

TERRA

Latinoamericana



Órgano Oficial de Divulgación de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

Octubre • Diciembre de 2016 • Volumen 34 • Número 4 ISSN 2395-8030

TERRA LATINOAMERICANA

OCTUBRE – DICIEMBRE DE 2016 • VOLUMEN 34 • NÚMERO 4

<http://www.terralatinoamericana.org.mx>

<http://www.chapingo.mx/terra/>

Terra Latinoamericana es una publicación trimestral de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. y tiene como finalidad difundir la investigación edafológica generada en el ámbito latinoamericano.

Terra Latinoamericana está incluida en el índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica del CONACyT

Terra Latinoamericana está incluida en la red de colecciones de revistas científicas SciELO México.

Terra Latinoamericana está incluida en la Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal (REDALyC).

Terra Latinoamericana está indizada en AGRIS (FAO), AGRICOLA (USDA), CAB ABSTRACTS y PERIODICA.

TERRA LATINOAMERICANA

COMITÉ EDITORIAL

EDITORA

Dra. Mariela Hada Fuentes Ponce
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco

COEDITOR

Dr. David Espinosa Victoria
Colegio de Postgraduados Campus Montecillo

EDITORES ADJUNTOS

Dr. Jorge D. Etchevers Barra
Colegio de Postgraduados

Dr. Manuel Sandoval Villa
Colegio de Postgraduados

Dra. Claudia Hidalgo Moreno
Colegio de Postgraduados

Dr. Fernando De León González
Universidad Autónoma Metropolitana

Dra. Norma E. García Calderón
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. David Cristóbal Acevedo
Universidad Autónoma Chapingo

Dra. Elizabeth Hernández Acosta
Universidad Autónoma Chapingo

EDITORA DE ESTILO EN INGLÉS

Diane Fumiko Miyoshi Udo

EDITORA DE FORMATO

Rosa María López Atilano

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

Eva Geraldina Vázquez Martínez

WEBMASTER

Lic. Cristopher Escalera de la Rosa

Fotografía Portada

Ivan Novotny

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

Dr. Antonio Turrent Fernández
Dr. Carlos Ortiz Solorio
Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Oscar L. Palacios Vélez
Dr. Ronald Ferrera Cerrato

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

Dr. Alberto Hernández
Dr. Bernardo Van Raij
Dr. Christian Prat
Dr. Daniel Buschiazzo E.
Dr. Donald L. Suarez
Dr. Eric S. Jensen
Dr. Fernando Santibañez Q.
Dra. Floria Bertsch Hernández
Dr. Hari Eswaran
Dr. Héctor J. M. Morrás
Dr. Jorge A. Delgado
Dr. José Aguilar Ruiz
Dr. José M. Hernández Moreno
Dr. Juan F. Gallardo Lancho
Dr. Karl Stahr
Dr. Narciso Pastor Saez
Dr. Rafael Villegas Delgado
Dr. Renato Grez Z.
Dr. Walter Luzio Leighton
Dr. Winfried E. H. Blum

Cuba
Brasil
Francia
Argentina
EE. UU.
Dinamarca
Chile
Costa Rica
EE. UU.
Argentina
EE. UU.
España
España
España
Alemania
España
Cuba
Chile
Chile
Austria

TERRA LATINOAMERICANA

EDITORIAL COMMITTEE

EDITOR

Dra. Mariela Hada Fuentes Ponce
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco

COEDITOR

Dr. David Espinosa Victoria
Colegio de Postgraduados Campus Montecillo

ASSOCIATE EDITORS

Dr. Jorge D. Etchevers Barra
Colegio de Postgraduados

Dr. Manuel Sandoval Villa
Colegio de Postgraduados

Dra. Claudia Hidalgo Moreno
Colegio de Postgraduados

Dr. Fernando De León González
Universidad Autónoma Metropolitana

Dra. Norma E. García Calderón
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. David Cristóbal Acevedo
Universidad Autónoma Chapingo

Dra. Elizabeth Hernández Acosta
Universidad Autónoma Chapingo

ENGLISH EDITOR

Diane Fumiko Miyoshi Udo

FORMAT EDITOR

Rosa María López Atilano

EDITORIAL STAFF

Eva Geraldina Vázquez Martínez

WEBMASTER

Lic. Cristopher Escalera de la Rosa

Cover Photograph

Ivan Novotny

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Antonio Turrent Fernández
Dr. Carlos Ortiz Solorio
Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Oscar L. Palacios Vélez
Dr. Ronald Ferrera Cerrato

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Alberto Hernández
Dr. Bernardo Van Raij
Dr. Christian Prat
Dr. Daniel Buschiazzi E.
Dr. Donald L. Suarez
Dr. Eric S. Jensen
Dr. Fernando Santibañez Q.
Dra. Floria Bertsch Hernández
Dr. Hari Eswaran
Dr. Héctor J. M. Morrás
Dr. Jorge A. Delgado
Dr. José Aguilar Ruiz
Dr. José M. Hernández Moreno
Dr. Juan F. Gallardo Lancho
Dr. Karl Stahr
Dr. Narciso Pastor Saez
Dr. Rafael Villegas Delgado
Dr. Renato Grez Z.
Dr. Walter Luzio Leighton
Dr. Winfried E. H. Blum

Cuba
Brasil
Francia
Argentina
EE. UU.
Dinamarca
Chile
Costa Rica
EE. UU.
Argentina
EE. UU.
España
España
España
Alemania
España
Cuba
Chile
Chile
Austria

TERRA LATINOAMERICANA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A. C.

