento con el aumento en el número y peso de los frutos, al observar que en *P. angulata* con 53 frutos y 8 g por planta, el cultivar 'Konditer 1' expresó su rendimiento máximo, con 11.3 Mg ha⁻¹.

CONCLUSIONES

El tomate milpero (*Physalis angulata*) obtuvo el rendimiento mayor con la aplicación máxima de urea de liberación lenta. Para la densidad de plantación con 2.5 plantas m⁻² se obtuvo el rendimiento mayor. El área foliar, índice de área foliar, número de frutos por planta y el peso de frutos por planta afectaron el rendimiento en forma positiva. Por cada unidad de aumento en estas variables, se obtuvo un incremento en la producción de fruto. Las rectas de regresión entre el rendimiento y el número de frutos (0.70) y el índice de área foliar (0.79) muestran un coeficiente de determinación significativo.

El estudio demostró que es posible incrementar el rendimiento del cultivo del tomatillo silvestre. Por lo tanto, la especie es una propuesta para ampliar la diversificación de cultivos hortícolas y una alternativa más en la cocina tradicional.

LITERATURA CITADA

Aguilar-Carpio C, P Juárez-López, IH Campos-Aguilar, I Alía-Tejacal, M Sandoval-Villa, V López-Martínez. 2018. Análisis de crecimiento y rendimiento de uchuva (*Physalis peruviana* L.) cultivada en hidroponía e invernadero. Revista Chapingo Serie Horticultura 24: 191-202. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2017.07.024>

Ali A, BP Singh. 2017. Effect of plant spacing and fertility level on leaf area variation at different phenological stages of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) grown in sodic soil. Journal of Applied and Natural Sciences 9: 274-279. <https://doi.org/10.31018/jans.v9i1.1183>

between yield and fruit number (0.70) and leaf area index (0.79) showed significant coefficients of determination.

This study found that it is possible to increase the yield of this native wild tomato. Therefore, the species *P. angulata* is a valid proposal to expand the diversification of horticultural crops, and another alternative in traditional cooking.

—End of the English version—



Azofeifa A, M Moreira A. 2004. Análisis de crecimiento del chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. Hot), en Alajuela, Costa Rica. Agronomía Costarricense. 28: 57-67.

Castro-Brindis R, A Galvis-Spínola, P Sánchez-García, A Peña-Lomelí, M Sandoval-Villa, G Alcantar-González. 2004. Demanda de nitrógeno en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). Revista Chapingo Serie Horticultura 10: 147-152. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2003.06.039>

Cobaleda VM, A Reyes M, G Barriada B, JR Medina M, R Torres R, EA Delgado A, RE Alanís B, N Almaraz A. 2013. Una Mirada General al tomate de cáscara (*Physalis*). Vidsupra 5: 90-99.

Constanza D, MJ Díaz, E Aguirre, N Urrutia. 2015. Efectos de abonos de liberación lenta en la lixiviación de nitratos y nutrición nitrogenada en estevia. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas 9: 112-123. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2015v9i1.3750>

Da Silva LR, T Tanan T, Neves M, M De Oliveira L, A Da Silva P. 2017. Hydroponic cultivation of *Physalis angulata* L.: Growth and production under nitrogen dose. Pesquisa Agropecuária Tropical 47: 145-151.

Daza-Torres MC, GS Ladino-Tabarquino, N Urrutia-Cobo. 2018. Beneficios agronómicos y ambientales de fuentes de fertilizantes nitrogenados en *Ocimum basilicum* L. Revista de la Facultad Nacional de Minas 85: 294-303. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.69103>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2013. El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas. Julio 29. pp: 33.

Fischer G, P Almanza M, D Miranda. 2014. Importancia y cultivo de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). Revista Brasileira de Fruticultura 36: 1-15. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-441/13>

Golubkina NA, HG Kekina, MR Engalichev, MS Antoshkina, SM Nadezhkin, G Caruso. 2018. Yield, quality, antioxidants, and mineral nutrients of *Physalis angulata* L. and *Physalis pubescens* L. fruits as affected by genotype under organic management. Advances in Horticultural Science 32: 541-548. <https://doi.org/10.13128/ahs-22211>

- Hawkesford M, W Horst, T Kichey, H Lambers, J Schjoerring, I Moller, P White. 2012. Functions of macronutrients of higher plants *In*: Marschner, P. (ed.) Marschner's Mineral Nutrition of higher plants. Pergamon, U. K. pp: 135-189.
- Jiménez SE, T Robledo V, M Benavides A, G Ramírez F, R Ramírez H, L De la Cruz E. 2012. Calidad de fruto de genotipos tetraploides de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Universidad y Ciencia* 28: 153-161.
- Junior BD, M de Cácia O, A Izabel P, T Casagrande E, A Claudia A 2017. Agronomic aspects of two *Physalis* species as a function of nitrogen fertilization. *Comunicata Scientiae* 8: 230-238. <https://doi.org/10.14295/CS.v8i2.1327>
- López-Sandoval JA, L López M, G Cruz C, H Vibrans L, O Vargas, M Martínez. 2015. Modelado de los factores ambientales que determinan la distribución de especies sinantrópicas de *Physalis*. *Botanical Sciences* 93: 755-764. <https://doi.org/10.17129/botsci.192>
- López-Sandoval JA, E Morales R, H Vibrans L, E Morales M. 2018. Tasa de asimilación neta y rendimiento de *Physalis* bajo cultivo en dos localidades. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41: 187-19. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.2.187-197>
- Morales-Morales EJ, EJ Morales Rosales, E Díaz-López, AJ Cruz-Luna, N Medina-Arias, M Guerrero-De la Cruz. 2015. Tasa de asimilación neta y rendimiento de girasol en función de urea y urea de liberación lenta. *Agrociencia* 49: 163-176.
- Morales-Morales EJ, M Rubí A, J López S, A Martínez C, E Morales R. 2019. Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 1875-1886. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.1732>
- Naumova N, T Nechaeva, O Savenkov, Y Fotev. 2019. Yield and fruit properties of husk tomato (*Physalis phyladelphica*) cultivars grown in the open field in the south of west Siberia. *Horticulturae* 5: 1-12. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5010019>
- Peña LA, J Ponce V, E Sánchez C, N Magaña L. 2014. Desempeño agronómico de variedades de tomate de cáscara en invernadero y campo abierto. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37: 381-391.
- Ponce VJJ, A Peña-Lomeli, JE Rodríguez-Pérez, R Mora-Aguilar, R Castro-Brindis, N Magaña L. 2012. Densidad y poda en tres variedades de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.) (*sic.*) cultivado en invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 18: 325-332. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2010.08.028>
- Puente LA, C Pinto M, ES Castro, M Cortés. 2011. *Physalis peruviana* L. the multiple properties of a highly functional fruit: a review. *Food Research International* 44: 1733-1740. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.034>
- Ramos LC, G Alcantar G, A Galvis S, A Peña L, A Martínez G. 2002. Eficiencia de uso del nitrógeno en tomate de cáscara en fertirriego. *Terra Latinoamericana* 20: 465-469.
- Rengifo-Salgado E, G Vargas-Arana. 2013. *Physalis angulata* L. (Bolsa Mullaca): A Review of its Traditional Uses, Chemistry and Pharmacology. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas* 12: 431-445.
- SAS Institute. 2004. SAS/STAT User's Guide, Version 8.02. SAS Institute Inc. Cary, N.C., USA. 479 p.
- Shavit U, M Reiss, JA Shaviv. 2013. Wetting mechanisms of gel-based controlled-release fertilizers. *Journal of Controlled Release* 88: 71-83. [https://doi.org/10.1016/s0168-3659\(02\)00455-8](https://doi.org/10.1016/s0168-3659(02)00455-8)
- Silva PA, C Albornoz B, A Castillo O, Checa C, T Lagos B. 2015. Respuesta de *Physalis peruviana* a la fertilización con diferentes dosis de N, P y K en el Altiplano de Pasto, Colombia. *Acta Agronómica* 64: 330-335. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.44290>
- Valdivia-Mares LE, FA Rodríguez Z, JJ Sánchez G, O Vargas-Ponce. 2016. Phenology, agronomic and nutritional potential of three wild husk tomato species (*Physalis*, Solanaceae) from Mexico. *Scientia Horticulturae* 200: 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.005>
- Vargas-Ponce O, J Sánchez-Martínez, MP Zamora-Tavares, LE Valdivia-Mares. 2016. Traditional management of a small-scale crop of *Physalis angulata* in Western Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution* 63: 1383-1395. <https://doi.org/10.1007/s10722-015-0326-3>

FUNCIONES DE DURAMEN Y SISTEMAS COMPATIBLES DE AHUSAMIENTO Y VOLUMEN COMERCIAL PARA *Acacia mangium* Willd. EN, TABASCO, MÉXICO

HEARTWOOD FUNCTIONS AND COMPATIBLE TAPER AND MERCHANTABLE VOLUME SYSTEMS FOR *Acacia mangium* Willd. IN, TABASCO, MEXICO

Monserrat Berenice Sánchez-Banda¹, Héctor Manuel De los Santos-Posadas^{2*},
José René Valdez-Lazalde², María Angélica Roldán-Cortés¹

¹ Consultora Forestal independiente.

² Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Postgrado en Ciencias Forestales. Montecillo, Estado de México, México. C. P. 56230.

*Autor para correspondencia: hmsantos@colpos.mx

RESUMEN

En los últimos 20 años en México, 30 % de las plantaciones apoyadas por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) fueron con fines maderables y se establecieron en Tabasco, Veracruz y Campeche, México. La valoración económica y el manejo de plantaciones con estos propósitos se optimiza por medio de la estimación del volumen maderable por tipo de productos. Los objetivos de este estudio fueron ajustar tres sistemas compatibles de ecuaciones de ahusamiento y volumen comercial con corteza de tipo segmentado, identificar funciones de ahusamiento y volumen acumulado de duramen y analizar los tipos dendrométricos a partir del sistema desarrollado por Fang *et al.* (2000) para plantaciones de árboles clonales de *Acacia mangium* Willd. ubicadas en Huimanguillo, Tabasco, México. Se derribaron 91 árboles (2, 3, 7 y 8 años) y se formaron dos grupos de datos: 60 árboles para el ajuste y 31 para la validación. La cubicación del volumen por sección se realizó con el método de trozas traslapadas. La selección de los modelos se hizo de acuerdo con la clasificación de cuatro estadísticos de bondad de ajuste. El sistema desarrollado por Fang *et al.* (2000) mostró estimaciones lógicas con ambos grupos de mediciones. La función de volumen de duramen sobreestimó el porcentaje promedio de duramen respecto al volumen sin corteza en árboles de 2 años, sin embargo, los estimó de forma lógica para las otras edades: 34.7 % a los 3 años, 61.8 % a los 7 años y 67 % a los 8 años. La proporción de ahusamiento de duramen

ABSTRACT

In the last 20 years in Mexico, 30 % of the plantations supported by the Comisión Nacional Forestal (National Forestry Commission, CONAFOR) were made for timber purposes and established in the states of Tabasco, Veracruz, and Campeche, in Mexico. The economic valuation and management of plantations for these purposes are optimized by estimating the timber volume by type of product. The objectives of this study were to fit three compatible systems of segmented equations of taper and merchantable outside-bark volume; identify functions of taper and cumulative volume of heartwood; and analyze the dendrometric types based on the system developed by Fang *et al.* (2000) for plantations of clonal trees of *Acacia mangium* Willd., located in Huimanguillo, Tabasco, Mexico. Ninety-one (91) trees (2, 3, 7 and 8 years old) were cut down and two data groups were formed: 60 trees for fitting, and 31 for validation. The stem volume per section was calculated using the overlapping bolts method. The selection of the models was made according to the classification of four goodness-of-fit statistics. The system developed by Fang *et al.* (2000) showed reasonable estimates with both groups of measurements. The heartwood volume function overestimated the average percentage of heartwood relative to the inside bark volume in 2-year-old trees. However, it estimated them logically for the other ages: 34.7 % at 3 years, 61.8 % at 7 years, and 67 % at 8 years. The ratio heartwood taper to inside bark taper decreased after reaching 70 % of height.

Recibido: noviembre, 2020. Aprobado: diciembre, 2021.

Publicado en *Agrociencia* 56: 88-107. 2022.

respecto al ahusamiento sin corteza, disminuye después de 70 % de altura.

Palabras clave: *Acacia mangium*, plantación forestal comercial, diámetro comercial mínimo, distribución de productos, proporciones de duramen, tipos dendrométricos.

INTRODUCCIÓN

La especie *Acacia mangium* Willd. es una leguminosa multipropósito de crecimiento rápido, nativa de Indonesia, Papúa Nueva Guinea y del noreste de Australia (Hegde *et al.*, 2013). Es uno de los árboles más utilizados en plantaciones forestales comerciales en Asia y otras regiones del Pacífico (Krisnawati *et al.*, 2011). En condiciones favorables, *Acacia mangium* alcanza 30 m de altura y 50 cm de diámetro (Hegde *et al.*, 2013). Como cultivo, la especie presenta una alta tasa de crecimiento, en dependencia de la edad, la calidad del sitio y las distancias de plantación, con incrementos en diámetro de 1.8 a 5.8 cm año⁻¹ durante los primeros cinco años (Reyes *et al.*, 2018) y alturas de 15 m a los cuatro años en los suelos más fértiles de Filipinas (Harrison and Herbohn, 2001) y a los tres años en sitios promedio de la región caribeña de Colombia (Torres Vélez and Del Valle, 2007).

La madera de *Acacia mangium* se clasifica como dura, extremadamente pesada, fuerte, resistente, propicia para producir muebles, dinteles de puertas y ventanas, así como artículos domésticos (Sharma *et al.*, 2012). En el mundo, el valor de la madera de algunas especies como *Acacia melanoxylon* R. Br. está dado principalmente por su proporción de duramen, el cual se caracteriza por una coloración marrón oscura con diferenciación evidente respecto a la albura en términos de color y una alta durabilidad natural (Monteoliva *et al.*, 2012).

La estimación de las existencias volumétricas de una plantación forestal comercial con fines maderables permite evaluar su eficiencia productiva (Torres y Magaña, 2001). Las funciones de ahusamiento (d) y volumen comercial acumulado (Vc) son expresiones matemáticas que posibilitan cuantificar de forma precisa los volúmenes y la distribución de productos derivados de árboles en pie, si estos modelos están definidos por una estructura

Keywords: *Acacia mangium*, commercial forest plantation, minimum commercial diameter, product distribution, heartwood proportions, dendrometric types.

INTRODUCTION

The species *Acacia mangium* Willd. is a fast-growing multipurpose legume tree native to Indonesia, Papua New Guinea and north-eastern Australia (Hegde *et al.*, 2013). It is one of the most widely used trees in commercial forest plantations in Asia and other Pacific regions (Krisnawati *et al.*, 2011). Under favourable conditions, *Acacia mangium* reaches 30 m in height and 50 cm in diameter (Hegde *et al.*, 2013).

As a crop, the species has a high growth rate, depending on age, site quality and planting distances, with diameter increases of 1.8 to 5.8 cm yr⁻¹ during the first 5 years (Reyes *et al.*, 2018) and heights of 15 m after 4 years in the most fertile soils of the Philippines (Harrison and Herbohn, 2001). Also, after 3 years in average sites of the Caribbean region of Colombia (Torres-Vélez and Del Valle, 2007).

Acacia mangium wood is classified as hard, extremely heavy, strong, resistant, and suitable for producing furniture, door and window lintels, as well as household items (Sharma *et al.*, 2012). In the world, the value of the wood of some species such as *Acacia melanoxylon* R. Br. is given mainly by its proportion of heartwood, which is characterized by a dark brown coloration with clear differentiation from sapwood in terms of colour and a high natural durability (Monteoliva *et al.*, 2012).

Estimating the volumetric stocks of a commercial forest plantation for timber purposes allows the evaluation of its productive efficiency (Torres and Magaña, 2001). The functions of taper (d) and cumulative merchantable volume (Vc) are mathematical expressions that make it possible to accurately quantify the volumes and distribution of products derived from standing trees; if these models are defined by a common geometric structure and by the same parameters, there is a compatible volume-taper system (Cruz-Cobos *et al.*, 2008).

The complexity of the mathematical formulations, as well as the number of variables and coefficients

geométrica común y por los mismos parámetros, se tiene un sistema compatible de volumen-ahusamiento (Cruz-Cobos *et al.*, 2008).

La complejidad de las formulaciones matemáticas, así como el número de variables y coeficientes involucrados precisan la clasificación de los modelos de ahusamiento en polinómicos simples, polinómicos segmentados, potenciales, exponenciales, de exponente variable, trigonométricos y logarítmicos (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2014).

El duramen es una porción de la madera que está entre la médula y la albura, es biológicamente inactivo, cumple la función de sostén, y en general es de estructura más compacta y coloración más oscura que la albura (Giménez *et al.*, 2000). La proporción de duramen se favorece de las prácticas silviculturales que permiten un crecimiento rápido individual (DeBell and Lachenbruch, 2009).

En México, la empresa plantadora forestal Agropical S.A. de C.V. comenzó hace una década un proyecto de plantaciones maderables de *Acacia mangium* de origen clonal. Sin embargo, los trabajos relacionados con el análisis del crecimiento de la especie y su proporción de duramen aún son escasos o de dominio privado. El objetivo del estudio fue ajustar tres sistemas compatibles de ecuaciones de ahusamiento y volumen comercial de tipo segmentado, identificar funciones de estimación de ahusamiento y volumen acumulado de duramen, y realizar un análisis de los tipos dendrométricos a partir del modelo de Fang *et al.* (2000) para árboles de clones de *Acacia mangium* plantados con fines comerciales en Huimanguillo, Tabasco.

La hipótesis de esta investigación es que los modelos biométricos de tipo segmentado describen de manera adecuada el comportamiento del ahusamiento y volumen comercial de los árboles de origen clonal de *Acacia mangium* y, el comportamiento del ahusamiento y volumen acumulado de duramen está relacionado con la edad y la altura de los árboles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio, muestra y variables dasométricas

El estudio se realizó en plantaciones forestales comerciales establecidas con árboles de clones de *Acacia mangium*

involved, require the classification of the taper models into simple, segmented, potential, exponential, variable exponent, trigonometric and logarithmic polynomials (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2014).

The heartwood is a portion of the wood that is between the pith and the sapwood; it is biologically inactive, it fulfils the function of support, and in general it has a more compact structure and a darker colour than the sapwood (Giménez *et al.*, 2000). The heartwood proportion is favoured by silvicultural practices that allow rapid individual growth (DeBell and Lachenbruch, 2009).

In Mexico, the forest plantation company Agropical S.A. de C.V. started a project for timber plantations of *Acacia mangium* of clonal origin 10 years ago. However, the work related to the analysis of the species growth and its proportion of heartwood is still scarce or private domain. The objective of the study was to fit three compatible systems of segmented equations of taper and merchantable volume, identify functions for estimating taper and accumulated volume of heartwood, and perform an analysis of the dendrometric types from the model of Fang *et al.* (2000) for *Acacia mangium* clone trees planted for commercial purposes in Huimanguillo, Tabasco. The hypothesis of this study is that segmented-type biometric models adequately describe the behaviour of taper and commercial volume of *Acacia mangium* trees of clonal origin, and the behaviour of taper and cumulative volume of heartwood is related to age and the height of the trees.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study area, sample and dasometric variables

The study was developed in commercial forest plantations established with *Acacia mangium* cloned trees in Huimanguillo, Tabasco, Mexico. The soil is Feozem, the average annual temperature is 26 °C and the average annual rainfalls 2500 mm; typical characteristics of a warm humid climate with abundant rains in summer (Am) (INEGI, 2005).