MESA DIRECTIVA 2016-2018

Presidente	Dr. Enrique Troyo Diéguez
Vicepresidente	Dr. Juan Pedro Flores Margez
Secretario General	Dr. Félix Alfredo Beltrán Morales
Tesorera	Dra. Norma Eugenia García Calderón
Secretario de Relaciones Públicas	Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez
Secretario Técnico	Dr. Juan Manuel Cortés Jiménez
Secretario de Eventos Nacionales e Internacionales	M.C. Baltazar Corral Díaz
Coordinador de Comité de Apoyo	Dra. Catarina Loreda Osti
Primer Vocal	Dr. Armando Guerrero Peña
Segundo Vocal	Dra. Claudia Isabel Hidalgo Moreno

TERRA LATINOAMERICANA

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.
Octubre - Diciembre de 2016 Volumen 34 · Número 4

ISSN ELECTRÓNICO 2395-8030

Los artículos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta revista, citándola como fuente de información. Las contribuciones a esta revista deben enviarse en versión electrónica conforme a las Normas para Publicación en la Revista TERRA LATINOAMERICANA a:

<http://www.revistas-conacyt.unam.mx/terra/index.php/terra/author/submit>

Editor de la Revista TERRA LATINOAMERICANA. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, estado de México, México.

Oficina: Edificio del Departamento de Suelos
Universidad Autónoma Chapingo
56230 Chapingo, Estado de México.

Teléfono: 01(595) 95 2 17 21

TERRA LATINOAMERICANA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A. C.

BOARD 2016-2018

President	Dr. Enrique Troyo Diéguez
Vicepresident	Dr. Juan Pedro Flores Margez
Secretary	Dr. Félix Alfredo Beltrán Morales
Treasurer	Dra. Norma Eugenia García Calderón
Public Relations	Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez
Technical Adviser	Dr. Juan Manuel Cortés Jiménez
National and International Events	M.C. Baltazar Corral Díaz
Coordinator Support Committee	Dra. Catarina Loredo Osti
Voters	Dr. Armando Guerrero Peña Dra. Claudia Isabel Hidalgo Moreno

TERRA LATINOAMERICANA

Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
October - December, 2016 Volume 34 · Number 4

ISSN 2395-8030 (Online)

The authors take full responsibility for the articles published. Partial or total reproduction of the content of this journal is authorized, as long as this publication is cited as the information source. When submitting articles to this journal an electronic version must be sent to:

<http://www.revistas-conacyt.unam.mx/terra/index.php/terra/author/submit>

Editor de la Revista TERRA LATINOAMERICANA, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, estado de México, México.

Office address: Soils Department building
Universidad Autónoma Chapingo
56230 Chapingo, Estado de México.

Telephone: +52 (595) 952 17 21

TERRA

LATINOAMERICANA

OCTUBRE - NOVIEMBRE DE 2016 • VOLUMEN 34 • NÚMERO 4
OCTOBER - NOVEMBER, 2016 • VOLUME 34 • NUMBER 4

- 385** Dissipation of glyphosate from grapevine soils in Sonora, Mexico.
Disipación de glifosato en suelos de viñedos en Sonora, México.
Norma J. Salazar López, María I. Silveira Gramont, Fabiola G. Zuno Floriano, Guillermo Rodríguez Olibarría, Matt Hengel, and María L. Aldana Madrid
- 393** Desarrollo radical y rendimiento en diferentes variedades de trigo, cebada y triticale bajo condiciones limitantes de humedad del suelo.
Root development and yield in different genotypes of bread wheat, barley and triticale under limiting soil moisture conditions.
Luis Eduardo Miranda Domínguez, Cándido López Castañeda, Ignacio Benítez Riquelme y José Apolinar Mejía Contreras
- 409** Perspectiva del diseño cartográfico para estudios de uso del suelo y ordenamiento territorial: una revisión internacional, técnica y normativa.
Perspective of cartographic design for land use and land management studies: an international, technical and policy review.
Laura Cano Salinas, Rodrigo Rodríguez Laguna, José René Valdez Lazalde, Rosa Icela Beltrán Hernández, César Abelardo González Ramírez y Otilio Arturo Acevedo Sandoval
- 419** Eficiencia agronómica, rendimiento y rentabilidad de genotipos de maíz en función del nitrógeno.
Agronomic efficiency, grain yield and profitability of maize genotypes in function of nitrogen.
Cid Aguilar Carpio, José Alberto Salvador Escalante Estrada, Immer Aguilar Mariscal, José Apolinar Mejía Contreras, Víctor Florentino Conde Martínez y Antonio Trinidad Santos
- 431** Análisis técnico y económico del diseño de un sistema de riego a hidrante parcelario utilizando el método por Turnos y la técnica de Clement.
Design of a system of farm hydrant with the Turns and Clement methods: technical and economic analysis.
Bartolomé Espinosa Espinosa, Héctor Flores Magdaleno, Roberto Ascencio Hernández y Guillermo Carrillo Flores

TERRA

LATINOAMERICANA

- 441** Propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo con biofertilización cultivado con manzano.
Physical, chemical and biological soil properties with biofertilization in apple orchards.
Alfonso Luis Orozco Corral, Martha Irene Valverde Flores, René Martínez Téllez, Carlos Chávez Bustillos y Ramón Benavides Hernández

Revisión / Review

- 457** Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión.
Agricultural management of Vertisols in Mexico: a review.
Carlos Alberto Torres Guerrero, Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena, Carlos Alberto Ortiz Solorio y Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena

Reseña del libro / Book Review

- 467** Redescubriendo el suelo: su importancia ecológica y agrícola.
Noé Manuel Montaña y Rosalva García Sánchez

Revisores de este número **471**
Reviewers of this number

Índice de Autores Volumen 34 **473**
Authors Index Volume 34

Normas para publicación / Instructions to authors **475**

Dissipation of glyphosate from grapevine soils in Sonora, Mexico

Disipación de glifosato en suelos de viñedos en Sonora, México

Norma J. Salazar López¹, María I. Silveira Gramont¹, Fabiola G. Zuno Floriano²,
Guillermo Rodríguez Olibarría¹, Matt Hengel², and María L. Aldana Madrid^{1‡}

¹ Depto. de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora. Rosales y Blvd. Luis Encinas s/n, Centro. 83000 Hermosillo, Son., México.

[‡] Autora responsable (laldana@guayacan.uson.mx)

² Environmental Toxicology Department. University of California. 4138 Meyer Hall One Shields Avenue. Davis, CA, USA.

SUMMARY

Grapevine is one of the important crops in Sonora, due to revenue generation from its export to foreign countries. Among the most widely used herbicides for this crop is glyphosate, which is considered moderately toxic and persistent. The present research evaluates the dissipation of glyphosate in grapevine planted soil at three depths (5, 30 and 60 cm). Sampling was carried out before glyphosate application, and 5, 10, 18, 27, and 65 days after. Glyphosate was extracted from soil samples using ammonium hydroxide. The derivate extracts were partitioned with dichloromethane and analyzed using gas chromatography with pulsed flame photometric detector (PFPD). The results showed that average glyphosate residues are significantly greater at 5 cm (0.09 mg kg⁻¹) than the other depths (30 and 60 cm), having a difference of 0.078 mg kg⁻¹ between them ($P < 0.03$). Glyphosate concentration time profiles were similar; it reached maximum soil concentration in a range of 10 to 18 days after application. The half-life of glyphosate in soil has an average of 39 days at all depths. Our data suggests that the release in soil of glyphosate applied to weeds delays its transference to soil by 14 days, and extends residue half life to 55 days after application. These results could be the basis for further research, including more environmental parameters that could affect the dissipation or degradation process in soil.

Index words: *dissipation; glyphosate; grapevine; soil.*

RESUMEN

La vid para producción de uva de mesa es uno de los cultivos de importancia en Sonora, ya que su exportación a varios mercados mundiales genera

divisas. Entre los herbicidas más usados en este cultivo está el glifosato, el cual es considerado moderadamente tóxico y persistente. En la presente investigación se evalúa la disipación de glifosato a tres profundidades (5, 30 y 60 cm) en el suelo de plantaciones de viñedos. El muestreo se llevó a cabo antes de la aplicación de glifosato, y en 5, 10, 18, 27 y 65 días después. El glifosato se extrajo de las muestras de suelo utilizando hidróxido de amonio. Los extractos derivatizados se mezclaron con diclorometano y se analizaron mediante cromatografía de gases con detector fotométrico de flama pulsada (PFPD). Los resultados mostraron que el promedio de los residuos de glifosato fueron significativamente mayores a los 5 cm (0.09 mg kg⁻¹) que a los 30 y 60 cm de profundidad, con una diferencia entre ellos de 0.078 mg kg⁻¹ ($P < 0.03$). Los tiempos de disipación en la concentración de glifosato fueron similares; se alcanzó la máxima concentración en el suelo en un rango de 10 a 18 días después de la aplicación. La vida media de glifosato en el suelo es en promedio de 39 días en todas las profundidades. Nuestros datos sugieren que la liberación en el suelo de glifosato aplicado para el control de la maleza retrasa su transferencia al suelo por 14 días, y la vida media de los residuos se extiende después de la aplicación hasta 55 días. Estos resultados podrían ser la base de una amplia investigación, incluyendo algunos parámetros del ambiente que pueden tener efecto en el proceso de disolución y degradación en el suelo.

Palabras clave: *disipación; glifosato; vid; suelo.*

INTRODUCTION

Grape production in Sonora was 223 600 Mg per year (75.3% of the country grape production) between 2007 and 2011, with an average yearly acreage of

Cómo citar el artículo:

Salazar López, N. J., M. I. Silveira Gramont, F. G. Zuno Floriano, G. Rodríguez Olibarría, M. Hengel, and M. L. Aldana Madrid. 2016. Dissipation of glyphosate from grapevine soils in Sonora, Mexico. *Terra Latinoamericana* 34: 385-391.

Recibido: agosto de 2015. Aceptado: mayo de 2016.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 385-391.

19 105 ha, yielding 11.66 Mg ha⁻¹ (INEGI, 2012). Within the state, Hermosillo Valley had an acreage of 10912 ha, and Caborca 7903 ha. In 2010 Mexico exported 171 325 tons of table grapes, ranking seventh in the list of world exporters (FAOSTAT, 2010; INEGI, 2012).

Grape (*Vitis vinifera* L.) is a perennial crop that could last up to 20 years in good standing. In Hermosillo Valley the most common cultivars are Perlette, Flame, Superior (Sugraone) and Red Globe (INIFAP, 2010). Vineyards are planted mostly in yermosol soil. This soil type is salt-free, sandy, with medium texture, low organic matter, and a depth that ranges between 20 and 100 cm (INEGI, 2012). Most vineyards utilize a “Y” trellis system with drip irrigation systems positioned 50 cm above the soil surface (INIFAP, 2010). Irrigation water comes from two aquifers (superior and inferior) proceeding from the Bacoachi and Sonora river basins (Quevedo¹, 2007).

Among other factors, grape production is susceptible to weeds; thus, cultivation practices include herbicide applications to control weeds and reduce their negative effects on plant development and grape quality. Glyphosate is one of the herbicides recommended to control knotgrass (*Convolvulus arvensis* L.), Johnson grass (*Sorghum halepense* L.), and Bermuda grass (*Cynodon dactylon* L.) in Sonora’s vineyards (INIFAP, 2010). Glyphosate [N-(phosphonomethyl) glycine, CAS No. 1071-83-6] is an isopropyl amine salt with a molecular weight of 228.18 g mol⁻¹. Classified as an organophosphorus broad-spectrum herbicide, glyphosate has non-selective and systemic foliar action (Prata *et al.*, 2003; Gimsing *et al.*, 2007; Sanchís *et al.*, 2012).