The information used was obtained from 91 *Acacia mangium* trees of different ages (2, 3, 7 and 8 years old) from a destructive sampling carried out in 2017,

en Huimanguillo, Tabasco, México. El suelo es de tipo Feozem, la temperatura media anual de 26 °C y la precipitación media anual de 2500 mm; características propias del clima cálido húmedo con lluvias abundantes en verano (Am) (INEGI, 2005).

La información utilizada se obtuvo de 91 árboles de *Acacia mangium* de diferentes edades (2, 3, 7 y 8 años) provenientes de un muestreo destructivo realizado en 2017, donde se derribó y seccionó cada árbol. A cada uno se le midió: diámetro normal (D), diámetro a diferentes alturas (d), grosor de corteza (gc), diámetro de duramen a 1.3 m de altura (Dd) y diámetro de duramen a diferentes alturas (dd); todas éstas en centímetros. La medición de las variables altura total (H), altura del tocón (hb) y altura a distintos diámetros (h) se hizo en metros. El método de trozas traslapadas desarrollado por Bailey (1995), con fundamento en el método del centroide de Wiant *et al.* (1992) se utilizó para la cubicación del volumen con corteza, sin corteza y de duramen de cada sección; la fórmula del cono se usó para cubicar para las puntas.

La base de datos se conformó de 1372 pares de mediciones de altura-diámetro. Con el fin de detectar valores atípicos y verificar un comportamiento lógico de las variables, se auditaron las variables de interés de forma gráfica en su expresión relativa (Figura 1). Esta base se dividió de forma aleatoria y sin reemplazo, en dos grupos con características promedio semejantes. El conjunto de datos designado para el ajuste de los modelos estuvo conformado por las mediciones de 60 árboles. Esta cantidad se obtuvo con SAS® 9.0 (SAS Institute Inc., 2009) para tener una muestra con potencia de 95 %. Las mediciones de los 31 árboles restantes se consideraron como un conjunto independiente de datos para la validación de las ecuaciones (Cuadro 1).

Sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial

Tres sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial de tipo segmentado, caracterizados por la estimación de dos puntos de inflexión, se seleccionaron (Cuadro 2).

El comportamiento del volumen comercial acumulado sin corteza (Vsc) y del ahusamiento sin corteza (dsc), se expresó con el uso de funciones de proporción directa (un solo parámetro):

$$V_{sc} = \delta_0 \times V_c \quad (4)$$

where each tree was cut down and sectioned. Each one underwent the following measurements: normal diameter (D), diameter at different heights (d), bark thickness (gc), heartwood diameter at 1.3 m height (Dd), and heartwood diameter at different heights (dd), all these in centimetres. The measurement of the variables total height (H), height of the stump (hb), and height at different diameters (h) was done in meters.

The overlapping bolts method developed by Bailey (1995), based on the centroid method by Wiant *et al.* (1992), was used for the scale volume outside bark, inside bark and heartwood of each section; the cone volume formula was used for the tips.

The database was made up of 1372 pairs of height-diameter measurements. In order to detect atypical values and verify a logical behaviour of the variables, the variables of interest were audited graphically in their relative expression (Figure 1).

This database was divided randomly and without replacement into two groups with similar average characteristics. The data set designated for the fit of the models consisted of the measurements of 60 trees.

This amount was obtained with SAS® 9.0 (SAS Institute Inc., 2009) to have a sample with power of 95 %. The measurements of the remaining 31 trees were considered as an independent data set for the validation of the equations (Table 1).

Compatible taper and merchantable volume systems

Three compatible taper and merchantable volume segmented systems, characterized by the estimation of two inflection points, were selected (Table 2).

The behaviour of the cumulative merchantable volume inside bark (Vsc) and of the taper inside bark (dsc) was expressed using direct proportion functions (a single parameter):

$$V_{sc} = \delta_0 \times V_c \quad (4)$$

$$d_{sc} = \theta_0 \times d \quad (5)$$

where Vsc is the merchantable volume inside bark (m³), Vc is the merchantable volume outside bark (m³), dsc is the diameter inside bark (cm) at the height of h (m) from the height of the stump (hb), d is the diameter (cm) at the height of h (m) from the height of the stump (hb), and δ_0 , θ_0 are the parameters to be estimated by the fit.

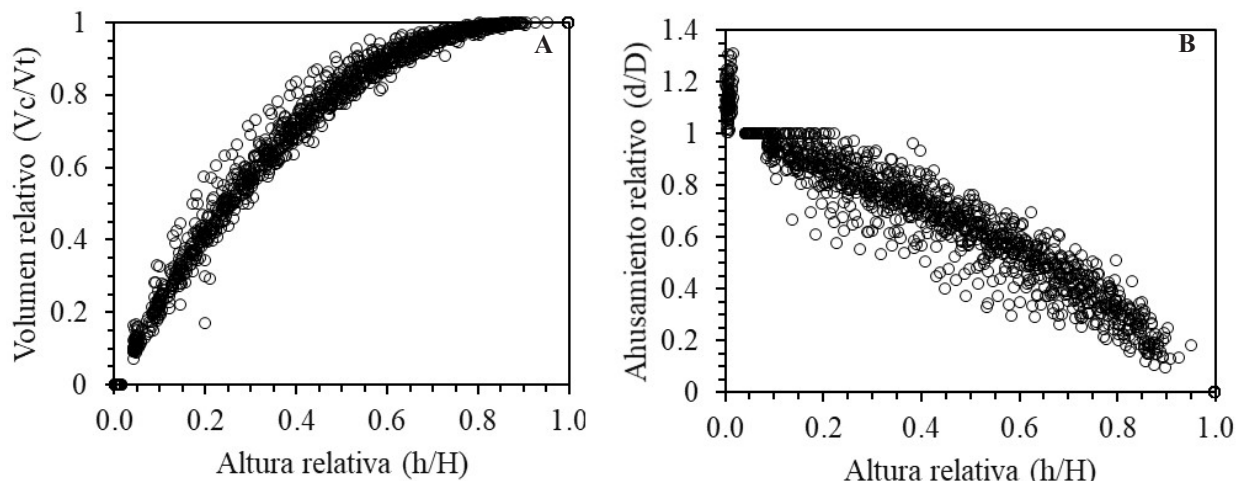


Figura 1. Comportamiento lógico del volumen relativo con corteza (A) y del ahusamiento relativo con corteza (B) respecto a la altura relativa, donde Vc: volumen comercial, Vt: volumen total, d: ahusamiento, D: diámetro normal, h: altura a distintos diámetros, H: altura total.

Figure 1. Logical behaviour of relative volume outside bark (A) and relative taper outside bark (B) with respect to relative height, where Vc: merchantable volume, Vt: total volume, d: taper, D: normal diameter, h: height at different diameters, H: total height.

$$d_{sc} = \theta_0 \times d \tag{5}$$

donde Vsc es el volumen comercial sin corteza (m³), Vc es el volumen comercial con corteza (m³), dsc el diámetro sin corteza (cm) a la altura de h (m) desde la altura del tocón (hb), d es el diámetro (cm) a la altura de h (m) desde la altura del tocón (hb) y δ_0, θ_0 son los parámetros a ser estimados mediante el ajuste.

Heartwood functions

In order to adequately value the Acacia heartwood, the proportion and probable change of the heartwood in relation to taper (d) and merchantable volume outside bark (Vc) were modelled.

To explain the dynamics of the taper and the cumulative volume of the heartwood, functions involving the variables d, H and age were fitted because they are easy to obtain in the field (Table 3, Table 4).

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de las variables dasométricas de los grupos de datos utilizados.
Table 1. Table 1. Descriptive statistics of the dasometric variables of the data groups used.

Variable	Datos de ajuste (n = 60)				Datos para la validación (n = 31)			
	Mín.	Promedio	Máx.	DE	Mín.	Promedio	Máx.	DE
D (cm)	4.55	20.11	39.9	10.00	5.20	20.4	40.80	9.80
Dsc (cm)	4.15	18.42	37.7	9.22	5.00	18.75	38.00	8.97
Dd (cm)	0.00	14.08	32.35	9.81	0.00	14.71	31.7	9.38
H (m)	5.80	19.49	30.40	8.13	6.10	20.25	29.8	7.31
hb (m)	0.10	0.15	0.30	0.06	0.10	0.14	0.20	0.05
Vt (m ³)	0.01	0.39	1.05	0.35	0.01	0.41	0.97	0.36
Vtsc (m ³)	0.00	0.35	0.94	0.31	0.01	0.37	0.87	0.32
Vtd (m ³)	0.00	0.22	0.70	0.22	0.00	0.24	0.65	0.23
edad (años)	2	6	8	3	2	6	8	2

n: número de observaciones, Mín.: valor mínimo, Máx.: valor máximo, DE: desviación estándar, D: diámetro normal con corteza, Dsc: diámetro normal sin corteza, Dd: diámetro de duramen a 1.3 m de altura, H: altura total del árbol, hb: altura del tocón, Vt: volumen total con corteza, Vtsc: volumen total sin corteza, Vtd: volumen total de duramen. ♦ n: number of observations, Min.: minimum value, Max.: maximum value, DE: standard deviation, D: normal diameter outside bark, Dsc: normal diameter inside bark, Dd: heartwood diameter at 1.3 m height, H: tree total height, hb: stump height, Vt: total volume outside bark, Vtsc: total volume inside bark, Vtd: total heartwood volume.

Cuadro 2. Sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial.

Table 2. Compatible taper and merchantable volume systems.

Autores	Expresión	Sistema
Fang et al. (2000)	$d = C_1 \left[H^{\frac{k-\beta_1}{\beta_1}} (1-q)^{\frac{k-\beta}{\beta}} \alpha_1^{I_1+I_2} \alpha_2^{I_2} \right]^{0.5}$ <p>donde $\begin{cases} I_1 = 1 \text{ si } p_1 \leq q \leq p_2; \text{ de lo contrario } 0 \\ I_2 = 1 \text{ si } p_2 \leq q \leq 1; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$</p> $R_0 = \left(1 - \frac{hb}{H} \right)^{\frac{K}{\beta_1}} \quad R_1 = (1-p_1)^{\frac{K}{\beta_1}} \quad R_2 = (1-p_2)^{\frac{K}{\beta_2}}$ $\beta = \beta_1^{1-(I_1+I_2)} \beta_2^{I_2} \beta_3^{I_2}$ $\alpha_1 = (1-p_1)^{\frac{k(\beta_2-\beta_1)}{\beta_1\beta_2}} \quad \alpha_2 = (1-p_2)^{\frac{k(\beta_3-\beta_2)}{\beta_2\beta_3}}$	1
Max y Burkhart (1976)	$C_1 = \left[\frac{\alpha_0 D^\alpha H^{\alpha_2 - \frac{k}{\beta_1}}}{\beta_1 (R_0 - R_1) + \beta_2 (R_1 - \alpha_1 R_2) + \beta_3 \alpha_1 R_2} \right]$ $V_c = C_1^2 H^{\frac{k}{\beta}} \left\{ \beta_1 R_0 + (I_1 + I_2) + (\beta_2 - \beta_1) R_1 + I_2 (\beta_3 - \beta_2) \alpha_1 R_2 - \beta (1-q)^{\frac{k}{\beta}} \alpha_1^{I_1+I_2} \alpha_2^{I_2} \right\}$ $d = D \left[\beta_1 (q-1) + \beta_2 (q^2-1) + \beta_3 (p_1-q)^2 I_1 + \beta_4 (p_2-q)^2 I_2 \right]^{0.5}$ <p>donde $\begin{cases} I_1 = 1 \text{ si } q \leq p_1; \text{ de lo contrario } 0 \\ I_2 = 1 \text{ si } q \leq p_2; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$</p> $V_c = kD^2 H \left\{ \frac{\beta_2}{3} (q^3 - z_1^3) + \frac{\beta_1}{2} (q^2 - z_1^2) - (\beta_1 - \beta_2)(q - z_1) - \frac{\beta_3}{3} [(p_1 - q)^3 J_1 - (p_1 - z_1)^3 K_1] - \frac{\beta_4}{3} [(p_2 - q)^3 J_2 - (p_1 - z_1)^3 K_2] \right\}$ <p>donde $\begin{cases} J_1 = 1 \text{ si } q \leq p_1; J_2 = 0 \text{ si } q > p_2; \\ K_1 = 1 \text{ si } z_1 \leq p_1; K_2 = 0 \text{ si } z_2 > p_1; \end{cases}$</p>	2
McClure y Czaplewski (1986)	$d = \left\{ \left(\frac{\alpha_0 D^{\alpha_1} H^{\alpha_2}}{k/H} \right) \left[2(1-\beta_1)z + 3\beta_1 z^2 + I_1 \beta_2 (z - \gamma_1)^2 + I_1 \beta_3 (z - \gamma_2)^2 \right] \right\}^{0.5}$ <p>donde $\begin{cases} I_1 = 1 \text{ si } z \leq p_1; \text{ de lo contrario } 0 \\ I_2 = 1 \text{ si } z \leq p_2; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$</p> $V_c = \left(\frac{\alpha_0 D^{\alpha_1} H^{\alpha_2}}{3} \right) \left[3 + (3\beta_1 - 3)z^2 - 3\beta_1 z^3 + \beta_2 (1 - \varphi_1)^3 + \beta_3 (1 - \varphi_2)^3 + I_2 \beta_3 (\varphi_2 - z)^3 \right]$	3

d: diámetro con corteza (cm) a la altura de h (m) desde la altura del tocón, D: diámetro normal con corteza (cm), H: altura total (m), hb altura del tocón, Vc: volumen comercial con corteza (m³), k: constante $\pi/40000$, $\alpha_i, \beta_i, \varphi_i, p_i$ son parámetros a ser estimados mediante el ajuste, I_i, J_i, K_i son variables indicadoras de los cambios dendrométricos en el fuste del árbol. ♦ d: diameter outside bark (cm) at the height of h (m) from the height of the stump, D: normal diameter outside bark (cm), H: total height (m), hb height of the stump, Vc: merchantable volume outside bark (m³), k: constant $\pi/40000$, $\alpha_i, \beta_i, \varphi_i, p_i$ are parameters to be estimated through the fit, I_i, J_i, K_i are variables indicating dendrometric changes in the stem of the tree.

Funciones de duramen

Con la finalidad de valorar de forma adecuada el duramen de acacia, se modeló la proporción y cambio probable del duramen con relación al ahusamiento (d) y volumen comercial con corteza (Vc). Para explicar la dinámica del ahusamiento y del volumen acumulado del duramen se realizó el ajuste de funciones que involucraron a las variables d, H y edad por su fácil obtención en campo (Cuadro 3, Cuadro 4).

Estadísticos y criterios de selección

La evaluación de los modelos se basó en el análisis numérico de los criterios estadísticos comunes en el ámbito de la biometría forestal: la raíz del error cuadrático medio (RECM), el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), el promedio del sesgo absoluto de los residuos ($|\bar{E}|$) y el coeficiente de variación (CV) (Martínez-Ángel *et al.*, 2019):

$$RECM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right]^{0.5} \tag{10}$$

$$R^2_{adj} = 1 - \left[\frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right] \tag{11}$$

$$|\bar{E}| = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \tag{12}$$

$$CV = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-1)}{\bar{y}} \right]^{0.5} \times 100 \tag{13}$$

donde y_i , \hat{y}_i e \bar{y}_i son, respectivamente, los valores observados, estimados y promedio de la variable dependiente (ahusamiento, volumen comercial), n es el número total de observaciones usadas en el ajuste y p es el número de parámetros de la función.

Además del análisis gráfico, para seleccionar el sistema de ahusamiento y volumen comercial compatible, así como las funciones de duramen, que presentaron criterios estadísticos superiores, se utilizó el sistema de clasificación propuesto por Sakici *et al.* (2008). Este sistema consiste en clasificar los sistemas ajustados en función de cada criterio estadístico de selección, de tal forma que al mejor le corresponde el valor de 1. Posteriormente se

Cuadro 3. Funciones de ahusamiento de duramen. **Table 3.** Heartwood taper functions.

Expresión	Modelo
$dd = \vartheta_0 d^{\vartheta_1} \text{edad}^{\vartheta_2}$	6
$dd = \vartheta_0 d^{\vartheta_1} H^{\left(\frac{\vartheta_2}{\text{edad}}\right)}$	7

dd: diámetro de duramen (cm) a la altura de h (m) desde la altura del tocón (hb), d: diámetro (cm) a la altura de h (m) desde la altura del tocón (hb), H: altura total (m), edad (años), ϑ_i : parámetros a ser estimados mediante el ajuste. ♦ dd: heartwood diameter (cm) at height h (m) from stump height (hb), d: diameter outside bark (cm) at h height (m) from stump height (hb), H: total height (m), age (years), ϑ_i : parameters to be estimated through the fit.

Cuadro 4. Funciones de volumen acumulado de duramen (Vd).

Table 4. Functions of cumulative volume of heartwood (Vd).

Expresión	Modelo
$Vd = \rho_0 \times Vc \times \text{edad}^{\rho_1}$	8
$Vd = \rho_0 \times Vc \times H^{\frac{\rho_1}{\text{edad}}}$	9

Vc: volumen comercial con corteza (m³), edad (años), H: altura total (m), ρ_i : parámetros a ser estimados mediante el ajuste. ♦ Vc: merchantable volume outside bark (m³), age (years), H: total height (m), ρ_i : parameters to be estimated through the fit.

Statistics and selection criteria

The evaluation of the models was based on the numerical analysis of common statistical criteria in the field of forest biometry: the root mean square error (RECM), the fitted coefficient of determination (R^2_{adj}), the mean absolute bias of the residuals ($|\bar{E}|$), and the coefficient of variation (CV) (Martínez-Ángel *et al.*, 2019):

$$RECM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right]^{0.5} \tag{10}$$

$$R^2_{adj} = 1 - \left[\frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right] \tag{11}$$

$$|\bar{E}| = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \tag{12}$$

obtiene el promedio por modelo y entre más bajo es este valor, mejor su clasificación. Con la finalidad de valorar los sistemas compatibles en conjunto, se procedió a clasificar tanto los estadísticos del modelo de ahusamiento como los del volumen comercial y obtener un solo promedio por sistema.

Estrategia de ajuste

Los sistemas compatibles y las funciones de duramen se ajustaron con la técnica de máxima verosimilitud con información completa (FIML) con el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS® 9.0 (SAS Institute Inc., 2009). Esta técnica permite la compatibilidad del ajuste del sistema y considera los errores simultáneos de la ecuación de ahusamiento y volumen comercial (Fang *et al.*, 2000; Uranga-Valencia *et al.*, 2015).

Para asegurar la evaluación de las derivadas parciales que contienen el logaritmo de cero se adicionó un valor de 0.001 cuando $h = H$ y $d = 0$, de esta forma se evitaron problemas de convergencia y pérdida de datos (Fang *et al.*, 2000).

La autocorrelación de la función de ahusamiento de los sistemas compatibles se corrigió con la estructura de error autorregresivo continuo de segundo orden CAR (2) mediante la siguiente estructura (Zimmerman and Núñez, 2001):

$$e_{ij} = d_1 \gamma_1 h_{ij} - h_{ij-1} e_{ij-1} + d_2 \gamma_2 h_{ij} - h_{ij-2} e_{ij-2} + \varepsilon_{ij} \quad (15)$$

donde: $e_{ij} = j$ es el residual ordinario en el árbol i , $d_i = 1$ para $j > 1$ y $d_i = 0$ para $j = 1$, γ_i son los parámetros autorregresivos a ser estimados mediante el ajuste, $h_{ij} - h_{ij}$ es la distancia de separación de la j th a la j th-1 observación dentro de cada árbol, $h_{ij} > h_{ij-j}$ siendo ε_{ij} el término del error bajo la condición de independencia.

El estadístico Durbin Watson (DW) se usó para corroborar la corrección de la autocorrelación de los errores, el criterio indica que no existe dependencia espacial o temporal cuando los valores son relativamente cercanos a 2 (Durbin and Watson, 1971; Barrios *et al.*, 2014; Hernández-Ramos *et al.*, 2017).

El problema de heterocedasticidad asociada al volumen comercial fue corregido con la especificación usada por Quiñonez-Barraza *et al.* (2014): $\text{resid. } Vc = \text{resid. } Vc / [(D^2 H)^w]^{0.5}$ para el procedimiento MODEL de SAS® 9.0 (SAS Institute Inc., 2009), en la que se corrige con una función de

$$CV = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - 1)}{\bar{y}} \right]^{0.5} \times 100 \quad (13)$$

where y_i , \hat{y}_i and \bar{y}_i are respectively the observed, estimated, and average values of the dependent variable (taper, merchantable volume), n is the total number of observations used in the fit, and p is the number of function parameters. In addition to the graphic analysis, to select the compatible taper and merchantable volume system, as well as the heartwood functions, which presented superior statistical criteria, the classification system proposed by Sakici *et al.* (2008) was used.

This system consists of classifying the fitted systems based on each statistical selection criterion, in such a way that the value of 1 corresponds to the best. Subsequently, the average per model is obtained, and the lower this value, the better its classification.

In order to assess the compatible systems as a whole, the statistics of both the taper model and the merchantable volume were classified and a single average per system was obtained.

Fitting strategy

Compatible systems and heartwood functions were fitted using the Full Information Maximum Likelihood (FIML) technique with the MODEL procedure of SAS® 9.0 (SAS Institute Inc., 2009). This technique allows the compatibility of the fit of the system and considers the simultaneous errors of the equation of taper and merchantable volume (Fang *et al.*, 2000; Uranga-Valencia *et al.*, 2015).

To ensure the evaluation of the partial derivatives that contain the logarithm of zero, a value of 0.001 was added when $h = H$ and $d = 0$; thus, convergence problems and data loss were avoided (Fang *et al.*, 2000).

The autocorrelation of the taper function of the compatible systems was corrected with the continuous autoregressive error structure of second order CAR (2) by means of the following structure (Zimmerman and Núñez, 2001):

$$e_{ij} = d_1 \gamma_1 h_{ij} - h_{ij-1} e_{ij-1} + d_2 \gamma_2 h_{ij} - h_{ij-2} e_{ij-2} + \varepsilon_{ij} \quad (15)$$

where: $e_{ij} = j$ is the ordinary residual in tree i , $d_i = 1$ for $j > 1$ and $d_i = 0$ for $j = 1$, γ_i are the autoregressive parameters to be estimated by the fit, $h_{ij} - h_{ij}$ is the separation distance

potencia de la varianza del residual $\sigma_i^2 = (D^2H)^w$ (Crecente-Campo *et al.*, 2009) y se usa el error estimado del modelo no ponderado ($\hat{\epsilon}_i$) como la variable dependiente en la varianza del error del modelo ($\hat{\epsilon}_i^2 = w_0 (D^2H)^w$).

Validación

Los parámetros obtenidos con los datos de ajuste del sistema compatible seleccionado se usaron para estimar las variables de interés con los datos de validación. Al ser el duramen una parte de la madera que resulta de interés comercial en otras especies como *A. melanoxylon* y diversos eucaliptos (Miranda *et al.*, 2009; Igartúa *et al.*, 2009) se decidió estimar el ahusamiento y el volumen acumulado de duramen con todas las funciones propuestas para analizar su validación.

La validación del sistema compatible seleccionado y las funciones de duramen se compararon por medio de una prueba de *t* para muestras bajo el supuesto de varianzas iguales con un nivel de confianza de 95 %. Después se realizó el ajuste de forma simultánea (con los datos de la muestra de ajuste) del sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial con corteza, las funciones respectivas sin corteza y los modelos de duramen seleccionados como los más eficientes. Se comparó de forma gráfica la estimación de las variables de interés con los parámetros de los modelos seleccionados y validados en este estudio respecto a las mediciones de los datos de validación y se seleccionó un árbol al azar para ejemplificarlo.

Análisis de los tipos dendrométricos a partir del modelo de Fang *et al.* (2000)

Para el análisis de los tipos dendrométricos se parte de un cuerpo geométrico con una base circular definida por d , en cm, y H , en m, cuyo volumen se describe con la expresión: $V = k \times \frac{\pi}{40\,000} \times d^2 \times h$ donde k define el tipo de sólido descrito e indica una transición hacia alguno de los tipos dendrométricos: $k = 1/2$ a un paraboloides, $k = 1/3$ corresponde a un cono y $k = 1/4$ a un neiloide (Uranga-Valencia *et al.*, 2015). El sistema de ubicación de Fang *et al.* (2000) posee la ventaja de facilitar este análisis en cada segmento del fuste, debido a que cada sección se representa como $\beta_i = k \times \frac{\pi}{40\,000}$ y, por ende $k = \beta_i \times \frac{40\,000}{\pi}$.

from the j th to the $j-1$ observation within each tree, $h_{ij} > h_{ij-1}$, being ϵ_{ij} the error term under the independence condition.

The Durbin Watson (DW) statistic was used to corroborate the correction of the autocorrelation of the errors; the criterion indicates that there is no spatial or temporal dependence when the values are relatively close to 2 (Durbin and Watson, 1971; Barrios *et al.*, 2014; Hernández-Ramos *et al.*, 2017).

The heteroscedasticity problem associated with merchantable volume was corrected with the specification used by Quiñonez-Barraza *et al.* (2014): $\text{resid. } Vc = \text{resid. } Vc / [(D^2H)^w]^{0.5}$ for the SAS® 9.0 MODEL procedure (SAS Institute Inc., 2009), in which the power function of variance of the residual $\sigma_i^2 = (D^2H)^w$ (Crecente-Campo *et al.*, 2009) is applied to correct, and the estimated unweighted model error ($\hat{\epsilon}_i$) is used as the dependent variable in the model error variance ($\hat{\epsilon}_i^2 = w_0 (D^2H)^w$).

Validation

The parameters obtained with the fit data of the selected compatible system were used to estimate the variables of interest with the validation data.

Since the heartwood is a part of the wood that is of commercial interest in other species such as *A. melanoxylon* and various *Eucalyptus* (Miranda *et al.*, 2009; Igartúa *et al.*, 2009), it was decided to estimate the taper and the cumulative volume of heartwood with all the functions proposed to analyze its validation.

The validation of the selected compatible system and the heartwood functions were compared by means of a *t* test for samples under the assumption of equal variances, with a confidence level of 95 %. Simultaneous fitting (with the fit sample data) of the compatible system of taper and merchantable volume outside bark was done, the respective functions inside bark, and the heartwood models selected as the most efficient.

The estimation of the variables of interest with the parameters of the models selected and validated in this study was compared graphically with the measurements of the validation data, and a random tree was selected to exemplify it.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN
Sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial

Los valores de los parámetros estimados con sus respectivos errores estándar fueron significativos ($p \leq 0.001$) en los sistemas compatibles analizados para árboles clones de *Acacia mangium* (Cuadro 5). Los estadísticos de bondad de ajuste se incluyen junto con la calificación otorgada de acuerdo con el sistema de clasificación (Sakici *et al.*, 2008) y el estadístico Durbin Watson (DW), el cual en los tres sistemas dio valores cercanos a 2 (Cuadro 6); por lo tanto, los errores son independientes (Durbin and Watson, 1971).

Con los sistemas compatibles desarrollados por Fang *et al.* (2000) y Max y Burkhart (1976) se estimó el primer punto de inflexión a 10 % de la altura relativa y el segundo a alrededor de 80 %. Esto corresponde a una forma menos cilíndrica que la considerada con los puntos de inflexión obtenidos del sistema desarrollado por McClurer y Czaplewski (1986), los cuales suceden a 15 y 91 % de la altura relativa.

El fuste de *Acacia mangium* tiene el segundo punto de inflexión definido a una altura relativa similar a otras especies de crecimiento rápido como *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden y *E. dunni* Maiden, en plantaciones de Uruguay (Hirigoyen *et al.*, 2021), en las que el primer punto de inflexión estimado

Analysis of the dendrometric types from the model of Fang *et al.* (2000)

For the analysis of the dendrometric types, the starting point is a geometric body with a circular base defined by d , in cm, and H , in m, whose volume is described by the expression: $V = k \times \frac{\pi}{40\,000} \times d^2 \times h$, where k defines the type of solid described and indicates a transition towards some of the dendrometric types: $k = 1/2$ to a paraboloid, $k = 1/3$ corresponds to a cone, and $k = 1/4$ to a neiloid (Uranga-Valencia *et al.*, 2015).

The scaling system of Fang *et al.* (2000) has the advantage of facilitating this analysis in each segment of the stem, since each section is represented as $\beta_i = k \times \frac{\pi}{40\,000}$ and, therefore $k = \beta_i \times \frac{40\,000}{\pi}$.

RESULTS AND DISCUSSION
Compatible taper and merchantable volume systems

The values of the estimated parameters with their respective standard errors were significant ($p \leq 0.001$) in the compatible systems analyzed for clone trees of *Acacia mangium* (Table 5).

The goodness-of-fit statistics are included together with the rating given according to the classification system (Sakici *et al.*, 2008), and the Durbin Watson (DW) statistic, which in all three systems gave values close to 2 (Table 6); therefore, the errors are independent (Durbin and Watson, 1971).

Cuadro 5. Parámetros, estimadores y errores estándar de los parámetros de los sistemas compatibles analizados.
Table 5. Parameters, estimators and standard errors of the parameters of the compatible systems analysed.

S	Estimadores y errores estándar										
	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3	β_4	p_1	p_2	γ_1	γ_2
1 ψ	0.0001	1.6974	1.1047	0.00002	0.00003	0.00003		0.1054	0.8045	0.6766	0.6450
	ε 1.1x10 ⁻⁶	0.0100	0.0127	4.5x10 ⁻⁷	2.9x10 ⁻⁷	1.8x10 ⁻⁶		0.0048	0.0247	0.0211	0.0182
	∞ <.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
2 ψ				-4.3981	2.1991	28.7961	-1.6441	0.0981	0.8550	0.7923	0.7139
	ε			0.8011	0.4215	5.0429	0.4013	0.0093	0.0337	0.0203	0.0145
	∞			<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
3 ψ	0.0001	1.6272	1.2007	0.9752	-2.1227	46.0039		0.1486	0.9092	0.7391	0.6707
	ε 2.6x10 ⁻⁵	0.0102	0.0126	0.0685	0.3966	14.0623		0.0464	0.0082	0.0221	0.0174
	∞ 0.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0011		0.0014	<.0001	<.0001	<.0001

S: sistema compatible, ψ : estimador del parámetro, ε : error estándar del parámetro, ∞ : nivel de significancia del parámetro. ♦ S: compatible system, ψ : estimator of the parameter, ε : standard error of the parameter, ∞ : significance level of the parameter.

Cuadro 6. Estadísticos de bondad de ajuste de los sistemas compatibles analizados y su calificación (entre paréntesis).

Table 6. Goodness-of-fit statistics of the compatible systems analysed and their rating (in parentheses).

Sistema	Componente	RECM	R^2 adj	$ \bar{E} $	CV	Calificación promedio	DW
1	d	1.1488 (2)	0.9822 (2)	0.7799 (2)	7.7136 (2)	1.87	1.61
	Vc	0.0568 (2)	0.9648 (2)	0.0281 (1)	15.7841 (2)		
2	d	1.2059 (3)	0.9804 (2)	0.8492 (3)	8.0916 (3)	3	1.65
	Vc	0.0742 (3)	0.9399 (2)	0.0372 (3)	20.6387 (3)		
3	d	1.1258 (1)	0.9829 (1)	0.7715 (1)	7.5547 (1)	1.12	1.74
	Vc	0.0564 (1)	0.9652 (1)	0.0302 (2)	15.6895 (1)		

d: diámetro con corteza (cm) a la altura de h (m) desde la altura del tocón, Vc: volumen comercial con corteza (m³). ♦ d: diameter outside bark (cm) at the height of h (m) from the height of the stump, Vc: merchantable volume outside bark (m³).

con el sistema desarrollado por Fang *et al.* (2000), ocurre a 3 % de la altura relativa en ambas, y el segundo a 94 % y 85 % respectivamente, mientras que, en la región del Mediterráneo oriental de Turquía, para *Eucalyptus camaldulensis* Dehn suceden a 6 y 71 % (Özçelik and Göçerî, 2015).

Los sistemas compatibles analizados tuvieron criterios estadísticos eficientes, con coeficientes de determinación ajustada de 98 % para el modelo de ahusamiento y superiores a 94 % para el de volumen comercial. El sistema desarrollado por McClure y Czaplewski (1986) tuvo la mejor clasificación de criterios estadísticos seguido del de Fang *et al.* (2000), con diferencias casi imperceptibles entre ambos.

Funciones de duramen

Los parámetros estimados de las funciones de ahusamiento y volumen acumulado de duramen analizadas para árboles de clones de *Acacia mangium* (Cuadro 7); los estadísticos de bondad de ajuste (Cuadro 8) se incluyen con su clasificación (Sakici *et al.*, 2008) y el estadístico DW con el cual se asumió que los errores eran independientes en ambos modelos de ahusamiento por presentar valores cercanos a 2 (Durbin and Watson, 1971).

Los valores de parámetros estimados fueron significativos ($p \leq 0.0001$) en todos los casos, lo que mostró que las relaciones de variables predictoras

With the compatible systems developed by Fang *et al.* (2000) and Max and Burkhart (1976), the first inflection point was estimated at 10 % of the relative height, and the second at about 80 %.

This corresponds to a less cylindrical shape than the one considered with the inflection points obtained from the system developed by McClure and Czaplewski (1986), which occur at 15 and 91 % of the relative height.

The stem of *Acacia mangium* has the second inflection point defined at a relative height similar to other fast-growing species such as *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden and *E. dunni* Maiden; these plantations are located in Uruguay (Hirigoyen *et al.*, 2021), where the first inflection point estimated with the system developed by Fang *et al.* (2000) occurs at 3 % of the relative height in both, and the second at 94 % and 85 % respectively; while, in the eastern Mediterranean region of Turkey, the *Eucalyptus camaldulensis* Dehn species recorded 6 and 71 % (Özçelik and Göçerî, 2015).

The compatible systems analyzed had efficient statistical criteria, with fitted determination coefficients of 98 % for the taper model and higher than 94 % for the merchantable volume model.

The system developed by McClure and Czaplewski (1986) had the best classification of statistical criteria followed by that of Fang *et al.* (2000), with almost imperceptible differences between both.

Cuadro 7. Parámetros, estimadores y errores estándar de los parámetros de las funciones de ahusamiento y volumen acumulado de duramen analizadas.

Table 7. Parameters, estimators and standard errors of the parameters of the analysed heartwood taper and cumulative volume functions.

Función		Estimadores y errores estándar						
		ϑ_0	ϑ_1	ϑ_2	γ_1	γ_2	ρ_0	ρ_1
6	ψ	0.1893	1.2326	0.3160	0.6477	0.6900		
	ε	0.0067	0.0112	0.0133	0.0270	0.0246		
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001		
7	ψ	0.4651	1.2388	0.6412	0.6477	0.6888		
	ε	0.0210	0.0111	0.0287	0.0272	0.0248		
	∞	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001		
8	ψ						0.1717	0.6210
	ε						0.0356	0.0998
	∞						<.0001	<.0001
9	ψ						0.9284	0.9633
	ε						0.0683	0.1771
	∞						<.0001	<.0001

S: sistema compatible, ψ : estimador del parámetro, ε : error estándar del parámetro, ∞ : nivel de significancia del parámetro. ♦ S: compatible system, ψ : estimator of the parameter, ε : standard error of the parameter, ∞ : significance level of the parameter.

Cuadro 8. Estadísticos de bondad de ajuste y calificación (entre paréntesis) de las funciones de ahusamiento (dd) y volumen acumulado (Vd) de duramen analizadas.

Table 8. Statistics of goodness of fit and qualification (in parentheses) of the functions of taper (dd) and cumulative volume (Vd) of heartwood analysed.

No.	Función	RECM	R^2 adj	$ \bar{E} $	CV	Calificación promedio	DW
6	dd	1.0184 (1)	0.9835 (1)	0.7278 (2)	9.8718 (2)	1.5	1.81
7	dd	1.0209 (2)	0.9834 (2)	0.7137 (1)	9.5686 (1)	1.5	1.82
8	Vd	0.0229 (1)	0.9864 (1)	0.0159 (1)	10.5193 (1)	1	
9	Vd	0.0237 (2)	0.9854 (2)	0.0165 (2)	10.8873 (2)	2	

elegidas para los modelos de ahusamiento y los de volumen acumulado fueron adecuadas para modelar el duramen de *Acacia mangium*.

La clasificación de los criterios estadísticos de las funciones de ahusamiento señaló un empate, razón por la cual se eligió la función 7 por sus cualidades lógicas que permiten su uso con índices de sitio al relacionar las variables de altura total y edad. Ésta plantea una dinámica similar a la observada para *Eucalyptus globulus* Labill., en la cual el duramen está relacionado con la edad y con el tamaño del árbol. En consecuencia, los árboles con diámetro y altura mayores tendrán mayor proporción de duramen para una misma edad (Miranda *et al.*, 2009).

Heartwood functions

The estimated parameters of the functions of taper and cumulative volume of heartwood analyzed for clone trees of *Acacia mangium* (Table 7); the goodness-of-fit statistics (Table 8) are included with their classification (Sakici *et al.*, 2008), as well as the DW statistic with which it was assumed that the errors were independent in both taper models because they presented values close to 2 (Durbin and Watson, 1971).

The estimated parameter values were significant ($p \leq 0.0001$) in all cases, which showed that the predicting variable relationships chosen for the taper and cumulative volume models were

La relación de las variables Vc y edad lograron explicar de forma lógica el comportamiento del volumen acumulado de duramen, con criterios estadísticos ligeramente superiores a la función 9, por lo tanto, se considera el uso de la función (8). Lo anterior concuerda con la relación observada por Miranda *et al.* (2006) para *E. globulus*, la cual señala que la porción de duramen del tronco se incrementa con la edad del árbol; en consecuencia, el volumen del duramen es acumulativo.