Several studies focus on the mechanisms of glyphosate leakage, runoff, translocation, or interaction with soil particles, minerals and microorganisms. In general, they agree that glyphosate is fairly stable in the soil, and its degradation depends on the type of soil, where soil structure, pH, organic matter, microorganisms, metals and fertilization are the factors involved. Soil pH is an important factor for glyphosate sorption, correlating negatively with low pH (Helander *et al.*, 2012). The high solubility of glyphosate in water (12 000 mg L⁻¹) aids its transportation by drip irrigation water from the planted soil surface to deeper soil layers. Such molecules can be transported to

surface and/or ground water, either in solution or in suspension when bound to sediments (Sanchís *et al.*, 2012). Leaching and subsurface runoff are important processes with respect to contamination risk in the aquatic environment (ground or drainage water) (Kjaer *et al.*, 2005, 2011; Borggaard and Gimsing 2008). Torstensson *et al.* (2005), reported glyphosate residues above 0.1 µg L⁻¹ in ground water samples.

To date, there are no reported studies on the impact of glyphosate on Sonora’s vineyards soils; therefore, the aim of this research is to determine the behavior of glyphosate residues in grapevine planted soils at three different depths, before application and until grape maturity. The results of this research will aid in evaluating the potential environmental risks involved with the use of glyphosate.

MATERIALS AND METHODS

Experiment Description

The experiment was conducted in a commercial vineyard situated in Costa de Hermosillo District of Sonora (Mexico) located at 29° 00’ 53” N, 111° 29’ 16” W (Datum WGS84) coordinates, and 78 m above sea level. The cultivar used was Red Globe, which was planted in 2006.

The vineyard consisted of 106 plant rows (4 m between rows), each row with 182 plants 1.4 m apart. The vines were grown on a “Y” trellis system.

As stated before, the soils are mostly yermosol with alkaline pH, low organic matter content, and a predominance of sandy loam structure. Rainfall is scarce in this region, occurring mainly in the summer. Average yearly precipitation is 200 mm. Temperatures during the growing season ranged from -3 to 46 °C (INEGI, 2012). All the crops in the district, including vineyards, are irrigated. A drip irrigation system was located at the vineyard. Drip irrigation involves dripping water onto the soil at very low rates from a system of small diameter plastic pipes fitted with outlets called emitters or drippers that are 50 cm above the soil surface. This irrigation system aims to reduce the amount of water used to reach the grapevine roots. Although the amount of water is reduced, it is incessant, and at level surfaces the sandy soil texture favors downward water filtration (Poling, 2007).

¹ Quevedo E., J. L. 2007. Propuesta de Acción para la gestión integrada en la Costa de Hermosillo, Sonora. Tesina de la especialidad en gestión integrada de cuencas hidrológicas. El Colegio de Sonora, Hermosillo, Sonora, México. <http://www.ars.gob.mx/municipioshtml/HERMOSILLO/hermosillo2.htm>. (Accessed: February 04, 2015).

Experimental Design

Five rows from the vineyard were selected randomly, and a plot of three consecutive plants within each row was selected as the experimental unit. A composite soil sample of 1 kg was extracted from 3 holes near each plant at three different soil depths (5, 30 and 60 cm). Soil samples were taken 0 (before glyphosate application), 5, 10, 18, 27 and 65 days after application (from March to June of 2011). The experimental design was completely random with three soil depths as treatments, six repeated measures in time, and five replicates (plots with three grapevine plants each). Soil samples were collected in polyethylene bags, transported to the lab and stored at -20 °C until soil and glyphosate residues analyses.

The soil was analyzed for pH, organic matter and texture. The pH determination was carried out by the AS-02 method of NOM-021-SEMARNAT-2000, which is based on the activity of the H⁺ ion in a mixture of soil and water (1:2), measured by a potentiometer (Orion Star 3, Thermo Electron Co, USA). Organic matter was measured by the AS-07 method of NOM-021-SEMARNAT-2000, which is based on measurement of soil organic carbon oxidation by a heated potassium dichromate solution. Texture of the soil was determined by the AS-09 method of the same Mexican Official Norm.

Herbicide Application

Glyphosate commercial grade FAENA FORTE (Bayer Crop Science, Germany) was diluted with water by field workers following the instructions on the label. The solution was sprayed over the weeds with a hand operated backpack sprayer. Application rate was 1.3 L ha⁻¹ (equivalent to 702 g active ingredient per ha). During application, the temperature was 23.5 °C, wind velocity 1.7 m s⁻¹, relative humidity 32.4%, foliar humidity was zero percent and solar radiation was 0.362 kW m².

Quantification of Glyphosate Residues in Soil

Chemicals. The analytical standard of glyphosate (99.5%) was obtained from Chem Service Inc. (USA). Methanol (99.97%) HPLC grade was from JT Baker (USA). Hydrochloric acid (37.5%),

ammonium hydroxide (30%), phosphoric acid (85%) and methylene chloride (99.9%) were from Fermont (Mexico). Trifluoroacetic anhydride (TFAA) and trifluoroethanol (TFE, 99%) were from Fluka (USA). Anhydrous sodium sulfate (99%) was from Merck (USA) and ethyl acetate (99.9%) was from Burdick & Jackson (USA).