Las proporciones promedio de volumen de duramen estimado (Vd estimado respecto al Vc observado) con la función 8 fueron de 25.6 % a los 2 años, 34.7 % a los 3 años, 61.8 % a los 7 años y 67 % a los 8 años. Al compararlas con las proporciones promedio de las mediciones de Vd observado en relación con Vsc observado, se identificó que la función sobreestima la proporción de Vd a los 2 años ya que la real fue de 5.6 %, sin embargo, las demás edades tuvieron proporciones promedio similares a las calculadas: 32.2 %, 60.2 % y 64.5 % respectivamente. La función 9 también sobreestimó la proporción de Vd a la edad de 2 años (32.2 %), pero estimó proporciones cercanas a las observadas a los 3 años (41.2 %), a los 7 años (64.5 %) y a los 8 años (67.3 %). La proporción de duramen de *Acacia mangium* a los 3 años es mayor que la reportada para *Eucalyptus grandis* a los 4 años, de acuerdo con el estudio de Winck *et al.*, (2012) en el cual, la proporción de volumen de duramen en árboles de *Eucalyptus grandis* fue 31.2 % a la edad mencionada, 52.3 % a los 10 años y 76 % a los 32 años.

Eucalyptus globulus a los 9 años y *Acacia melanoxylon* de 19 a 32 años presentaron 37 y 43 % de Vd respecto al Vt en plantaciones sin intervenciones silviculturales después del establecimiento en Buenos Aires, Argentina. Sin embargo, esos valores solo correspondieron al segmento comprendido del nivel superior del tocón a la base de la copa (Monteoliva *et al.*, 2012). En tanto que, en este estudio se midió el duramen de la base del árbol hasta la punta.

Las siguientes proporciones se calcularon después de excluir los datos del grupo de 2 años debido a que las estimaciones de volumen acumulado y ahusamiento de duramen no presentaron un comportamiento lógico para este grupo de datos.

El promedio del diámetro de duramen en relación con el diámetro sin corteza observado fue de 88 %

adequate to model the heartwood of *Acacia mangium*.

The classification of the statistical criteria of the taper functions indicated a tie, which is why function 7 was chosen for its logical qualities that allow its use with site indices when relating the variables of total height and age.

This poses a dynamic similar to that observed for *Eucalyptus globulus* Labill., in which the heartwood is related to the age and size of the tree. Consequently, trees with larger diameter and height will have a higher proportion of heartwood for the same age (Miranda *et al.*, 2009).

The relationship of the variables Vc and age were able to logically explain the behaviour of the cumulative volume of heartwood, with statistical criteria slightly superior to function 9, therefore, the use of function (8) is considered. This is consistent with the relationship observed by Miranda *et al.* (2006) for *E. globulus*, which indicates that the portion of the trunk heartwood increases with the age of the tree; consequently, the volume of the heartwood is cumulative.

The average proportions of estimated heartwood volume (estimated Vd to observed Vc) with function 8 were 25.6 % at 2 years, 34.7 % at 3 years, 61.8 % at 7 years, and 67 % at 8 years.

When comparing them with the average proportions of the measurements of Vd observed in relation to Vsc observed, it was found that the function overestimates the proportion of Vd at 2 years since the real one was 5.6 %; however, the other ages had average proportions similar to those calculated: 32.2 %, 60.2 % and 64.5 % respectively.

Function 9 also overestimated the proportion of Vd at the age of 2 years (32.2 %), but estimated proportions close to those observed at 3 years (41.2 %), at 7 years (64.5 %), and at 8 years (67.3 %). The proportion of heartwood of *Acacia mangium* at 3 years is greater than that reported for *Eucalyptus grandis* at 4 years, according to the study by Winck *et al.*, (2012), in which the proportion of heartwood volume in trees of *Eucalyptus grandis* was 31.2 % at the age mentioned, 52.3 % at 10 years and 76 % at 32 years.

Eucalyptus globulus at 9 y and *Acacia melanoxylon* at 19 to 32 y presented 37 and 43 % Vd with respect to

medido a 30 cm de altura y de 79 % a 1.3 m. Esta razón es de 93 % con la función 6 y 92 % con la 7 a 0.3 m de altura; mientras que a la altura de 1.3 m, ambas estiman 78 %. La distribución de duramen en relación con la altura relativa mostró que la proporción de diámetro de duramen disminuye en el fuste conforme aumenta la altura relativa. A 50 % de H, el porcentaje de dd respecto a dsc es 68 % de acuerdo con el observado y 70 % con el estimado con la función 6 y 69 % con la 7. Después de 70 % de H, las proporciones de ahusamiento de duramen respecto al dsc disminuyen, en este punto la proporción observada fue 62 % y las estimadas 63 %.

Validación

Con la prueba de *t* para muestras bajo el supuesto de varianzas iguales, el modelo de ahusamiento del sistema desarrollado por McClurer y Czaplowski (1986) obtuvo un estadístico de probabilidad a dos colas de 0.004 y de 0.68 el de volumen, lo cual indicó que el promedio de las estimaciones de volumen no es estadísticamente diferente de cero, aunque el de ahusamiento sí. Por esta razón se seleccionó el sistema desarrollado por Fang *et al.* (2000) para la estimación de Vc y d.

Los promedios de las estimaciones de las variables de interés con el sistema de Fang *et al.* (2000) y las cuatro funciones de duramen tuvieron estadísticos de probabilidad a dos colas superiores a 0.05. El análisis de validación de estos modelos no sugiere diferencias estadísticas entre los valores estimados y los predichos, por consiguiente, se concluyó que los modelos y parámetros estimados son válidos para aplicarlos a datos independientes. Luego se procedió al ajuste simultáneo de estos modelos y, aunque no mejoró de forma abrupta los criterios estadísticos, tuvo R^2 *adj* superiores a 98 % para los modelos de d, Vc, dsc, dd y Vd (Cuadro 9).

Los residuales de los modelos seleccionados respecto a los valores predichos del grupo de datos de ajuste, se distribuyen de forma lógica de acuerdo con las correcciones realizadas (Figura 2). Las diferencias del volumen acumulado de duramen están en amplitud ± 0.06 m³ y las de su ahusamiento en ± 6 cm. Los residuales de dsc se distribuyeron en amplitud ± 3 cm, y de ± 4 cm³ de Vsc; intervalos más

Vt in plantations without silvicultural interventions after establishment in Buenos Aires, Argentina. However, these values only corresponded to the segment of the upper level of the stump to the base of the crown (Monteoliva *et al.*, 2012). Whereas, in this study the heartwood from the base of the tree to the tip was measured.

The following proportions were calculated after excluding data from the 2-year-old group because estimates of cumulative volume and heartwood taper did not behave logically for this data set.

The average heartwood diameter in relation to the diameter inside bark observed was 88 % measured at 30 cm height and 79 % at 1.3 m. This ratio is 93 % with function 6, and 92 % with function 7 at 0.3 m height; while at a height of 1.3 m, both are 78 %.

The heartwood distribution in relation to relative height showed that the proportion of heartwood diameter decreases in the stem as relative height increases. At 50 % of H, the percentage of dd with respect to dsc is 68 % in agreement with the observed, and 70 % with the estimate with function 6, and 69 % with function 7. After 70 % of H, the proportions of heartwood taper with respect to dsc decrease; at this point the observed proportion was 62 %, and the estimated 63 %.

Validation

With the *t*-test for samples under the assumption of equal variances, the taper model of the system developed by McClure and Czaplowski (1986) obtained a two-tailed probability statistic of 0.004, and the volume statistic of 0.68, which indicated that the average of the volume estimates is not statistically different from zero, although the taper is. For this reason, the system developed by Fang *et al.* (2000) was selected for the estimation of Vc and d.

The averages of the estimates of the variables of interest with the system of Fang *et al.* (2000) and all four heartwood features had two-tailed probability statistics greater than 0.05.

The validation analysis of these models does not suggest statistical differences between the estimated and predicted values, therefore, we concluded that the models and estimated parameters are valid to apply them to independent

Cuadro 9. Estadísticos de bondad de ajuste, valores y significancia de los parámetros de los modelos seleccionados y ajustados de forma simultánea.

Table 9. Statistics of goodness of fit, values and significance of the parameters of the selected models and fitted simultaneously.

Componente	RECM	R^2 adj	DW	Parámetro	Estimación	Error estándar	Pr > t
d	1.1547	0.9820	1.54	α_0	0.0001	0.0000012	<.0001
Vc	0.0579	0.9634		α_1	1.7187	0.0106	<.0001
dsc	0.4473	0.9970		α_2	1.0849	0.014	<.0001
Vsc	0.0088	0.9990		β_1	1.7×10^{-5}	0.0000005	<.0001
dd	1.0233	0.9834	1.70	β_2	3.2×10^{-5}	0.0000003	<.0001
Vd	0.0229	0.9864		β_3	2.5×10^{-5}	0.0000014	<.0001
				ρ_1	0.1057	0.00496	<.0001
				ρ_2	0.7807	0.0227	<.0001
				γ_1	0.6534	0.0219	<.0001
				γ_2	0.6327	0.0193	<.0001
				γ_3	0.6053	0.0276	<.0001
				γ_4	0.6608	0.0283	<.0001
				ϑ_0	0.4735	0.0212	<.0001
				ϑ_1	1.2353	0.0115	<.0001
				ϑ_2	0.6573	0.0274	<.0001
				ρ_0	0.2073	0.0354	<.0001
				ρ_1	0.5298	0.0823	<.0001
				δ_0	0.9466	0.0006	<.0001
				θ_0	0.8942	0.0004	<.0001

pequeños en comparación con los otros modelos de ahusamiento.

Para el árbol elegido, el ahusamiento mostró un comportamiento lógico y esperado tanto en el fuste como en el duramen, el volumen comercial con corteza estimado es mayor que el medido. Sin embargo, el volumen comercial sin corteza y el ahusamiento sin corteza estimados son prácticamente iguales a los medidos (Figura 3).

El análisis de la validación de los modelos con un conjunto de mediciones independientes a las usadas para la estimación de los parámetros es recomendable para observar discrepancias entre los comportamientos lógicos esperados, sobre todo cuando se ajustan modelos que no han sido ampliamente usados o estudiados como fue el caso de las funciones de duramen.

Análisis de los tipos dendrométricos a partir del sistema de Fang *et al.* (2000)

El sistema de Fang *et al.* (2000) describió el fuste de *Acacia mangium* con como un fuste compuesto de tres segmentos. La forma que predomina es la de un cono en transición a paraboloides ($k = 0.41$) y

data. Then, the simultaneous fit of these models was carried out and, although the statistical criteria did not abruptly improve, it had R^2 adj higher than 98 % for the d, Vc, dsc, dd and Vd models (Table 9). The residuals of the selected models with respect to the predicted values of the fit data set are distributed logically according to the corrections made (Figure 2). The differences in the cumulative volume of heartwood are in amplitude ± 0.06 m³ and those of its taper in ± 6 cm.

The residuals of dsc were distributed in amplitude ± 3 cm, and ± 4 cm³ for Vsc; smaller intervals compared to the other taper models.

For the chosen tree, the taper showed a logical and expected behaviour both in the stem and in the heartwood; the estimated merchantable volume outside bark is greater than the measured one. However, the estimated merchantable volume outside bark and taper inside bark are practically the same as those measured (Figure 3).

The analysis of the validation of the models with a set of independent measurements to those used for the estimation of the parameters is recommended to observe discrepancies between the expected

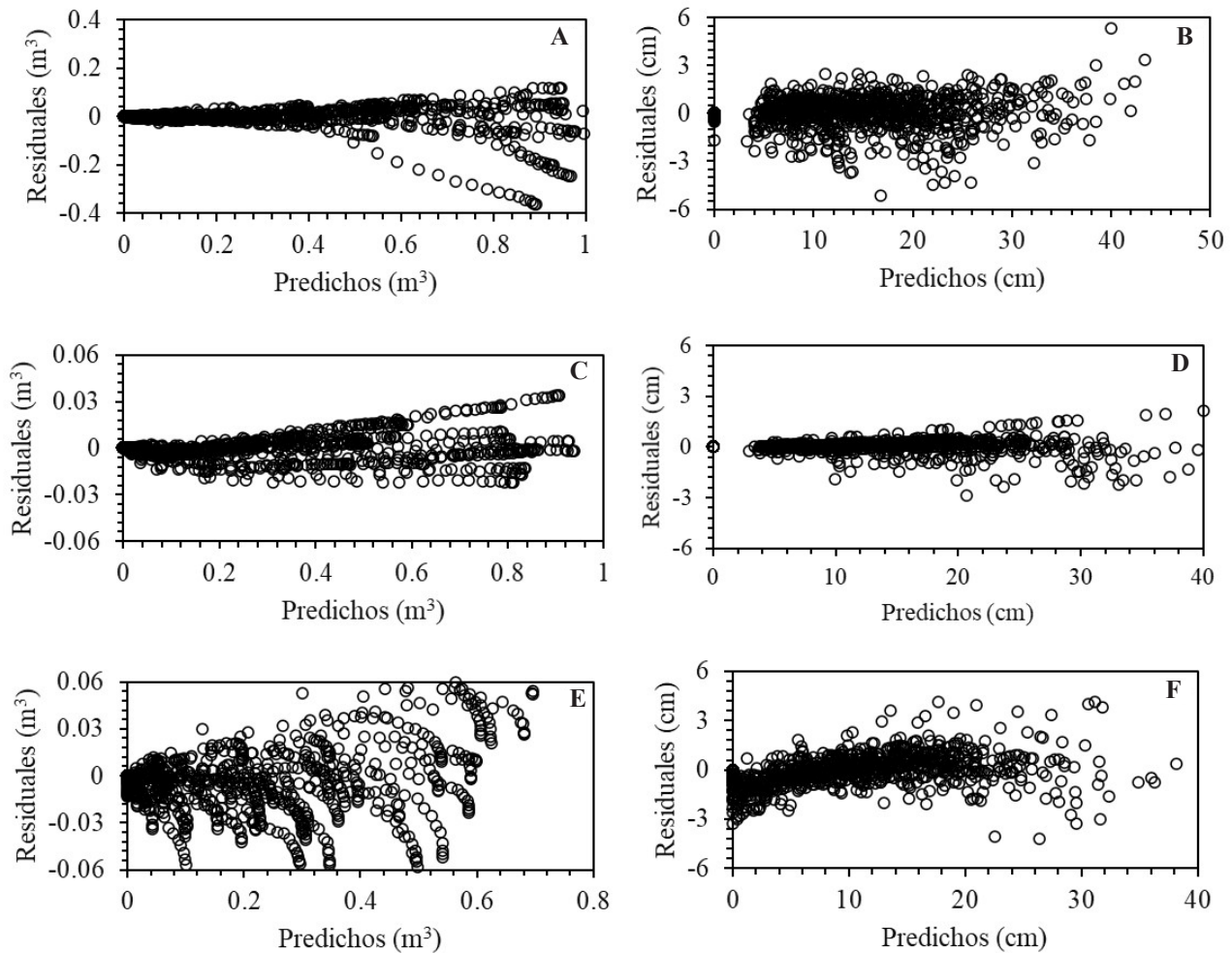


Figura 2. Distribución de los residuales del volumen comercial con corteza (A), ahusamiento con corteza (B), volumen comercial sin corteza (C), ahusamiento sin corteza (D), volumen acumulado de duramen (E) y ahusamiento de duramen (F) respecto a sus valores predichos.

Figure 2. Distribution of the residuals of the merchantable volume outside bark (A), taper outside bark (B), merchantable volume inside bark (C), taper inside bark (D), cumulative volume of heartwood (E) and taper of heartwood (F) with respect to their predicted values.

corresponde a la parte media. El primer segmento, de 0 a 11 % de la altura relativa, está descrito como un neiloide en transición al cono; mientras que el tercero, de 80 a 100 %, es una formación cónica.

Las dendroformas de *Acacia mangium* son similares a las descritas para especies del género *Eucalyptus*, como *E. grandis* y *E. dunnii* (Hirigoyen *et al.*, 2021) establecidas en plantaciones en Uruguay, y *E. camaldulensis* y *E. grandis* en plantaciones en la región del Mediterráneo oriental de Turquía (Özçelik and Göçerî, 2015) en todas ellas, el segmento medio del fuste tiene forma de cono en transición

logical behaviours, especially when fitting models that have not been widely used or studied, as was the case of heartwood functions.

Analysis of the dendrometric types from the system of Fang *et al.* (2000)

The system of Fang *et al.* (2000) described the stem of *Acacia mangium* as one composed of three segments. The predominant shape is that of a cone in transition to a paraboloid ($k=0.41$) and corresponds to the middle part. The first segment,

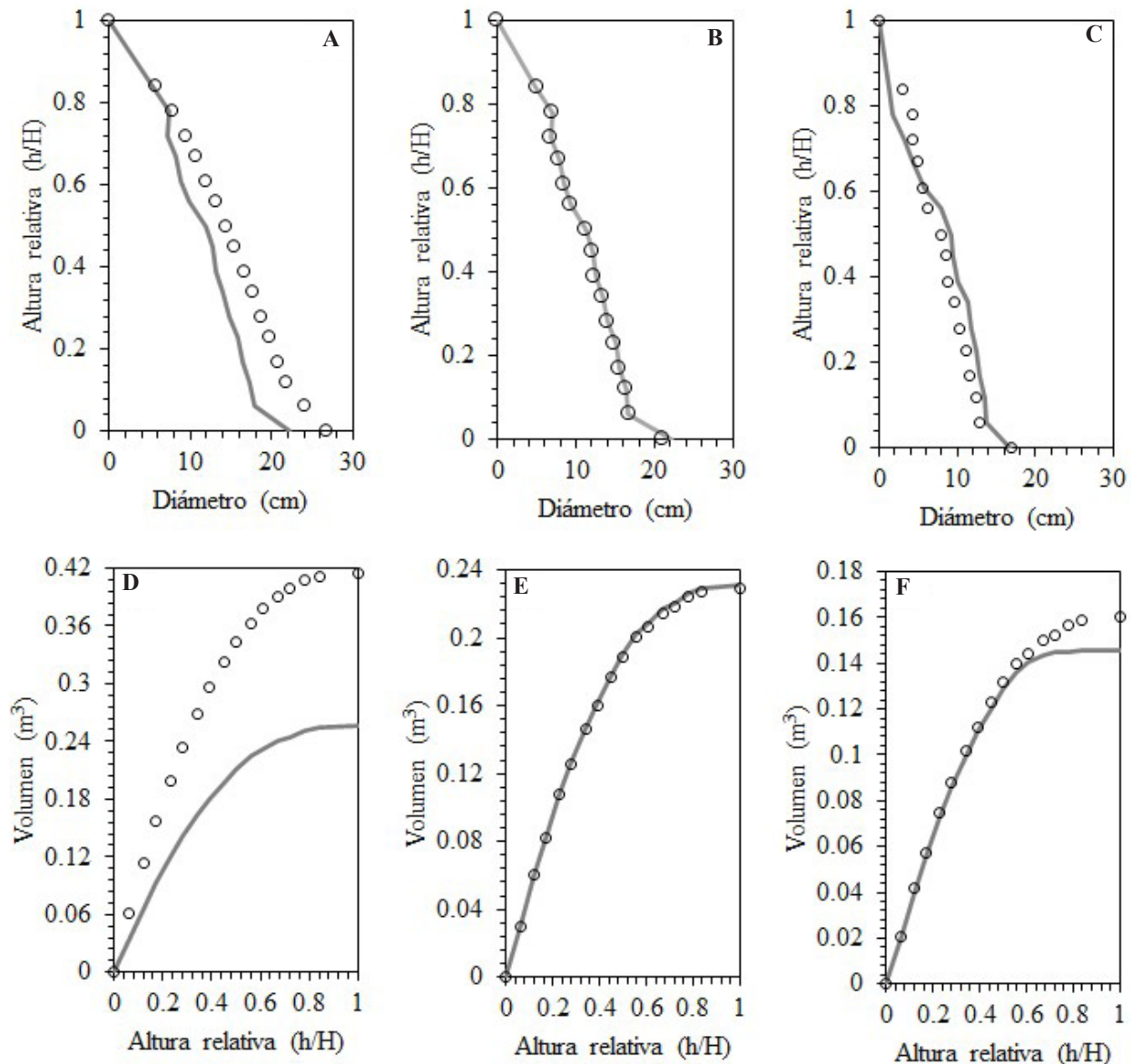


Figura 3. Estimaciones obtenidas (°) con los parámetros de los modelos seleccionados de ahusamiento con corteza, sin corteza, de duramen, volumen comercial con corteza, sin corteza y volumen acumulado de duramen respecto a los datos observados de la muestra de validación (-).