Extraction, cleanup and derivatization. Samples were crushed, dried at room temperature and sieved to 2 mm maximum particle size. The extraction of glyphosate was based on a method by Hu *et al.* (2008). A homogenized soil sample (5 g) was extracted (2X) with 16 mL of 2 M NH₄OH using a shaker for 40 min (Burrell, USA, Model 71). The samples were centrifuged for 20 min at 3500 rpm and the supernatant was poured into a 50 mL conical vessel. Subsequently, the supernatant was evaporated to dryness at 75 °C with a gentle stream of air using an N-EVAP 112 (model OA-SYS, Organomation Associates Inc., USA). The extract was re-suspended with 5 mL of water:methanol:HCl (160:40:2.7, v/v/v), 20 µL of concentrated phosphoric acid was added and the extract was kept at room temperature for 40 min. The extract was centrifuge for 20 min at 3500 rpm; the supernatant was transferred to a derivatization tube and evaporated to dryness at 80 °C with a gentle stream of air. The tube was cooled to room temperature and, after adding 1 mL of TFAA and 0.5 mL of TFE, it was kept in an ice-bath. The tube was then put on a hot plate (Thermolyne type 16 500 Dry-Bath, USA) at 100 °C for one hour. In this method of derivatization, the functional groups of carboxylic and phosphoric acid are derivatized to form the corresponding trifluoroethyl ester, while the amino functional group is derivatized to form the corresponding trifluoroacetyl (Hu *et al.*, 2008). The excess reagents were removed by a gentle stream of air at 40 °C. The extract was re-suspended with 6 mL of distilled water and transferred to another vessel. This process was repeated twice; 20 mL of methylene chloride was added to a tube and shaken for 2 min, the methylene chloride layer was collected into a 50 mL tube. The aqueous layer was extracted (2X) with 20 mL of methylene chloride. The extract was dried over a bed of anhydrous sodium sulfate (2.5 g) and evaporated to dryness with air at 40 °C. The final extract was dissolved with 1 mL of ethyl acetate, filtered using a 0.2 µm, 13 mm syringe filter unit (Pall, USA) and analyzed by gas chromatography.

Gas chromatography conditions. A Varian CP 3800 gas chromatograph (Varian, USA) equipped with a capillary column DB-5 (30 m × 0.25 mm ID, 0.25 μm-film thickness, J & W Scientific, USA) and pulsed flame photometric detector (PFPD, phosphorus mode) was used. The chromatographic conditions used for the analysis of glyphosate residues were as follows: detector temperature 310 °C; injector temperature 220 °C; initial oven temperature was 85 °C (1 min hold), increased 20 °C min⁻¹ to 150 °C, ramped at 20 °C min⁻¹ to 200 °C (2 min hold), followed by a final ramp of 20 °C min⁻¹ to 250 °C (4 min hold). The total run time was 18.5 minutes, and injection volume was 2 μL. Nitrogen (N₂) was used as the carrier gas, maintained at a constant flow rate of 1.1 mL min⁻¹, which resulted in a retention time of 6.3 min for glyphosate. Data acquisition and integration was controlled by Galaxy Chromatography Data System (Varian, USA).

In order to establish method linearity the following standards were used: 20, 50, 100, 200, 300, 500 and 1000 μg L⁻¹. Concentration vs response plots were obtained and their correlation coefficient was calculated. All injections were done in triplicate.

Percentage recovery of glyphosate in soil samples.

The effectiveness of the analytical process was measured with percent recovery (% Rec) using spiked control samples at three different fortification levels (0.02, 0.2 and 0.6 mg kg⁻¹) with three replicates. Soil samples (5 g) were fortified and subsequently analyzed according to the previously described extraction method. The acceptable recovery percentage was stated in the range of 70-120%, with a variation coefficient lower than 15% (FDA, 2012).

Statistical Analysis

Data for soil properties were analyzed by ANOVA with three depths (5, 30 and 60 cm) and five replications. Depth means were compared by orthogonal contrasts ($P < 0.05$).

Glyphosate residues were analyzed as a repeated measures model with the following model: $Y = \mu + \text{Depth}_i + \text{Rep}(\text{Depth})_{k(i)} + \text{Day}_j + \text{Depth} \times \text{Day}_{ij} + \epsilon_{ijk}$. Mean comparisons and confidence intervals were calculated at $P < 0.05$.

Since dissipation must be modeled starting from the highest concentration, simple regression models

to fit glyphosate dissipation were analyzed for each depth. From these model results, glyphosate half-life and its 95% confidence limit were estimated.

RESULTS AND DISCUSSION

The peak associated with glyphosate was identified at the retention time of 6.3 min, showing good resolution with no interference related to the soil matrix (Figure 1). Linearity was achieved over the range of 20 to 1000 μg L⁻¹ with a coefficient of determination (R^2) of 0.99 and a coefficient of variation of 2.71%. The detection limit of the method was 5.45 μg L⁻¹ and the limit of quantitation was 20 μg L⁻¹. The percent recovery obtained from fortified soil samples at 0.02, 0.2 and 0.6 mg kg⁻¹ were 86 ± 9, 103 ± 6 and 93 ± 3, respectively. The average pH of the soil samples was 8.8 ± 0.8, and there were no significant differences among the three soil depths or sampling times ($P < 0.05$). Mean content of organic matter was slightly higher at 5 cm depth (1.16 ± 0.35) than at 30 and 60 cm (0.78 ± 0.26 and 0.69 ± 0.19), respectively. Soil texture was determined as type I at the three depths, with sandy soil (75%), low silt (14%) and low clay (11%).