Figure 3. Estimates obtained (°) with the parameters of the selected models of taper outside bark (A), inside bark (B), heartwood (C), merchantable volume outside bark (D), inside bark (E) and cumulative volume of heartwood (F) in regard to the data observed from the validation sample (-).

a parabolóide. Esta forma de fuste evidencia el efecto del régimen de manejo y el mejoramiento genético que, al mejorar la velocidad de crecimiento, sacrifica la forma del fuste, en consecuencia, toma una forma en transición hacia sólidos más regulares como el parabolóide o el cilindro (Hernández-Ramos *et al.*, 2017).

from 0 to 11 % relative height, is described as a neiloid transitioning to a cone; while the third, from 80 to 100 %, is a conical formation.

Acacia mangium dendro-forms are similar to those described for species of the *Eucalyptus* genus, such as *E. grandis* and *E. dunnii* (Hirigoyen *et al.*, 2021), set in plantations in Uruguay; while *E.*

CONCLUSIONES

Estas plantaciones de *Acacia mangium* son de origen clonal y están bajo manejo intensivo, en consecuencia, el porcentaje de volumen acumulado y el ahusamiento de duramen que presentaron los árboles medidos evidenció el efecto del mejoramiento genético y las labores silvícolas como las podas y el espaciamiento entre árboles; además de presentar una forma fustal en transición hacia un sólido más regular como el paraboloid.

La respuesta a un régimen de manejo que favorece el crecimiento individual de los árboles es la disminución del ahusamiento del fuste y, en consecuencia, el aumento de volumen y de la proporción de duramen. Los pasos por seguir en investigaciones subsecuentes son, agregar datos de árboles de edades consecutivas para aumentar el coeficiente de determinación ajustada de la ecuación de volumen comercial con corteza; enriquecer la base de datos para comparar el crecimiento de duramen por edad; así como estudiar las variables de las funciones seleccionadas de duramen respecto a la intensidad de manejo y el índice de sitio.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para el desarrollo de los estudios de maestría. A la empresa plantadora forestal AGROPICAL S.A. de C.V. por la información proporcionada.

LITERATURA CITADA

- Bailey LR. 1995. Upper stem volumes from stem analysis data: an overlapping bolts method. *Canadian Journal of Forestry Research* 25: 170-173. <https://doi.org/10.1139/x95-020>
- Barrios A, López A, Nieto V. 2014. Predicción de volúmenes comerciales de *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón. *Colombia Forestal* 17(2): 137-149. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a01>
- Crecente-Campo F, Rojo AA, Diéguez-Aranda U. 2009. A merchantable volume system for *Pinus sylvestris* L. in the major mountains ranges of Spain. *Annals of Forest Science* 66 (808): 1-12. <https://doi.org/10.1051/forest/2009078>
- Cruz-Cobos F, De los Santos-Posadas HM, Valdez-Lazalde JR. 2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia* 42: 473-485. <https://doi.org/10.1139/x73-013>
- DeBell JD, Lachenbruch B. 2009. Heartwood/sapwood variation of western redcedar as influenced by

camaldulensis and *E. grandis* are in plantations in the eastern Mediterranean region of Turkey (Özçelik and Göçerî, 2015); in all of them, the middle segment of the stem is cone-shaped in transition to a paraboloid. This shows the effect of the management regimen and the genetic improvement that, by improving growth speed, sacrifices the shape of the stem; consequently, it takes a shape in transition towards more regular solids such as the paraboloid or the cylinder (Hernández-Ramos *et al.*, 2017).

CONCLUSIONS

These plantations of *Acacia mangium* are of clonal origin and are under intensive management; therefore, the percentage of cumulative volume and the taper of heartwood observed in the measured trees showed the effect of genetic improvement and forestry operations, such as pruning and spacing between trees; in addition to presenting a shaft shape in transition towards a more regular solid such as the paraboloid.

The response to a management regimen that favours individual tree growth is a decreased stem taper and, consequently, an increase in volume and the amount of heartwood.

The steps to follow in subsequent research are to add data from trees of consecutive ages to increase the coefficient of fitted determination of the equation of merchantable volume outside bark; enrich the database to compare heartwood growth by age; as well as study the variables of the selected heartwood functions regarding the intensity of management and the site index.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the National Council of Science and Technology (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT) for the support granted for M.Sc. studies. And the forest plantation company AGROPICAL S.A. de C.V. for the data and information provided.

—End of the English version—

---*---

- cultural treatments and position in tree. *Forest Ecology and Management* 258 2026–2032. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.054>
- Durbin J, Watson GS. 1971. Testing for serial correlation in least squares regression III. *Biometrika* 58: 1-19. <https://doi.org/10.2307/2334313>
- Fang Z, Bordes BE, Bailey RL. 2000. Compatible volume-taper models for Loblolly and Slash Pine Based on a System with Segmented-Stem Form Factors. *Forest Science* 46: 1-12. <https://doi.org/10.1093/forestscience/46.1.1>
- Giménez AM, Ríos N, Moglia G. 2000. Relación albura-duramen en tres especies arbóreas de la Región Chaqueña Seca. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales* 8: 56-63.
- Harrison SR, Herbohn JL (eds) 2001. Socio-economic Evaluation of the Potential for Australian Tree Species in the Philippines, ACIAR Monograph 75, CSIRO Publishing, 192 pp. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.114801>
- Hegde M, Palanisamy K, Yi JS. 2013. *Acacia mangium* Willd. a fast growing tree for tropical plantation. *Journal of Forestry and Environmental Science* 29: 1-14. <https://doi.org/10.7747/JFS.2013.29.1.1>
- Hernández-Ramos J, De los Santos-Posadas HM, Valdez-Lazalde JR, Tamarit-Urias JC, Ángeles-Pérez G, Hernández-Ramos A, Peduzzi A, Carrero O. 2017. Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Tabasco, México. *Acta Universitaria* 27(6): 40-52. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1484>
- Hirigoyen A, Navarro-Cerrillo R, Bagnara M, Franco J, Requin F, Rachid-Casnati C. 2021. Modelling taper and stem volume considering stand density in *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii*. *iForest* 14: 127-136. <https://doi.org/10.3832/ifer3604-014>
- Igartúa D, Monteoliva S, Piter JC. 2009. Estudio de algunas propiedades físicas de la madera de *Acacia melanoxylon* en Argentina. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 11(1): 3-18. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2009000100001>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Marco Geoestadístico Municipal. Versión 3.1. <https://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/27/27008.pdf> (Retrieved: March 2020).
- Krisnawati H, Kallio M, Kanninen M. 2011. *Acacia mangium* Willd.: ecology, silviculture and productivity. CIFOR, Bogor, Indonesia. 15 p. <https://doi.org/10.17528/cifor/003392>
- Martínez-Ángel L, De los Santos-Posadas HM, Fierros-González AM, Cruz-Cobos F, Quiñónez-Barraza G. 2019. Funciones compatibles de ahusamiento y volumen en una plantación forestal comercial de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen en Tlatlaucatepec, Puebla. *Agrociencia* 53 (3): 381-401. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1791> (Retrieved: July 2020).
- Max TA, Burkhart HE. 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. *Forest Science* 22: 283-289. <https://doi.org/10.1093/forestscience/22.3.283>
- McClure JP, Czaplewski RL. 1986. Compatible taper equation for loblolly pine. *Canadian Journal of Forestry Research* 16(6): 1272-1277. <https://doi.org/10.1139/x86-225>
- Miranda I, Gominho J, Lourenco A, Pereira H. 2006. The influence of irrigation and fertilization on heartwood and sapwood contents in 18-year-old *Eucalyptus globulus* trees. *Canadian Journal of Forestry Research* 36: 2675–2683 <https://doi.org/10.1139/x06-130>
- Miranda I, Gominho J, Pereira H. 2009. Variation of heartwood and sapwood in 18-year-old *Eucalyptus globulus* trees grown with different spacing. *Trees* 23(2): 367-372. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0285-9>
- Monteoliva S, V Ciganda, DV Igartúa. 2012. Contenido de duramen y de albura en *Eucalyptus globulus* y *Acacia melanoxylon* implantadas en Argentina. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 14(1): 53-63. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2012000100005>
- Özçelik R, MF Göçeri. 2015. Compatible merchantable stem volume and taper equations for eucalyptus plantations in the Eastern Mediterranean Region of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 39: 851-863. <https://doi.org/10.3906/tar-1501-27>
- Quiñónez-Barraza G, De los Santos-Posadas HM, Álvarez-González JG, Velázquez-Martínez A. 2014. Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia* 48: 553-567. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30232500008.pdf> (Retrieved: March 2020).
- Reyes MG, Carmona GSL, Fernández ME. 2018. Aspectos fisiológicos y de aprovechamiento de *Acacia mangium* Willd. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 12: 244-253. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7340>
- Sakici OE, N Misira, Yavuz H, Misira M. 2008. Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* in Turkey. *Scandinavian Journal of Forestry Research* 23: 522-533. <https://doi.org/10.1080/02827580802552453>
- Sharma SK, Kumar P, Rao RV, Sujatha M, Shukla SR. 2011. Rational utilization of plantation grown *Acacia mangium* Willd. *Journal of the Indian Academy of Wood Science* 8: 97–99. <https://doi.org/10.1007/s13196-012-0035-x>
- SAS Institute Inc. 2009. SAS/STAT® 9.0 (Statistical Analysis System) User's Guide. SAS Institute Inc. Raleigh, NC USA.
- Torres RJM, Magaña TOS. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Ed. Limusa. México, D. F. México. 472 p.
- Torres-Vélez DA, Del Valle JI. 2007. Growth and yield modelling of *Acacia mangium* in Colombia. *New Forest* 34: 293–305. <https://doi.org/10.1007/s11056-007-9056-5>
- Uranga-Valencia LP, De Los Santos-Posadas HM, Valdez-Lazalde JR, López-Upton J, Navarro-Garza H. 2015. Volumen total y ahusamiento para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en tres condiciones de bosque. *Agrociencia* 49: 787-801.
- Wiant JHV, GB Wood, GM Furnival. 1992. Estimating log volume using the centroid position. *Forest Science* 38:187-191. <https://doi.org/10.1093/forestscience/38.1.187>
- Winck RA, Fassola HE, Barth SR, Crechi EH, Keller AE. 2012. Ecuaciones para estimar proporción de volumen de duramen y de albura de *Eucalyptus grandis* H. 15ª Jornadas. Técnicas Forestales y Ambientales – Facultad de Ciencias Forestales – EEA. Montecarlo

del INTA. Eldorado, Misiones. Junio 2012. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13052.28807>
Zimmerman DL, Núñez-Antón V. 2001. Parametric modeling of growth curve data: an overview (with discussion). *Test* 10: 1-73. <https://doi.org/10.1007/BF02595823>

INFORMATION SOURCES IMPACT ON THE ADOPTION OF PRECISION TECHNOLOGY BY COTTON PRODUCERS IN THE UNITED STATES

FUENTES DE INFORMACIÓN IMPACTAN LA ADOPCIÓN DE TECNOLOGÍA DE PRECISIÓN POR PRODUCTORES DE ALGODÓN EN LOS ESTADOS UNIDOS

Carlos I. García-Jiménez^{1,2*}, Margarita Velandia³, Dayton M. Lambert³, Ashok K. Mishra²

¹ Departamento de Métodos Cuantitativos, CUCEA, Universidad de Guadalajara. Periférico Norte 799. Zapopan, Jalisco, México. C. P. 45100.

² Department of Agricultural Economics & Agribusiness, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA.

³ Department of Agricultural & Resource Economics, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, USA.

* Author for correspondence: cargarLSU@gmail.com

ABSTRACT

Farmers demand more precision farming technology and specific information is consumed in the adoption process, which could not only depend on how efficiently the information flows among farmers. It is assumed that the sources of information are inputs in the production processes and could have an impact on the decision to adopt precision farming technology, after controlling for farmer and farm business characteristics. Accordingly, the objective of this research was to evaluate the effects of nine information sources used by cotton farmers of 12 U.S. producer states on the adoption of yield monitor with GPS, grid soil sampling, zone soil sampling, aerial photos, and soil survey maps. The scientific utility of this research lies on the quantitative data from the Southern Cotton Precision Farming Survey analysed using statistical methods such as univariate, bivariate and multivariate probit regressions. The statistical results indicated that information from dealers, consultants, university publications, and university events were the most common information sources used when searching for precision farming information with positive and significant effects on the adoption of precision farming technology. The presented findings from this comprehensive analysis can assist organizations in selecting information sources, and on planning

RESUMEN

Los agricultores demandan más tecnología de agricultura de precisión y en el proceso de adopción se consume información específica, que podría no depender únicamente de la eficacia con la que fluyen los datos entre los agricultores. Se asume que las fuentes de información son insumos en los procesos de producción y podrían tener un impacto en la decisión de adoptar la tecnología de agricultura de precisión, después analizar las características del agricultor y de la empresa agrícola. El objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos de nueve fuentes de información utilizadas por agricultores de algodón de 12 estados productores de este cultivo en Estados Unidos para la adopción de monitor de rendimiento con geoposicionador satelital (GPS), muestreo de suelos en cuadrícula, muestreo de suelos por zonas, fotografías aéreas y mapas de estudio de suelos. La utilidad científica de esta investigación se basa en los datos cuantitativos de la encuesta 2009 U.S. Southern Cotton Precision Farming Survey (Encuesta 2009 sobre agricultura de precisión en los estados algodoneros del sur de los Estados Unidos) analizados por métodos estadísticos: regresiones probit univariada, bivariada y multivariada. Los resultados indicaron que la información procedente de distribuidores, consultores, publicaciones universitarias y eventos universitarios fueron las fuentes de información más utilizadas a la hora de buscar información sobre tecnología para agricultura de precisión, con efectos positivos y significativos sobre la adopción de dicha tecnología. Los hallazgos de este análisis amplio pueden

communications and partnerships strategies fostering technology transfer.

Keywords: *Gossypium hirsutum* L., academic partnership, informational effects, knowledge management, knowledge transfer, technology transfer.

INTRODUCTION

In the last five decades, unprecedented technological advances have occurred in communications, precision farming, plant breeding, managerial tools, input management, industrial processing, and marketing (Mohapatra *et al.*, 2018). Cotton producers have experienced gains in productivity due to those technological developments (Zhou *et al.*, 2017; Gupta *et al.*, 2018). Improvements in communications infrastructure have facilitated the dissemination of technology from innovators to adopters (Waters, 2013). Before the adoption of innovations, farmers acquire and analyse information for determining the feasibility and profitability of the new technology (Schimmelpfennig, 2016; Balafoutis, 2017). Such information may originate from different sources such as farm input dealerships, crop consultants, university extension, and media outlets (Jenkins *et al.*, 2011; Edge *et al.*, 2017).

Nevertheless, the contribution of different information sources to the adoption of precision farming technologies (PFT) remains not well understood nor conclusive (Erickson *et al.*, 2017; Pathak *et al.*, 2019). Information sources could be required for the adoption of PFT because many precision agricultural practices are more complex compared to other production technology and farm practices. It is expected that more complex technology requires a greater amount of information at various decision stages such as adoption, maintenance, and abandonment of PFT (Waters, 2013). These stages can be performed to determine profitability as decision criteria (Schimmelpfennig, 2016).

Past research on adoption of PFT through a variety of agricultural sectors has focused on understanding the effects of farmer and farm business characteristics extensively. But the role of sources of information (SI) has been neglected

ayudar a las organizaciones a seleccionar las fuentes de información y a planificar estrategias de comunicación y asociación que fomenten la transferencia de tecnología.

Palabras clave: asociación académica, efectos informativos, gestión y transferencia del conocimiento, transferencia de tecnología, extensión universitaria, asociación universitaria.

INTRODUCCIÓN

En las últimas cinco décadas, se han producido avances tecnológicos sin precedentes en comunicaciones, agricultura de precisión, cultivo de plantas, fitomejoramiento, herramientas de gestión, gestión de los insumos, procesamiento industrial y comercialización (Mohapatra *et al.*, 2018). Los productores de algodón han experimentado un aumento de la productividad gracias a esos avances tecnológicos (Zhou *et al.*, 2017; Gupta *et al.*, 2018). Las mejoras en la infraestructura de comunicaciones han facilitado la difusión de la tecnología de los innovadores a los adoptantes (Waters, 2013). Antes de adoptar las innovaciones, los agricultores adquieren y analizan información para determinar la viabilidad y la rentabilidad de la nueva tecnología (Schimmelpfennig, 2016; Balafoutis, 2017). Dicha información puede proceder de diferentes fuentes, como los distribuidores de insumos agrícolas, los consultores de cultivos, la extensión universitaria y los medios de comunicación (Jenkins *et al.*, 2011; Edge *et al.*, 2017).

Sin embargo, la contribución de las diferentes fuentes de información a la adopción de las tecnologías de agricultura de precisión (PFT) sigue sin ser bien entendida ni concluyente (Erickson *et al.*, 2017; Pathak *et al.*, 2019). Las fuentes de información podrían ser necesarias para la adopción de las PFT porque muchas prácticas agrícolas de precisión son más complejas en comparación con otras tecnologías de producción y prácticas agrícolas. Se espera que una tecnología más compleja requiera una mayor cantidad de información en varias etapas de decisión como la adopción, el mantenimiento y el abandono de las PFT (Waters, 2013). Estas etapas pueden analizarse para determinar la rentabilidad como un criterio de decisión (Schimmelpfennig, 2016).

in the literature (Zhou *et al.*, 2017). In addition, studies aimed to understand the use of SI have not evaluated their impact on adoption of PFT (Velandia *et al.*, 2010; Edge *et al.*, 2017). Based on previous evidence and the gaps documented in the literature, it is assumed that PFT constitute another input in the production process, and that there exists an underlying demand for such inputs according to output market conditions (Balafoutis *et al.*, 2017).

As farmers demand more PFT, more information is consumed in the adoption process. The adopted PFT could not only depend on how efficiently the information flows among farmers, but also on the available information sources (Velandia *et al.*, 2010). Some information sources could have no effect or simply their significance may vary across PFT (Pathak *et al.*, 2019). In the United States (U.S.) cotton production is economically important, with a prevalent use of PFT by farmers (Zhou *et al.*, 2017; Meyer, 2018). In order to monitor PFT adoption, a comprehensive evaluation is needed, ranging from private to public, to the better understanding of the adoption of agricultural precision technology (Cisternas *et al.*, 2020).