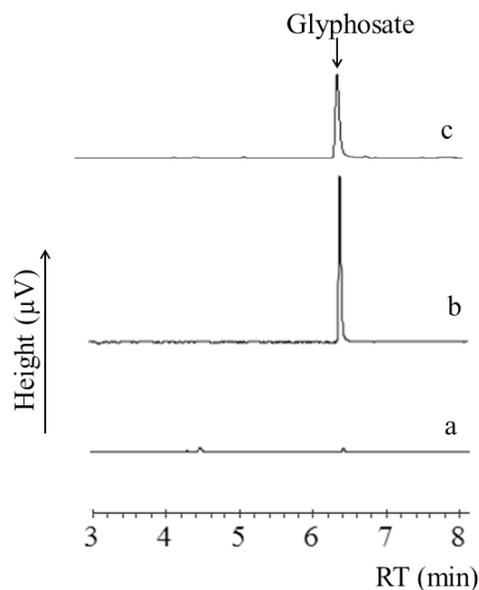


Figure 1. GC-PFPD chromatogram of glyphosate: (a) Control soil, (b) Fortified soil at 0.2 mg kg⁻¹, (c) Treated soil sample after 27 days with 0.12 mg kg⁻¹ of glyphosate.

Soil Glyphosate Quantification

The recoveries of glyphosate obtained in fortified soil samples are similar to those reported by Hu *et al.* (2008), with recoveries of 84-94%. The average pH of the soil samples were not significantly different among soil depths and was between alkaline to strong alkaline pH range for a soil, according to the NOM-021-SEMARNAT-2000 classification. Organic matter content was low according to the classification of the same official norm, this result agrees with the values reported by Padilla *et al.* (2006) who reported low organic matter content, in the range of 0.6 to 1.5%, in the soil of Costa de Hermosillo. The predominant soil texture was type I at the three depths.

Significant differences ($P < 0.03$) in average residual glyphosate concentration were found between 5 cm (0.092 mg kg^{-1}) and the deeper soil layers (30 and 60) 0.021 and 0.009 mg kg^{-1} , respectively. Eighteen days after herbicide application, residues increased from 0.017 mg kg^{-1} to 0.195 mg kg^{-1} (5 cm depth), representing a difference of 11.5 times the initial concentration (before application). A similar time concentration pattern was observed at 30 and 60 cm; however, at 30 cm the peak (0.058 mg kg^{-1}) was reached 10 days after application, while at 60 cm the peak occurred 18 days after application and reached only 0.020 mg kg^{-1} (Figure 2).

From the peak concentration at 18 days, the glyphosate dissipation in the soil surface (5 cm) follows a linear relationship, which was non-significant ($P > 0.05$) with R^2 of 0.82 and an estimated half-life of 45 days. At 30 cm the half-life was 34 days, starting from 10 days; at 60 cm depth the peak concentration was at 18 days and the half-life was 38 days. Summarizing, average half-life from application was 55 days.

The results on the soil residual glyphosate levels are similar to those observed by Locke *et al.* (2008) and Doublet *et al.* (2009). They mentioned that once glyphosate is adsorbed by the weeds, it is released again into the soil depending on the speed of decomposition of the plant tissue. Moreover, glyphosate residues remain partly in weed tissue until the weed dies and breaks down. The release of glyphosate causes an increase of the residual concentration in soil. According to Devlin *et al.* (1986), weeds treated with glyphosate die at least 10 days after the herbicide was applied. On the other hand, Laitinen *et al.* (2007) demonstrated that a part of the herbicide applied on the weeds is driven toward their roots and is able to reach the soil later.

The low concentration detected at 60 cm depth, relative to the higher concentration at the soil surface, suggests that glyphosate is relatively immobile due to the phenomenon of adsorption. However, its mobility is not discarded since glyphosate is a hydrophilic compound, and can be transported by the irrigation

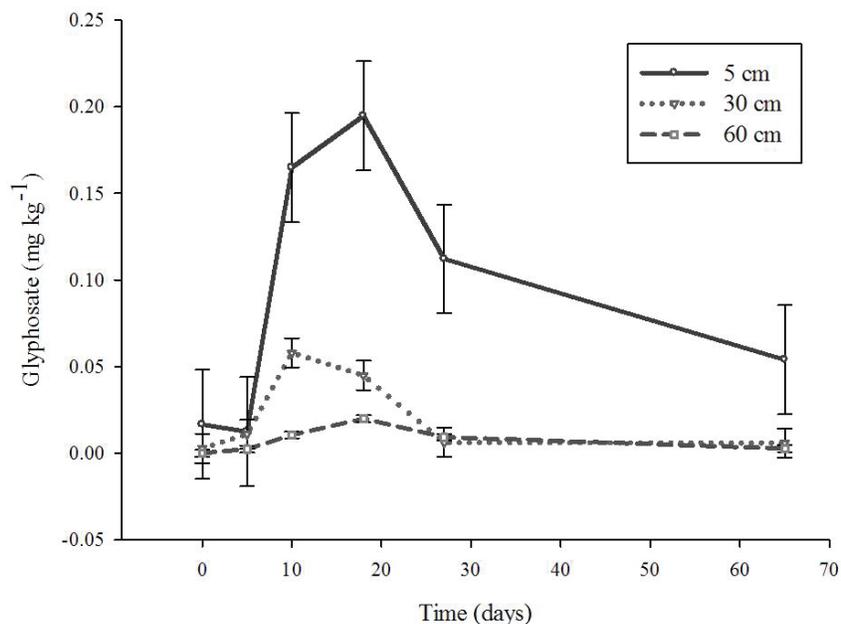


Figure 2. Dissipation rate of glyphosate in soil at different depths (5, 30 and 60 cm). Points represent the average and lines the standard error.

water to deeper soil layers (Sanchís *et al.*, 2012). Following the application of glyphosate, the dissipation process happens in similar patterns at the three soil depths (Figure 2).