This study tested the hypothesis that the use of certain types of sources of information would positively impact the adoption of precision farming technology. The objective was to identify the sources of information used by U.S. cotton producers in 12 southern states that contribute to the adoption of precision farming technology.

MATERIALS AND METHODS

Data from the 2009 Southern Cotton Precision Farming Survey was used (Mooney *et al.*, 2010). This dataset allowed evaluating a wide range of sources of information. The evaluated SI in this study included farm input dealerships, crop consultants, university extension, other farmers, trade shows, internet, news media, university publications and university educational events. To our knowledge, this is the only dataset that can allow assessing comprehensively the effects of SI on adoption of PFT; as the latest 2013 Southern Cotton Precision Farming Survey did not record SI in a way that would allow to compare and aggregate with the 2009

Las investigaciones anteriores sobre la adopción de las PFT a través de una variedad de sectores agrícolas se han centrado en la comprensión de los efectos de las características del agricultor y de la empresa agrícola. Pero el papel de las fuentes de información (SI) se ha descuidado en la literatura (Zhou *et al.*, 2017). Además, los estudios destinados a comprender el uso de las SI no han evaluado su impacto en la adopción de las PFT (Velandia *et al.*, 2010; Edge *et al.*, 2017). Con base en las pruebas anteriores y las brechas documentadas en la bibliografía, se supone que las PFT constituyen un insumo más en el proceso de producción y que existe una demanda subyacente de dichos insumos según las condiciones del mercado de producción (Balafoutis *et al.*, 2017).

A medida que los agricultores demandan más PFT, se consume más información en el proceso de adopción. La adopción de las PFT podría depender no solo de la eficiencia con la que fluye la información entre los agricultores, sino también de las fuentes de información disponibles (Velandia *et al.*, 2010). Algunas fuentes de información podrían no tener ningún efecto o simplemente su importancia podría variar entre las PFT (Pathak *et al.*, 2019). En Estados Unidos, la producción de algodón es de importancia económica, con un uso prevalente de las PFT por parte de los agricultores (Zhou *et al.*, 2017; Meyer, 2018). Para supervisar la adopción de las PFT se necesita una evaluación integral que va desde lo privado a lo público, para la mejor comprensión de la adopción de tecnología de precisión agrícola (Cisternas *et al.*, 2020).

Este estudio puso a prueba la hipótesis de que el uso de ciertos tipos de fuentes de información tendría un impacto positivo en la adopción de la tecnología de precisión agrícola. El objetivo fue identificar las fuentes de información utilizadas por los productores de algodón de Estados Unidos en 12 estados del sur que contribuyen a la adopción de tecnología de agricultura de precisión en este cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los datos de la 2009 U.S. Southern Cotton Precision Farming Survey (Encuesta 2009 sobre agricultura de precisión en los estados aldoneros del sur de

data or previous surveys (Mooney *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2017).

The list of cotton farmers was obtained from the Cotton Board in Memphis, Tennessee (Mooney *et al.*, 2010). The survey was mailed to 13 783 cotton producers in Alabama, Arkansas, Georgia, Florida, Louisiana, Mississippi, Missouri, North Carolina, South Carolina, Tennessee, Texas, and Virginia. The response rate was 12.5 %. The initial questionnaire was mailed on February 20, 2009, with a reminder post card sent two weeks later and a follow-up mailing to producers who had not responded on March 27, 2009 (Dillman, 1978).

The final sample contained 1098 observations corresponding to farmers who reported to have planted cotton in 2008. Binary variables were constructed for denoting the adoption of diagnostic PFT such as yield monitor with GPS, grid soil sampling, zone soil sampling, aerial photos, and soil survey maps. These are the most common adopted PFT by cotton farmers (Mooney *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2017). Descriptive exploration of the data indicated that 71 % percent of cotton farmers were non-adopters of the five PFT considered in this study; 19 % of the farmers had adopted one PFT, 6.5 % of the farmers had adopted two PFT, and finally 3.5 % of the farmers had adopted three to five PFT.

Regression analyses

The data sources were analysed using probit regressions estimated with Stata® (Stata Corporation, 2007). Three sets of results are included to present viewpoints on the adoption process. Probit regressions were used based on the data collected and the binary nature of the dependent variables (Greene, 2003). Probit regressions are commonly applied in studies of adoption of precision farming technology because they facilitate the statistical evaluation of farm and farmer characteristics as well as specific determinant factors of interest to researchers (Zhou *et al.*, 2017; Cisternas *et al.*, 2020).

In the first set of results, a univariate probit regression was done. Only in this regression the dependent binary dummy variable took the value of one if the farmer adopted at least one out of five considered PFT (yield monitor with GPS, grid soil sampling, zone soil sampling, aerial photos, or soil survey maps); otherwise, it took the value of zero. Those PFT included in this analysis are the most frequently adopted by cotton farmers in the studied region (Zhou *et al.*, 2017). This allowed us to gain

Estados Unidos) (Mooney *et al.*, 2010). Este conjunto de datos permitió evaluar una amplia gama de fuentes de información. Las SI evaluadas en este estudio incluyeron distribuidores de insumos agrícolas, consultores de cultivos, extensión universitaria, otros agricultores, ferias comerciales, Internet, medios de comunicación, publicaciones universitarias y eventos educativos universitarios. Hasta donde sabemos, este es el único conjunto de datos que puede permitir evaluar de manera exhaustiva los efectos de las SI en la adopción de las PFT. Debido a que la encuesta más reciente 2013 U.S. Southern Cotton Precision Farming Survey (Encuesta 2013 sobre agricultura de precisión en los estados aldoneros del Sur de Estados Unidos) no registró las SI de una manera que permitiera compararlas y agregarlas con los datos de 2009 o con encuestas anteriores (Mooney *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2017).

La lista de agricultores de algodón se obtuvo de la Junta Pública del Algodón en Memphis, Tennessee (Mooney *et al.*, 2010). La encuesta se envió por correo a 13,783 productores de algodón de Alabama, Arkansas, Georgia, Florida, Luisiana, Misisipi, Misuri, Carolina del Norte, Carolina del Sur, Tennessee, Texas y Virginia. La tasa de respuesta fue del 12.5 %. El cuestionario inicial se envió por correo el 20 de febrero de 2009, con una tarjeta postal de recordatorio enviada dos semanas después y un envío de seguimiento el 27 de marzo de 2009 a los productores que no habían respondido.

La muestra final contenía 1098 observaciones correspondientes a los agricultores que declararon haber plantado algodón en 2008. Se construyeron variables binarias para denotar la adopción de las PFT de diagnóstico, como el monitor de rendimiento con GPS, el muestreo de suelos en cuadrícula, el muestreo de suelos por zonas, las fotos aéreas y los mapas de estudio de suelos. Estos son las PFT adoptadas con más frecuencia por los agricultores de algodón (Mooney *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2017). La exploración descriptiva de los datos indicó que el 71 % de los agricultores de algodón no adoptaron alguna de las cinco PFT consideradas en este estudio; el 19 % de los agricultores habían adoptado una PFT, el 6.5 % de los agricultores habían adoptado dos PFT y, finalmente, el 3.5 % de los agricultores habían adoptado de tres a cinco PFT.

Análisis de regresión

Las fuentes de datos se analizaron por medio de regresiones probit estimadas con Stata® (Stata Corporation,

insights from a general perspective about the effects of SI on the overall adoption of PFT.

The second analysis used a multivariate probit regression of five equations. This type of regression has been used to evaluate the use of precision farming information sources (Jenkins *et al.*, 2011), because it considers the simultaneity of choices (Greene, 2003) since individuals can simultaneously use more than one production practice, information source or technology. The dependent variables adopter and non-adopter of a particular PFT were related to independent variables on farmers, farm business characteristics and SI variables. The coefficients were obtained using simulated maximum likelihood, by employing the mvprobit procedure developed by Cappellari and Jenkins (2006). The Cappellari and Jenkins (2006) routine relies on the Geweke-Hajivassiliou-Keane choice probability simulator, where the square root of the number of observations approximates the number of draws. The coefficients for the initial iterations of the multivariate estimation were calculated from univariate probit regressions. Different numbers of random draws and seed numbers were used for assessing the robustness of the estimates.

In the third analysis, the estimation of marginal effects came from bivariate probit regressions. For this analysis, focus was set on recent technology that were more likely to be adopted simultaneously, based on an evaluation of the correlation among all the dependent variables evaluated in this study. For the bivariate regressions, we studied the effects of SI on adoption of yield monitor with GPS, grid soil sampling, and zone soil sampling technology. The correlations between the dependent variables showed the importance of recent PFT such as yield monitor with GPS in comparison with aerial photos and soil survey maps (Table 1).

Independent Variables

Farmers in the survey were asked about the use of SI to gather precision farming information; explicitly they were asked: "Where do you get your precision farming information? Mark an X below each source of information you have used previously." The available responses included farm input dealerships, crop consultants, university extension, other farmers, trade shows, internet, and news media; binary dummy variables were used to typify these SI.

(2007). Se incluyen tres conjuntos de resultados para presentar puntos de vista sobre el proceso de adopción. Se utilizaron regresiones probit debido a los datos recolectados y a la naturaleza binaria de las variables dependientes (Greene, 2003). Las regresiones probit se aplican de manera habitual en los estudios de adopción de tecnología de agricultura de precisión porque facilitan la evaluación estadística de las características de la agricultura y de los agricultores, así como de los factores determinantes específicos de interés para los investigadores (Zhou *et al.*, 2017; Cisternas *et al.*, 2020).

En el primer conjunto de resultados, se realizó una regresión probit univariante. Solo en esta regresión la variable ficticia binaria dependiente tomaba el valor de uno si el agricultor adoptaba al menos una de las cinco PFT consideradas (monitor de rendimiento con GPS, muestreo de suelos en cuadrícula, muestreo de suelos por zonas, fotos aéreas o mapas de estudio de suelos); en caso contrario, tomaba el valor de cero. Las PFT incluidas en este análisis son las adoptadas con más frecuencia por los agricultores de algodón en la región estudiada (Zhou *et al.*, 2017). Esto nos permitió obtener información desde una perspectiva general sobre los efectos de las SI en la adopción del conjunto de las PFT.

El segundo análisis utilizó una regresión probit multivariante de cinco ecuaciones. Este tipo de regresión se utiliza para evaluar el uso de las fuentes de información de la agricultura de precisión (Jenkins *et al.*, 2011), porque considera la simultaneidad de las elecciones (Greene, 2003), ya que los individuos pueden utilizar más de una práctica de producción, fuente de información o tecnología en forma simultánea. Las variables dependientes adopción y no adopción de una determinada PFT se relacionaron con las variables independientes sobre los agricultores, las características de la empresa agrícola y las variables de las SI. Los coeficientes se obtuvieron con el uso de la máxima verosimilitud simulada, con el procedimiento mvprobit desarrollado por Cappellari y Jenkins (2006). La rutina de Cappellari y Jenkins (2006) se basa en el simulador de probabilidad de elección de Geweke-Hajivassiliou-Keane, donde la raíz cuadrada del número de observaciones se aproxima al número de extracciones aleatorias. Los coeficientes para las iteraciones iniciales de la estimación multivariante se calcularon a partir de regresiones probit univariantes. Se utilizaron diferentes números de extracciones aleatorias y números generadores para evaluar la solidez de las estimaciones.

Table 1. Correlations of adopted precision farming technology.
Cuadro 1. Correlaciones de la tecnología de agricultura de precisión adoptada.

	Yield monitor with GPS	Grid soil sampling	Zone soil sampling	Aerial photos	Soil survey maps
Yield monitor with GPS	1				
Grid soil sampling	0.2731	1			
Zone soil sampling	0.1599	0.1411	1		
Aerial photos	0.1297	0.0930	0.2591	1	
Soil survey maps	0.1377	0.1453	0.2234	0.3235	1

N = 1098 observations. ♦ N = 1098 observaciones.

University extension is interpreted as the information provided by university extension personnel. Only 13.4 % of surveyed farmers indicated having used one source of information for precision farming decisions, 56 % between two and four SI, and finally 17 % of the farmers used between five and seven SI.

Farmers indicated having obtained information about precision farming from university publications and university educational events; in the sample, 34.7 and 48.4 % of cotton producers indicated having used those SI in the past five years, respectively. The corresponding questions in the survey were as follow: "Have you used university publications to obtain precision farming information in the past five years?" and "How many times have you attended university educational events or presentations related to precision farming in the past five years?" The inclusion of these information sources increases our understanding of the role of universities as sources of information about precision farming technology beyond university extension personnel and other SI such as farm input dealerships, crop consultants, extension, other farmers, trade shows, internet, and news media.

A binary dummy variable was introduced for evaluating the incidence of university publications on the adoption of PFT whereas the influence of university educational events was evaluated by the number of attended events related to precision farming during the last five years (Table 2). The Pearson correlation coefficients between extension, use of university publications, and attendance to university educational events were below 0.28, guaranteeing the necessary condition of independence of those variables in the regressions. The variance inflation factors and the condition numbers did

En el tercer análisis, la estimación de los efectos marginales procedió de regresiones probit bivariadas. Para este análisis, se fijó la atención en la tecnología reciente que tenía más probabilidades de ser adoptada de manera simultánea con base en una evaluación de la correlación entre todas las variables dependientes evaluadas en este estudio. Para las regresiones bivariadas, se estudiaron los efectos de las SI en la adopción del monitor de rendimiento con GPS, el muestreo de suelo en cuadrícula y la tecnología de muestreo de suelo por zonas. Las correlaciones entre las variables dependientes mostraron la importancia de las PFT recientes, como el monitor de rendimiento con GPS, en comparación con las fotos aéreas y los mapas de estudio del suelo (Cuadro 1).

Variables independientes

En la encuesta se preguntó a los agricultores sobre el uso del SI para recopilar información sobre la agricultura de precisión. En forma explícita se les preguntó: "¿De dónde obtiene la información sobre agricultura de precisión? Marque con una X cada fuente de información que haya utilizado". Las respuestas disponibles incluían distribuidores de insumos agrícolas, consultores de cultivos, extensión universitaria, otros agricultores, ferias comerciales, Internet y medios informativos; se utilizaron variables binarias ficticias para tipificar estas SI.

La extensión universitaria se interpreta como la información proporcionada por el personal de extensión universitaria. Sólo el 13.4 % de los agricultores encuestados indicó haber utilizado una sola fuente de información para tomar decisiones de agricultura de precisión, el 56 % entre dos y cuatro SI, y finalmente el 17 % de los agricultores utilizó entre cinco y siete SI.

Los agricultores indicaron haber obtenido información sobre la agricultura de precisión a partir de publicaciones

Table 2. Definition of variables and corresponding descriptive statistics.
Cuadro 2. Definición de las variables y estadísticas descriptivas correspondientes.

Variable	Description	Mean	Weighted Mean
Precision Farming Technologies			
Yield monitor-GPS	=1 for adoption of yield monitors with GPS [†]	0.055	0.037
Grid soil sampling	=1 for adoption of grid soil sampling [†]	0.132	0.109
Zone soil sampling	=1 for adoption of zone soil sampling [†]	0.148	0.126
Aerial photos	=1 for adoption of aerial photos [†]	0.042	0.032
Soil survey maps	=1 for adoption of soil survey maps [†]	0.062	0.05
Sources of Information:			
Dealers	=1 if information from farm dealers was used [†]	0.617	0.568
Consultants	=1 if info. from crop consultants was used [†]	0.302	0.279
Extension	=1 if info. from extension was used [†]	0.381	0.363
Farmers	=1 if info. from fellow farmers was used [†]	0.589	0.572
Trade shows	=1 if info. from trade shows was used [†]	0.309	0.289
Internet	=1 if info. from internet was used [†]	0.25	0.224
News media	=1 if info. from news media was used [†]	0.338	0.337
University events	Attended number of events	2.643	0.313
University publications	=1 if university publications were used [†]	0.347	2.443
Controls:			
Computer for management	=1 if there was computer for farm management [†]	0.541	0.472
Computer on field	=1 if there was computer usage in the field [†]	0.128	0.096
Farm size	Hectares planted with cotton	326.6	238
Percent of rented land	Rented land planted with cotton (percentage)	65.099	62.892
Age	Farmer's years of age	54.87	55.838
Farming experience	Years of farming experience	30.631	30.641
Years of schooling	Years of schooling	14.298	14.118
Income category	=1 if total income was above \$149 999 [†]	0.347	0.297
Farming income	Income fraction from farming (percentage)	74.872	68.765
AL	=1 if farm was located in Alabama [†]	0.051	0.048
AR	=1 if farm was in Arkansas [†]	0.033	0.052
FL	=1 if farm was in Florida [†]	0.017	0.012
GA	=1 if farm was in Georgia [†]	0.087	0.131
LA	=1 if farm was in Louisiana [†]	0.042	0.038
MO	=1 if farm was in Missouri [†]	0.021	0.032
MS	=1 if farm was in Mississippi [†]	0.06	0.053
NC	=1 if farm was in North Carolina [†]	0.114	0.083
SC	=1 if farm was in South Carolina [†]	0.032	0.033
TN	=1 if farm was in Tennessee [†]	0.051	0.034
VA	=1 if farm was in Virginia [†]	0.017	0.015
TX	=1 if farm was in Texas [†]	0.475	0.469

[†]=1: It indicates the condition for the values of 1 for the binary dummy variable. ♦ [†]=1: lo cual indica la condición de valor 1 para la variable ficticia binaria.

not diagnosed multicollinearity among the independent variables.

The use of computers was included in two separate independent variables: the use of a computer for farm management and for field work. About 54 % of cotton producers employed computers for management purposes while only 12.7 % of surveyed farmers stated having used computers for field operations (Table 2).

universitarias y de eventos educativos universitarios; en la muestra, el 34.7 y el 48.4 % de los productores de algodón indicaron haber utilizado esas SI en los últimos cinco años. Las preguntas correspondientes de la encuesta eran las siguientes “¿Ha utilizado publicaciones universitarias para obtener información sobre agricultura de precisión en los últimos cinco años?” y “¿Cuántas veces ha asistido a eventos educativos universitarios o

The average farm size was approximately 327 ha, one third of that land was reported as rented.

The average age of the respondents was 55 years, with an average of 30.6 years of farming experience. On average, farmers had 14.3 years of education. Off farm income by cotton producers accounted for 25.1 % of total income. Two thirds of the survey respondents had incomes below USD \$149 000 in 2007 (Table 2). The impact of farm location on precision farming adoption was assessed by using binary dummy variables indicating the state where the farm is located (Alabama, Arkansas, Florida, Georgia, Louisiana, Missouri, Mississippi, North Carolina, South Carolina, Tennessee, Virginia, and Texas). The binary dummy variable associated with farms located in Texas was excluded from the analysis to avoid multicollinearity problems (Jenkins *et al.*, 2011). Farms located in Texas represented 47.5 % of farmers in the dataset (Table 2).

Supplementary weighted results were obtained as a robustness check of the presented results, given the low response rate and the fact the size of farms represented in this survey tend to be bigger than the average size of cotton farms in the surveyed states based on the 2007 U.S. Department of Agriculture census data (Lambert *et al.*, 2014). The weights in this study were “ranking” weights as applied by Singh *et al.* (2001) which were estimated by iteratively normalizing cell weights by the Cartesian product of the marginal row (cotton farm size) and column (state cotton farm numbers) totals from the population of cotton farms according to the USDA Agricultural Census (Lambert *et al.*, 2014). The observations were grouped into 72 classes corresponding to the 12 states and six farm size classes. The estimated weighted regressions did not differ from the non-weighted regressions, thus, in the next section we present the results using the original data.

RESULTS AND DISCUSSION

This study presented three empirical analyses to assess the effects of SI on the adoption of PFT. In the first analysis, univariate probit regressions were used to evaluate the effect of SI on the adoption of PFT without specifying a particular technology. The second analysis, a multivariate probit regression to evaluate the effect of SI on the adoption of five PFT yield monitor with GPS, grid soil sampling, zone soil sampling, aerial photos,

presentaciones relacionadas con la agricultura de precisión en los últimos cinco años?” La inclusión de estas fuentes de información aumenta nuestra comprensión del papel de las universidades como fuentes de información sobre la tecnología de agricultura de precisión. Más allá del personal de extensión universitaria y de otros SI como los distribuidores de insumos agrícolas, los consultores de cultivos, la extensión, otros agricultores, las ferias comerciales, Internet y los medios informativos.

Se introdujo una variable ficticia binaria para evaluar la incidencia de las publicaciones universitarias en la adopción de las PFT, mientras que la influencia de los eventos educativos universitarios se evaluó por el número de eventos relacionados con la agricultura de precisión a los cuales se asistió, durante los últimos cinco años (Cuadro 2). Los coeficientes de correlación de Pearson entre la extensión, el uso de publicaciones universitarias y la asistencia a eventos educativos universitarios fueron inferiores a 0.28, lo cual garantizó la condición necesaria de independencia de esas variables en las regresiones. Los factores de inflación de la varianza y los números de condición no diagnosticaron multicolinealidad entre las variables independientes.

El uso de computadoras se incluyó en dos variables independientes: el uso de una computadora para la gestión de la granja agrícola y para el trabajo de campo. Alrededor del 54 % de los productores de algodón emplearon computadoras para la gestión, mientras que sólo el 12.7 % de los agricultores encuestados declararon haber utilizado computadoras para las operaciones de campo (Cuadro 2). El tamaño promedio de las granjas agrícolas era de aproximadamente 327 ha, un tercio de esas tierras se declararon como alquiladas.

La edad promedio de los encuestados era de 55 años, con un promedio 30.6 años de experiencia agrícola. Los agricultores tenían un promedio de 14.3 años de educación. Los ingresos no agrícolas de los productores de algodón representaban el 25.1 % de los ingresos totales. Dos tercios de los encuestados tenían ingresos inferiores a 149 000 dólares en 2007 (Cuadro 2). El impacto de la ubicación de la explotación en la adopción de agricultura de precisión se evaluó por medio de variables binarias ficticias que indicaban el estado en el que se encontraba la granja agrícola (Alabama, Arkansas, Florida, Georgia, Luisiana, Missouri, Mississippi, Carolina del Norte, Carolina del Sur, Tennessee, Virginia y Texas). La variable ficticia binaria asociada con las granjas agrícolas situadas

and soil survey maps) was used, allowing for these technologies to be simultaneously adopted by the farmer. The third analysis used bivariate probit regressions to evaluate the influence of SI on the adoption of PFT that were more likely to be adopted simultaneously by a large percentage of respondents (yield monitor with GPS, grid soil sampling, and zone soil sampling technology). Therefore, results of each analysis have different meaning and interpretation.

Results from the univariate probit regression implied that in general SI have positive effects on the adoption of the analysed PFT as it was expected. This statistical evidence provided support for the hypothesis that SI had an effect in the process of adoption of agricultural precision technology. The use of information from farm input dealerships had positive and significant effects on the overall adoption of precision farming practices; the marginal effect of 8.5 % was significant ($p \leq 0.01$). Information from university publications ($p \leq 0.01$) and attendance to university educational events organized by universities ($p \leq 0.05$) also had positive effects on the adoption of PFT (Table 3). These findings provided evidence of the important role university extension play in the adoption of precision farming technology. In terms of the magnitude of probability changes, the greatest marginal effect on adoption of PFT was university publications followed by information provided by farm input dealerships and trailed by the effects of university events (Table 3).

The use of university publications for obtaining precision farming information increased the probability of adoption by 11.3 %, while the use of farm input dealerships increased the probability of adoption by 8.5 %. Attending an additional event increased the probability of adopting PFT by about 0.5 % (Table 3). Each additional year of education increased the chances of adoption by about 1.13 % ($p \leq 0.1$), while the increase of 1 % in the fraction of farm income to the overall income increased the chances of adopting PFT ($p \leq 0.01$) by about 0.20 % (Table 3). There were significant regional differences; for example, farmers located in Louisiana were 49 % more likely to adopt PFT than farmers located in Texas (Table 3).

en Texas se excluyó del análisis para evitar problemas de multicolinealidad (Jenkins *et al.*, 2011). Las granjas agrícolas ubicadas en Texas representaban el 47.5 % de los agricultores del conjunto de datos (Cuadro 2).

Se obtuvieron resultados ponderados suplementarios como comprobación de la solidez de los resultados presentados; debido a la baja tasa de respuesta y a que el tamaño de las granjas agrícolas representadas en esta encuesta tendió a ser mayor que el tamaño promedio de las granjas de algodón en los estados encuestados, según los datos del Censo 2007 del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Lambert *et al.*, 2014). Las ponderaciones en este estudio fueron ponderaciones de "clasificación jerárquica" como las aplicadas por Singh *et al.* (2001), las cuales se estimaron por normalización iterativa de las ponderaciones de las celdas por el producto cartesiano de los totales marginales de las filas (tamaño de las granjas de algodón) y las columnas (número de granjas de algodón por estado) del número total de granjas de algodón según el censo agrícola del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Lambert *et al.*, 2014). Las observaciones se agruparon en 72 clases correspondientes a los 12 estados y a las seis clases de tamaño de las granjas agrícolas. Las regresiones ponderadas estimadas no difirieron de las regresiones no ponderadas. Por eso en la siguiente sección presentamos los resultados del uso de los datos originales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este estudio presentó tres análisis empíricos para evaluar los efectos de las SI en la adopción de las PFT. En el primer análisis, se utilizó regresión probit univariada para evaluar el efecto de las SI en la adopción de las PFT sin especificar una tecnología concreta. En el segundo análisis, se utilizó una regresión probit multivariada para evaluar el efecto de las SI en la adopción de cinco PFT, monitor de rendimiento con GPS, muestreo de suelo en cuadrícula, muestreo de suelo por zonas, fotos aéreas y mapas de estudio del suelo. Se permitió adopción simultánea de estas tecnologías por el agricultor. El tercer análisis utilizó regresión probit bivariada para evaluar la influencia de las SI en la adopción de las PFT que tenían más probabilidades de ser adoptadas de manera simultánea por un gran porcentaje de encuestados (monitor de rendimiento con GPS, muestreo de suelo en cuadrícula

Table 3. Marginal effects for the overall adoption of precision farming technology.
Cuadro 3. Efectos marginales para la adopción global de la tecnología de la agricultura de precisión.

Independent variables	Marginal effect	Standard error	Probability value
Dealers	0.08496	0.03196	0.0080
Consultants	0.00954	0.03349	0.7760
Extension	-0.00331	0.03286	0.9200
Farmers	0.00464	0.03119	0.8820
Trade shows	0.00479	0.03161	0.8790
Internet	0.02947	0.03798	0.4380
News media	0.04977	0.03172	0.1170
University events	0.00502	0.00248	0.0430
University publications	0.11271	0.03382	0.0010
Computer for management	0.03831	0.03228	0.2350
Computer on field	0.04070	0.04323	0.3460
Farm size	0.00005	0.00005	0.3330
Percent of own land	0.00022	0.00040	0.5810
Age	-0.00081	0.00214	0.7040
Farming experience	-0.00359	0.00198	0.0690
Years of schooling	0.01125	0.00629	0.0740
Income category	0.01341	0.02954	0.6500
Farming income	0.00203	0.00055	0.0000
AL	0.09271	0.07254	0.2010
AR	0.15514	0.08673	0.0740
FL	0.05557	0.10698	0.6030
GA	0.21336	0.06414	0.0010
LA	0.49055	0.07439	0.0000
MO	0.13291	0.13275	0.3170
MS	0.29992	0.07964	0.0000
NC	0.22689	0.05625	0.0000
SC	0.28888	0.11412	0.0110
TN	0.20617	0.08343	0.0130
VA	0.01047	0.08229	0.8990

Variable estimates were generated using probit regression; the dependent variable took the value of one if the farmer adopted at least one of the five PFT considered (yield monitor with GPS, grid soil sampling, zone soil sampling, aerial photos, or soil survey maps), otherwise, it was zero. In the sample of 1098 observations, there were 28.87 % farmers classified as adopters of at least one precision farming technology. The marginal effects were estimated at mean points of the independent variables. ♦ Las estimaciones de las variables se generaron por medio de una regresión probit; la variable dependiente tomaba el valor de uno si el agricultor adoptaba al menos una de las cinco PFT consideradas (monitor de rendimiento con GPS, muestreo de suelos en cuadrícula, muestreo de suelos por zonas, fotografías aéreas o mapas de estudio de suelos); en caso contrario, era cero. En la muestra de 1098 observaciones, el 28.87 % de los agricultores contestaron haber adoptado al menos una tecnología de agricultura de precisión. Los efectos marginales se estimaron en los puntos medios de las variables independientes.

Variable estimates were generated using probit regression; the dependent variable took the value of one if the farmer adopted at least one of the five PFT considered (yield monitor with GPS, grid soil sampling, zone soil sampling, aerial photos, or soil survey maps), otherwise, it was zero. In the sample of 1098 observations, there were 28.87 %

y tecnología de muestreo de suelo por zonas). Por lo tanto, los resultados de cada análisis tienen un significado y una interpretación diferentes. Los resultados de la regresión probit univariada implican que en general, las SI tienen efectos positivos en la adopción de las PFT analizadas, tal y como se esperaba. Esta evidencia estadística

farmers classified as adopters of at least one precision farming technology. The marginal effects were estimated at mean points of the independent variables.

In the second analysis, the effects of SI on each selected PFT were evaluated using a multivariate probit regression. After controlling for farmer and farm business characteristics, the adoption of PFT was positively impacted by SI at varying levels of significance (Table 4). Attendance to

proporcionó apoyo a la hipótesis de que las SI tienen efecto en el proceso de adopción de la tecnología de precisión agrícola. El uso de la información de los distribuidores de insumos agrícolas tuvo efectos positivos y significativos en la adopción general de las prácticas de agricultura de precisión; el efecto marginal del 8.5 % fue significativo ($p \leq 0.01$). La información procedente de publicaciones universitarias ($p \leq 0.01$) y la asistencia a eventos educativos organizados por las universidades ($p \leq 0.05$)

Table 4. Parameter estimates for adoption of precision farming technology from multivariate probit regression. **Cuadro 4.** Estimaciones de los parámetros de adopción de tecnología de agricultura de precisión a partir de regresión probit multivariada.

Independent variables	Yield monitor with GPS	Grid soil sampling	Zone soil sampling	Aerial photos	Soil survey maps
Dealers	0.1497	0.2149 c	0.2928 a	0.0012	0.2928 c
Consultants	-0.2099	0.2051 c	0.078	-0.2675	0.113
Extension	0.2061	0.0624	-0.0417	-0.0557	-0.0644
Farmers	0.1464	-0.0442	0.0897	0.0987	0.0381
Trade shows	0.1301	0.1361	0.0728	0.1574	0.0587
Internet	0.3493 c	0.0776	0.0202	0.1169	0.5054 a
News media	-0.2538	-0.1277	0.2228 b	0.4074 a	0.1061
Univ. events	0.0248 b	0.008	0.0139 c	0.0189 c	0.0179 c
Univ. publications	0.066	0.3873 a	0.2294 b	0.2142	0.1882
Computer/anagement	0.5380 b	0.4929 a	-0.1079	0.1988	-0.0323
Computer/field	0.5794 a	-0.1982	0.1879	0.3795 b	0.1501
Farm size	0.0005 a	0	0	0.0003 c	0
Percent of rented land	0.0001	-0.0030 c	0.0018	0.0028	0.0016
Age	-0.0095	0.039	-0.0025	-0.003	-0.0153
Farming experience	0.003	-0.0145	-0.0042	-0.0113	0.0071
Years of schooling	0.0103	0.039	0.0629 a	0.0034	0.0464
Income category	-0.1147	-0.1616	-0.0101	0.0126	0.1268
Farming income	0.0123 a	0.0073 a	0.0047 b	0.0066 c	0.0059 c
AL	0.7993 b	0.3322	0.4694 b	0.3977	0.8234 a
AR	1.4720 a	1.1714 a	0.3052	0.2291	-3.8071
FL	0.5309	1.2824 a	0.1543	-4.7619	-3.8214
GA	0.1245	0.8136 a	0.7887 a	-0.2564	0.3075
LA	1.6691 a	1.2819 a	0.7069 a	0.7971 a	1.0052 a
MO	0.5274	1.0362 a	0.2409	0.586	-0.0575
MS	1.4542 a	1.4109 a	0.1538	0.6799 b	0.7572 a
NC	0.7174 a	0.7829 a	0.5052 a	0.5514 b	0.9283 a
SC	0.3828	0.8752 a	0.6162 b	1.0096 a	1.1649 a
TN	0.9592 a	1.2599 a	0.2448	0.0061	0.2704
VA	1.1813 a	0.433	0.6144 c	-0.1036	1.3076 a
Constant	-4.1964 a	-2.9019 a	-2.9848 a	-3.0440 a	-3.3880 a

Sample size=1098. Number of draws=30, as recommended by Cappellari and Jenkins (2006). Overall model significance - Wald Chi² (145) = 407.47. Significance of the overall off-diagonal correlation structure - LR Chi² (10) = 88.5223. The letters a, b, and c indicate estimates are statistically different from zero at $p \leq 0.01$, $p \leq 0.05$, and $p \leq 0.10$, respectively. ♦ Tamaño de la muestra=1098. Número de extracciones=30, como recomiendan Cappellari y Jenkins (2006). Valor significativo global del modelo Wald Chi² (145) = 407.47. Valor significativo de la estructura general de correlación fuera de la diagonal LR Chi² (10) = 88.5223. Las letras a, b y c indican respectivamente que las estimaciones fueron estadísticamente diferentes de cero en $p \leq 0.01$, $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.10$.

organized events by universities had significant effects on the adoption of yield monitors with GPS ($p \leq 0.05$), as well as on the adoption of aerial photos and soil survey maps ($p \leq 0.1$). The use of university publications was a significant factor influencing the adoption of grid ($p \leq 0.01$) and zone soil sampling ($p \leq 0.05$) (Table 4). The adoption of zone soil sampling was significantly influenced by information from farm input dealerships (Table 4). The adoption of soil survey maps was influenced by information originating from farm input dealerships and the internet. In addition, the adoption of aerial photos was influenced only by the presence of information from news media. As a result, it is inferred that SI have different effects on the adoption decision depending on the PFT being evaluated, possibly due to different degrees of complexity and investment requirements (Table 4). The binary dummy variables assigned to the states where farms were located had significant effects on adoption of PFT, implying there were differences in adoption rates based on location (Mooney *et al.*, 2010) (Table 4).

The estimated marginal effects from the third analysis, the bivariate probit regression, indicated that the probability of adoption of yield monitor with GPS increased by 0.2 % for every university event that the farmer attended ($p \leq 0.1$). Results also suggested that the use of information from university publications increased the probability of adopting grid soil sampling technology by 14 % ($p \leq 0.05$), while the use of precision farming information from consultants increased its adoption by 11 % ($p \leq 0.1$) (Table 5). For the case of soil sampling adoption, it was 9 % more likely to be adopted when dealers were used as a source of precision farming information. The use of university publications increased the probability of adoption by 7.5 % ($p \leq 0.1$); while news media increased ($p \leq 0.05$) this probability by 10 % (Table 5). The adoption of yield monitor with GPS was 1.4 % more likely with an additional university event attended conditional on the adoption of zone sampling technology ($p \leq 0.1$).

The three presented statistical regression analyses provided support for the hypothesis that sources of information positively influence the adoption

también tuvieron efectos positivos en la adopción de PFT (Cuadro 3). Estos resultados proporcionaron pruebas del importante papel que desempeña la extensión universitaria en la adopción de la tecnología de la agricultura de precisión. En cuanto a la magnitud de los cambios de probabilidad, el mayor efecto marginal sobre la adopción de PFT fue el de las publicaciones universitarias, seguido de la información proporcionada por los concesionarios de insumos agrícolas y después por los efectos de los eventos universitarios (Cuadro 3).

El uso de publicaciones universitarias para obtener información sobre la agricultura de precisión aumentó la probabilidad de adopción en un 11.3 %, mientras que el uso de distribuidores de insumos agrícolas aumentó la probabilidad de adopción en un 8.5 %. La asistencia a un evento adicional aumentó la probabilidad de adoptar PFT en aproximadamente un 0.5 % (Cuadro 3). Cada año adicional de educación aumentó las probabilidades de adopción en 1.13 % ($p \leq 0.1$) aproximado, mientras que 1 % de incremento en la porción de ingreso de la granja respecto a los ingresos totales aumentó las probabilidades de adoptar las PFT ($p \leq 0.01$) en un 0.20 % (Cuadro 3). Hubo diferencias regionales significativas; por ejemplo, los agricultores ubicados en Luisiana mostraron un 49 % más de probabilidad de adoptar las PFT, que los agricultores ubicados en Texas (Cuadro 3).

En el segundo análisis, se evaluaron los efectos de las SI en cada una de las PFT seleccionadas por medio de una regresión probit multivariada. Tras controlar las características del agricultor y de la empresa agrícola, la adopción de las PFT tuvo efecto positivo significativo de las SI en distintos niveles (Cuadro 4). La asistencia a eventos organizados por las universidades tuvo efectos significativos en la adopción de monitores de rendimiento con GPS ($p \leq 0.05$), así como en la adopción de fotografías aéreas y mapas de estudio de suelos ($p \leq 0.1$). El uso de publicaciones universitarias fue un factor significativo que influyó en la adopción del muestreo de suelos por cuadrículas ($p \leq 0.01$) y por zonas ($p \leq 0.05$) (Cuadro 4). La información de los distribuidores de insumos agrícolas tuvo influencia significativa en la adopción del muestreo de suelos por zonas (Cuadro 4).

Table 5. Marginal effects of information sources on adoption of precision farming technology.**Cuadro 5.** Efectos marginales de las fuentes de información en la adopción de tecnología de agricultura de precisión.

Sources of information	Yield monitor with GPS	Grid soil sampling	Zone soil sampling
Dealers	0.0060	0.0659	
Consultants	-0.0257	0.1102 b	
Extension	0.0220	-0.0075	
Farmers	0.0193	-0.0369	
Trade shows	0.0136	0.0327	
Internet	0.0389	-0.0129	
News media	-0.0230	-0.0125	
University events	0.0023 b	-0.0003	
University publications	-0.0081	0.1399 a	
Dealers	0.0053		0.0914 a
Consultants	-0.0113		0.0445
Extension	0.0129		-0.0330
Farmers	0.0075		0.0190
Trade shows	0.0120		0.0131
Internet	0.0250		-0.0197
News media	-0.0194		0.1022 a
University events	0.0014 b		0.0030
University publications	0.0004		0.0749 b

Marginal effects of sources of information were estimated at the means of the independent variables from bivariate probit regressions (adoption of yield monitor with GPS with grid soil sampling, and yield monitor with GPS, and zone soil sampling). The letters a and b indicate estimates are statistically different from zero at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.10$, respectively.