Glyphosate dissipation in the soil surface had a half-life of 55 days after application. This data agrees with Accinelli *et al.* (2005) and Sanchís *et al.* (2012), who found half-lives of 7 to 60 days and 49 days, respectively. However, assuming the herbicide application was similar to that applied in our study, the persistence of the herbicide after one year of the last application was 0.017 mg kg^{-1} on the surface, suggesting that a very low amount of glyphosate remains in the soil.

At depths of 30 and 60 cm, the data showed a rapid reduction in the concentration at the beginning, remaining at very low levels for the remainder of the experiment. This behavior can be attributed to several processes: the herbicide is being captured by the grapevine roots, or it has formed complexes with other minerals such as Al^{+3} and Fe^{+3} , making glyphosate less susceptible to removal (Schuette, 1998; Borggaard *et al.*, 2008).

At present, there is no soil maximum residue level (MRL) for glyphosate; however, all the residue levels found in the present study are below the MRL for grapevines and table grapes according to the European Union Pesticide Database (0.2 mg kg^{-1} , and 0.5 mg kg^{-1} , respectively).

According to Gomes *et al.* (2014), once in the soil, glyphosate may be adsorbed onto soil particles, degraded by microbes, or transferred to deeper soil horizons, migrating via soil pores or root canals. However, some agricultural practices, such as phosphorous amendment, may re-solubilize glyphosate in soils, making it available for leaching and transport to the rhizosphere of non-target plants. Glyphosate is quickly degraded to aminomethylphosphonic acid (AMPA) in soils by microorganisms; a similar mechanism of glyphosate degradation has been proposed in plants. AMPA is a phytotoxin, which amplifies the indirect effects of glyphosate on physiological processes. Because of its chemical similarity, AMPA can compete with glycine in biological sites and pathways, affecting chlorophyll biosynthesis and, consequently, the photosynthetic process.

CONCLUSIONS

This is the first study that was designed to evaluate the dissipation of glyphosate in soil from a commercial vineyard in Sonora. Our data suggests that glyphosate applied to weeds is subsequently released in the soil. This could delay its concentration and extend its half-life in soil. Once there, in sandy soils, irrigation water transports glyphosate to deeper soil layers, although its mobility seemed low during the final stages of the study. There are no clear explanations of the undergoing dissipation processes. The present research provides a basis for further studies, which should include more detailed measurements on dissipation and degradation processes in soil.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by the University of Sonora (Mexico) and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), grant 377167. The authors sincerely thank Rubén Romo (San Luis vineyard) for providing soil samples. Agustín Fu-Castillo and María Elena Ochoa-Landin for their advice in the analysis of soils.

REFERENCES

- Accinelli, C., W. C. Koskinen, J. D. Seebinger, A. Vicari, and M. J. Sadowsky. 2005. Effects of incorporated corn residues on glyphosate mineralization and sorption in soil. *J. Agric. Food Chem.* 53: 4110-4117.
- Borggaard, O. K. and A. L. Gimsing. 2008. Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: A review. *Pest. Manage. Sci.* 64: 441-456. doi:10.1002/ps.1512.
- Devlin, R. M., S. J. Karczmarczyk, I. I. Zbiec, and Z. K. Koszanski. 1986. Initial and residual activity of glyphosate and SC-0224 in a sandy soil. *Crop Prot.* 5: 293-296.
- Doublet, J., L. Mamy, and E. Barriuso. 2009. Delayed degradation in soil of foliar herbicides glyphosate and sulcotrizone previously absorbed by plants: Consequences on herbicide fate and risk assessment. *Chemosphere* 77: 582-589. doi:10.1016/j.chemosphere.2009.06.004.
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database). 2010. Exports: Countries by commodity (Grape). <http://faostat.fao.org/site/342/default.aspx>. (Consulta: noviembre 12, 2014).