❖ Los efectos marginales de las fuentes de información se estimaron en las medias de las variables independientes de la regresión probit bivariada (adopción de monitor de rendimiento con GPS, muestreo de suelo en cuadrícula y monitor de rendimiento con GPS, y muestreo de suelo por zonas). Las letras a y b indican respectivamente que las estimaciones fueron estadísticamente diferentes de cero en $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.10$.

of precision farming technology. This study has shown that university publications and attendance to university educational events had positive and significant effects on the adoption of PFT. These SI had not received attention before in the literature of precision farming technology adoption (McBride and Daberkow, 2003; Lambert *et al.*, 2014).

Information from dealers and consultants had the expected positive and significant effects on adoption, in contrast to university publications and education events, the effects of these SI were not regularly significant across all the regression results. The presented statistical evidence supported the hypothesis of this study, even though the effects of SI vary across PFT. These results implied that studying specific technology is recommended

La información procedente de los distribuidores de insumos agrícolas y de internet influyó en la adopción de los mapas de estudio de suelos. Además, la presencia de información procedente de los medios informativos influyó en la adopción de fotografías aéreas. En consecuencia, se infiere que las SI tienen efectos diferentes en la decisión de adopción según la PFT evaluada; es posible que debido a los diferentes grados de complejidad y requisitos de inversión (Cuadro 4). Las variables binarias ficticias asignadas a los estados en los que se encontraban las granjas agrícolas tuvieron efectos significativos sobre la adopción de las PFT. Esto implica que hubo diferencia en las tasas de adopción con base en la ubicación (Mooney *et al.*, 2010; Cuadro 4).

rather than bundles of PFT (Cisternas *et al.*, 2020). Therefore, studying disaggregated SI is more informative than SI analysed on broad categories (McBride and Daberkow, 2003; Velandia *et al.*, 2010).

These results suggested that universities play an important role in disseminating objective information demanded by farmers. Universities have high credibility as a source of information among farmers because they provide objective information linked to research results and not subjected to the interest of companies on selling technology, products, and services. This credibility has been the product of an established long-term relationship based on trust, constant support, and effectiveness as perceived by the reliability and relevance of information provided over decades of continuous service (Jenkins *et al.*, 2011; Mohapatra *et al.*, 2018). Considering that university extension is significantly influencing PFT adoption, providers of PFT and government agencies should foster stronger partnerships with them (Warner *et al.*, 2017; de Wit-de Vries *et al.*, 2019).

Previously discussed results indicate that private SI were also significant factors in the adoption of PFT; for instance, information from farm input dealerships, consultants and news media were the resources that had positive and significant influence on the adoption of the PFT. These results were consistent with the findings of McBride and Daberkow (2003) and Edge *et al.* (2017) who have pointed out the increasing importance and usage of input suppliers as private sources of information. This suggests that stronger and more active cooperation between the public and private sector is recommended, given that broader extension services provided by universities and private SI are contributing factors to the adoption of PFT.

Even though the utilized dataset contained more than a thousand observations from surveyed cotton farmers, this research may incentivize data collection on a wider variety of sources of information such as social networks (Yaseen *et al.*, 2018). In addition, data collection must be consistent across time periods to continue investigating the effects of information on adoption of PFT considering the farm data lifecycle (Thompson *et*

Los efectos marginales estimados del tercer análisis, la regresión probit bivariada, indicaron que la probabilidad de adopción del monitor de rendimiento con GPS aumentaba en un 0.2 % por cada evento universitario al que asistiera el agricultor ($p \leq 0.1$). Los resultados también sugirieron que el uso de información de publicaciones universitarias aumentó la probabilidad de adoptar la tecnología de muestreo de suelos en cuadrícula en un 14 % ($p \leq 0.05$), mientras que el uso de información sobre agricultura de precisión de consultores aumentó su adopción en un 11 % ($p \leq 0.1$) (Cuadro 5). Para el caso de la adopción del muestreo de suelos, fue un 9 % más probable su adopción cuando se utilizó a los distribuidores como fuente de información de agricultura de precisión. El uso de publicaciones universitarias aumentó la probabilidad de adopción en un 7.5 % ($p \leq 0.1$); mientras que los medios informativos aumentaron ($p \leq 0.05$) esta probabilidad en un 10 % (Cuadro 5). La adopción del monitor de rendimiento con GPS fue 1.4 % más probable con cada evento universitario adicional al que se asistió condicionado a la adopción de tecnología de muestreo por zona ($p \leq 0.1$).

Los tres análisis estadísticos de regresión presentados respaldaron la hipótesis de que las fuentes de información tienen influencia positiva en la adopción de tecnología de agricultura de precisión. Este estudio demostró que las publicaciones universitarias y la asistencia a eventos educativos universitarios tuvieron efectos positivos y significativos en la adopción de las PFT. Estas SI no habían recibido atención antes en la literatura de adopción de tecnología de agricultura de precisión (McBride y Daberkow, 2003; Lambert *et al.*, 2014).

La información de los distribuidores y consultores tuvo los efectos positivos y significativos esperados en la adopción, en contraste con las publicaciones universitarias y los eventos educativos. Los efectos de estas SI no fueron regularmente significativos en todos los resultados de la regresión. Las pruebas estadísticas presentadas apoyaron la hipótesis de este estudio, aunque los efectos de las SI variaron de acuerdo con las PFT. Estos resultados implican que lo recomendable es estudiar una tecnología específica, en lugar de un conjunto de PFT (Cisternas *et al.*, 2020). Por lo tanto, estudiar

al., 2021). This will allow researchers to monitor changes in preferences for sources of information and their effects. However, it is expected that the new findings may not differ from those presented, especially the statistically significant effects for the most recent technologies (Miller *et al.*, 2017).

Further surveys aiming at the understanding of adoption of PFT are advisable; as well as to consider gathering data on farmers using information that comes from partnerships among private and public sources. Such new data may assist institutions and manufacturers of PFT to adapt their strategic communication plans on different geographic locations (Bressler *et al.*, 2021).

CONCLUSIONS

Statistical support was obtained through this study for the notion that public and private sources of information contributed positively to the adoption of precision farming technology after controlling for farm and farmers characteristics. Attendance to university events and use of university publications were important sources of information impacting significantly the adoption of precision farming technology. Thus, emphasizing the relevance of universities extending information, which exerts an important influence on the adoption of technology, such as yield monitor with global position systems, grid soil sampling, and zone soil sampling technology.

Private information sources were also important and significant suppliers of information for cotton farmers. Private sources of information such as farm input dealers, consultants and news media positively influenced the adoption of precision farming technology. Consequently, public information sources together with private suppliers of information had become the channels of communication between the manufacturers of precision farming technology and the farmers.

The use of these private and public information sources impacted positively the technology implementation decisions in the US cotton production sector. It is also apparent, that input suppliers and manufacturers of precision farming technology would benefit from strategic partnerships with universities and

las SI desagregadas es más informativo que las SI se analizaran en categorías amplias (McBride y Daberkow, 2003; Velandia *et al.*, 2010).

Estos resultados sugieren que las universidades desempeñan un papel importante en la difusión de la información objetiva que demandan los agricultores. Las universidades tienen una gran credibilidad como fuente de información entre los agricultores porque proporcionan información objetiva vinculada a los resultados de la investigación y no sometida al interés de las empresas por vender tecnología, productos y servicios. Esta credibilidad ha sido producto de una relación establecida a largo plazo con base en confianza, apoyo constante y eficacia percibida por la fiabilidad y la relevancia de la información proporcionada durante décadas de servicio continuo (Jenkins *et al.*, 2011; Mohapatra *et al.*, 2018). Al tomar en cuenta que la extensión universitaria influye en la adopción de las PFT de modo significativo, los proveedores de las PFT y las agencias gubernamentales deberían fomentar asociaciones más fructíferas con las universidades (Warner *et al.*, 2017; de Wit-de Vries *et al.*, 2019).

Los resultados discutidos antes indican que las SI privadas también fueron factores significativos en la adopción de las PFT; por ejemplo, la información de los distribuidores de insumos agrícolas, los consultores y los medios informativos fueron los recursos que tuvieron una influencia positiva y significativa en la adopción de las PFT. Estos resultados fueron consistentes con los hallazgos de McBride y Daberkow (2003) y Edge *et al.* (2017) que han señalado la creciente importancia y uso de los proveedores de insumos como fuentes privadas de información. Esto sugiere la recomendación de una cooperación más fructífera y activa entre el sector público y el privado, dado que los servicios de extensión más amplios proporcionados por las universidades y las SI privadas son factores que contribuyen a la adopción de las PFT.

Aunque el conjunto de datos utilizado contenía poco más de mil observaciones de agricultores de algodón encuestados, esta investigación puede incentivar la recopilación de datos sobre una mayor variedad de fuentes de información, como las redes sociales (Yaseen *et al.*, 2018). Además, la recopilación de datos debe ser consistente a lo largo

their extension specialists, more involved with farmer communities. Due to their proficiency and experience in understanding the function of information in a knowledge-driven economy.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by Cotton Incorporated grant #07-131 and the Land Grant Universities of Louisiana, Florida, Mississippi, North Carolina, Tennessee, and Texas. Appreciation for providing insightful comments goes to Dr. Kenneth W. Paxton, Michael E. Salassi, and Dr. Jeffrey M. Gillespie from the Department of Agricultural Economics and Agribusiness at Louisiana State University. Also, appreciation goes to Vesna Karaman-Castro and Yalma L. Vargas-Rodriguez for subsequent manuscript revisions. The appreciation is extended to editors and anonymous reviewers.

REFERENCES

- Balafoutis A, Beck B, Fountas S, Vangeyte J, Wal T, Soto I, Gómez-Barbero M, Barnes A, Eory V. 2017. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability* 9 (8): 1–28. <https://doi.org/10.3390/su9081339>
- Bressler A, Plumhoff M, Hoey, L Blesh J. 2021. Cover crop champions: linking strategic communication approaches with farmer networks to support cover crop adoption. *Society and Natural Resources* 34 (12): 1–19. <https://doi.org/10.1080/08941920.2021.1980165>
- Cappellari L, Jenkins SP. 2006. Calculation of multivariate normal probabilities by simulation, with applications to maximum simulated likelihood estimation. *The Stata Journal* 6: 156–189. <https://doi.org/10.1177/1536867X0600600202>
- Cisternas I, Velásquez I, Caro A, Rodríguez A. 2020. Systematic literature review of implementations of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 176: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626>
- de Wit-de Vries E, Dolfsma WA, van der Windt HJ, Gerkema1 MP. 2019. Knowledge transfer in university–industry research partnerships: a review. *Journal of Technology Transfer* 44: 1236–1255. <https://doi.org/10.1007/s10961-018-9660-x>
- Edge B, Velandia M, Lambert DM, Roberts RK, Larson JA, English BC, Boyer C, Rejesus RM, Mishra A. 2017. Changes in the use of precision farming information sources among cotton farmers and implications for extension. *Journal of Extension* 55 (2): 1–8.
- Erickson B, Lowenberg-DeBoer J, Bradford J. 2017. 2017 Precision Agriculture Dealership Survey. Department of Agricultural Economics and Department of Agronomy, Purdue University. Lafayette, IN. USA. 27 p. <https://ag.purdue.edu/digital-ag-resources/wp-content/uploads/2019/11/>

de los periodos de tiempo para seguir con la investigación de los efectos de la información sobre la adopción de las PFT y los ciclos de vida de los datos de aprovechamiento (Thompson *et al.*, 2021). Esto permitirá a los investigadores supervisar los cambios en las preferencias por las fuentes de información y sus efectos. Sin embargo, se espera que los nuevos resultados no difieran de los presentados; en especial, los efectos estadísticos significativos para las tecnologías más recientes (Miller *et al.*, 2017).

Es conveniente realizar más encuestas destinadas a conocer la adopción de las PFT; así como estudiar la posibilidad de recopilar datos sobre los agricultores a través de información procedente de la cooperación entre fuentes privadas y públicas. Esta nueva clase de datos puede ayudar a las instituciones y a los fabricantes de las PFT a adaptar sus planes estratégicos de comunicación en diferentes lugares geográficos (Bressler *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

Este estudio aportó apoyo estadístico a la idea de que las fuentes de información pública y privada contribuyen en forma positiva a la adopción de tecnología de agricultura de precisión, tras controlar las características de las granjas agrícolas y los agricultores. La asistencia a eventos universitarios y el uso de publicaciones universitarias fueron fuentes de información importantes que influyeron de manera significativa en la adopción de la tecnología de la agricultura de precisión. Se destaca la importancia de la extensión universitaria, la cual ejerce una influencia importante en la adopción de tecnología como, monitor de rendimiento con sistema global de posicionamiento, muestreo de suelos en cuadrícula y muestreo de suelos por zonas.

Las fuentes de información privadas también fueron proveedoras de información importante y significativa para los agricultores de algodón. Las fuentes de información privadas, como los distribuidores de insumos agrícolas, los consultores y los medios informativos, tuvieron influencia positiva en la adopción de la tecnología de agricultura de precisión. Por consiguiente, las fuentes

- CropLife-Purdue-2017-Precision-Dealer-Survey-Report.pdf (Retrieved: March 2020).
- Greene W. 2003. Econometric analysis. Prentice Hall. New Jersey. USA.
- Gupta A, Kagin J, Taylor JE, Filipinski M, Hlanze L, Foster J. 2018. Is technology change good for cotton farmers? A local-economy analysis from the Tanzania lake zone. *European Review of Agricultural Economics* 45 (1): 27–56. <https://doi.org/10.1093/erae/jbx022>
- Jenkins A, Velandia M, Lambert DM, Roberts RK, Larson JA, English BC, Martin SW. 2011. Factors influencing selection of precision farming information sources by cotton producers. *Agricultural and Resource Economics Review* 40 (2): 307–320. <https://doi.org/10.1017/S106828050000808X>
- Lambert DM, English BC, Harper DC, Larkin SL, Larson JA, Mooney DF, Roberts RK, Velandia M, Reeves JM. 2014. Adoption and frequency of precision soil testing in cotton production. *Journal of Agricultural and Resource Economics* 39 (1): 106–123.
- McBride WD, Daberkow SG. 2003. Information and the adoption of precision farming technologies. *Journal of Agribusiness* 21 (1): 21–28. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.14671>
- Meyer LA. 2018. Cotton and Wool Outlook. Economic Research Service. Situation and Outlook Report Series. Released date: December 13, 2018. United States Department of Agriculture. Washington, D. C. USA. 16 p. <https://www.ers.usda.gov/webdocs/outlooks/90245/cws-18i-01.pdf?v=6681.5> (Retrieved: July 2020).
- Miller NJ, Griffin TW, Bergtold J, Ciampitti IA, Sharda A. 2017. Farmers' adoption path of precision agriculture technology. *Advances in Animal Biosciences* 8: 708–712. <https://doi.org/10.1017/S2040470017000528>
- Mohapatra AG, Keswani B, Lenka SK. 2018. ICT specific technological changes in precision agriculture environment. *International Journal of Computer Science Mobile Applications* 6 (1): 1–16.
- Mooney DF, Roberts RK, English BC, Lambert DM, Larson JA, Velandia M, Larkin SL, Marra MC, Martin SW, Mishra A, Paxton KW, Rejesus R, Segarra E, Wang C, Reeves JM. 2010. Precision farming by cotton producers in twelve southern states: Results from the 2009 southern cotton precision farming survey. Research Series 10-02, No 91333. Department of Agricultural and Resource Economics, University of Tennessee. Knoxville, TN. USA. 65 p. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.91333>
- Pathak HS, Brown P, Best T. 2019. A systematic literature review of the factors affecting the precision agriculture adoption process. *Precision Agriculture* 20: 1292–1316. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09653-x>
- Schimmelpfennig D. 2016. Farm profits and adoption of precision agriculture, ERR-217. United States Department of Agriculture, Economic Research Service. Economic Research Report 217: 1–46. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.249773>
- Singh MP, Hidirolou MA, Gambino JG, Kovačević MS. 2001. Estimation methods and related systems at Statistics Canada. *International Statistical Review* 69 (3): 461–485. <https://doi.org/10.1111/j.1751-5823.2001.tb00470.x>

de información públicas, junto con los proveedores de información privados, se han convertido en canales de comunicación entre los fabricantes de tecnología de agricultura de precisión y los agricultores.

El uso de estas fuentes de información privada y pública influyó de manera positiva en las decisiones de adopción de la tecnología en el sector productivo del algodón en Estados Unidos. También es posible que los proveedores de insumos y los fabricantes de tecnología de agricultura de precisión se beneficien a partir de una asociación estratégica con las universidades y sus especialistas en extensión. Debido a que ellos están más involucrados con las comunidades de agricultores, gracias a sus competencias y experiencia en la comprensión de la función de la información en una economía impulsada por el conocimiento.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue financiada por la beca #07-131 de Cotton Incorporated y por las Universidades (landgrant) de Luisiana, Florida, Mississippi, Carolina del Norte, Tennessee y Texas. Se agradecen las reflexivas aportaciones de Dr. Kenneth W. Paxton, Michael E. Sallasi y el Dr. Jeffrey M. Gillespie del Departamento de Economía Agrícola y Agronegocios de la Universidad Estatal de Luisiana. También se agradece a Vesna Karaman-Castro y Yalma L. Vargas-Rodríguez por las revisiones subsecuentes del manuscrito.

—Fin de la versión en español—

-----*-----

Stata Corporation. 2007. Stata reference manual. Stata Press. Texas. USA.

Thompson NM, DeLay ND, Mintert JR. 2021. Understanding the farm data lifecycle: collection, use, and impact of farm data on US commercial corn and soybean farms. *Precision Agriculture* 22: 1685–1710. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09807-w>

Velandia M, Lambert DM, Jenkins A, Roberts RK, Larson JA, English BC, Martin SW. 2010. Precision farming information sources used by cotton farmers and implications for extension. *Journal of Extension* 48 (5): 1–7.

Warner LA, Vavrina CS, Campbell ML, Elliott ML, Northrop RJ, Place NT. 2017. A strategic plan for introducing, implementing, managing, and

- monitoring an urban extension platform. *Journal of Extension* 55 (3): 1–21.
- Waters J. 2013. The influence of information sources on inter- and intra-firm diffusion: evidence from UK farming. MPRA Paper 50955. University Library of Munich, Germany. 35 p. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2355194 (Retrieved: October 2021).
- Yaseen M, Ahmad MM, Soni P. 2018. Farm households' simultaneous use of sources to access information on cotton crop production. *Journal of Agricultural and Food Information* 19 (2): 149–161. <https://doi.org/10.1080/10496505.2017.1325743>
- Zhou X, English BC, Larson JA, Lambert DM, Roberts RK, Boyer CN, Velandia M, Falconer LL, Martin SW. 2017. Precision farming adoption trends in the Southern US. *The Journal of Cotton Science* 21 (2): 143–155.

Agrociencia

Volumen 56, Número 1

1 de enero - 15 de febrero, 2022