- FDA (Food and Drug Administration). 2012. Bioanalytical method validation. Guidance for Industry. U.S. Department of Health and Human Services. Center for Drug Evaluation and Research (CDER). Center for Veterinary Medicine (CVM) <http://www.fda.gov/downloads/Drugs/GuidanceComplianceRegulatoryInformation/Guidances/ucm070107.pdf>. (Consulta: julio 28, 2014).
- Gimsing, A. L., C. Szilas, and O. K. Borggaard. 2007. Sorption of glyphosate and phosphate by variable-charge tropical soils from Tanzania. *Geoderma* 138: 127-132. doi:10.1016/j.geoderma.2006.11.001.
- Gomes, M. P., E. Smedbol, A. Chalifour, L. Hénault-Ethier, M. Labrecque, L. Lepage, M. Lucotte, and P. Juneau. 2014. Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid: An overview. *J. Exp. Bot.* 65: 4691-4703. doi:10.1093/jxb/eru269.
- Helander, M., I. Saloniemi, and K. Saikkonen. 2012. Glyphosate in northern ecosystems. *Trends Plant Sci.* 17: 569-574. doi:10.1016/j.tplants.2012.05.008.
- Hu, J. Y., C. L. Chen, and J. Z. Li. 2008. A simple method for the determination of glyphosate residues in soil by capillary gas chromatography with nitrogen phosphorous. *J. Anal. Chem.* 63: 371-375. doi: 10.1134/S1061934808040102.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2012. Anuario. <http://www.inegi.org.mx>. (Consulta: noviembre 12, 2014).
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias: Centro de Investigación Regional del Noroeste). 2010. Guía técnica para el área de influencia del campo experimental costa de Hermosillo. No. 1 ISBN: 978-607-425-433-4.
- Kjaer, J., P. Olsen, M. Ullum, and R. Grant. 2005. Leaching of glyphosate and amino-methylphosphonic acid from Danish agricultural field sites. *J. Environ. Qual.* 34: 608-620.
- Kjaer, J., V. Ernstsén, O. H. Jacobsen, N. Hansen, L. Wollesen de Jonge, and P. Olsen. 2011. Transport modes and pathways of the strongly sorbing pesticides glyphosate and pendimethalin through structured drained soils. *Chemosphere* 84: 471-479.
- Laitinen, P., S. Rämö, and K. Siimes. 2007. Glyphosate translocation from plants to soil – does this constitute a significant proportion of residues in soil? *Plant Soil* 300: 51-60. doi:10.1007/s11104-007-9387-1.
- Locke, M. A., R. M. Zablotowicz, and K. N. Reddy. 2008. Integrating soil conservation practices and glyphosate-resistant crops: Impacts on soil. *Pest. Manage. Sci.* 64: 457-469. doi:10.1002/ps.1549.
- Padilla, E., M. Esqueda, A. Sánchez, R. Troncoso-Rojas, and A. Sánchez. 2006. Effect of biofertilizers on cantaloupe crop with plastic mulching. *Rev. Fitotec. Mex.* 29: 321-329.
- Poling, E. B. 2007. Grapevine water relations and vineyard irrigation. pp.151-157. *In*: E. B. Poling (ed.). North Carolina wine grape grower's guide. Vol. 535. N.C. Cooperative Extension Service. Raleigh, NC, USA.
- Prata, F., V. Camponez, A. Lavorenti, V. L. Tornisiello, and J. Borges R. 2003. Glyphosate sorption and desorption in soils with distinct phosphorus levels. *Sci. Agric.* 60: 175-180.
- Sanchís, J., L. Kantiani, M. Llorca, F. Rubio, A. Ginebreda, J. Fraile, T. Garrido, and M. Farré. 2012. Determination of glyphosate in groundwater samples using an ultrasensitive immunoassay and confirmation by on-line solid-phase extraction followed by liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry. *Anal. Bioanal. Chem.* 402: 2335-2345. doi:10.1007/s00216-011-5541-y.
- Schuette, J. 1998. Environmental fate of glyphosate. Environmental Monitoring & Pest Management. Department of Pesticide Regulation Sacramento, CA 95824-5624 <http://www.cdpr.ca.gov/docs/emon/pubs/fatememo/glyphos.pdf>. (Consulta: julio 21, 2014).
- Torstensson, L., E. Börjesson, and J. Stenström. 2005. Efficacy and fate of glyphosate on Swedish railway embankments. *J. Pest. Manage. Sci.* 61: 881-886. doi:10.1002/ps.1106.

Desarrollo radical y rendimiento en diferentes variedades de trigo, cebada y triticale bajo condiciones limitantes de humedad del suelo

Root development and yield in different genotypes of bread wheat, barley and triticale under limiting soil moisture conditions

Luis Eduardo Miranda Domínguez¹, Cándido López Castañeda^{1‡},
Ignacio Benítez Riquelme¹ y José Apolinar Mejía Contreras¹

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

[‡] Autor responsable (clc@colpos.mx)

RESUMEN

El trigo (*Triticum aestivum* L.), triticale (*Triticosecale* Wittmack) y cebada (*Hordeum vulgare* L.), se cultivan en México bajo riego y temporal o secano. En condiciones de secano se cultivan en la temporada de lluvias en verano-otoño y otoño-invierno con humedad residual, después de la temporada de lluvias, aunque con severos problemas de sequía terminal. El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar el rendimiento de grano (RG) y sus componentes, y la densidad radical (DR) bajo condiciones de humedad residual en Oaxaca, México, durante el periodo otoño-invierno 2013-2014. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; la unidad experimental fue de cuatro surcos de 4 × 0.4 m. Se sembró el 5 de octubre de 2013 con una densidad de siembra de 100 kg ha⁻¹ y se fertilizó con la dosis 40-40-00. La cebada produjo mayor RG que el trigo y el triticale; el alto RG estuvo acompañado de un alto índice de cosecha (IC), peso del grano (PG) y DR, y menor estatura de planta y ciclo biológico (CB) más corto. El trigo y el triticale tuvieron un RG similar, sin embargo, el trigo 'Venturero' tuvo mayor RG que la mayoría de los genotipos de trigo y triticale con alto número de espigas m⁻² (E M⁻²) y PG, y el más alto peso hectolitrico, la mayor DR y el CB más largo. Más del 50% de las raíces se concentraron cerca de la superficie del suelo (20 cm) en todos los genotipos y se observó que el trigo tuvo mayor DR que la cebada y el triticale en los estratos de 20-100 cm, y el trigo 'Venturero' produjo más raíces que los demás genotipos desde la superficie del suelo hasta los 100 cm. Los genotipos de cebada y trigo con mayor DR produjeron mayor RG, confirmando su mayor resistencia a sequía.

Palabras clave: biomasa final aérea; ciclo biológico; índice de cosecha; peso hectolitrico; tamaño del grano.

SUMMARY

Bread wheat (*Triticum aestivum* L.), triticale (*Triticosecale* Wittmack) and barley (*Hordeum vulgare* L.) crops are grown under both irrigation and rainfed conditions in Mexico. Although they are cultivated in rainfed conditions in the summer-fall and in autumn-winter with residual moisture after the rainy season, they experience severe terminal drought. This research was conducted to study the grain yield (GY) and its components and root length density (RLD) under residual soil moisture conditions in Oaxaca, Mexico, during the fall-winter 2013-2014 growing season. A complete block design with four replicates was used. Plots consisted of four 4 × 0.4 m rows. A seeding rate of 100 kg ha⁻¹ and a fertilizer rate of 40-40-00 were used. The experiment was sown on October 5, 2013. Barley had higher GY than bread wheat and triticale; the higher GY was accompanied by high harvest index (HI), grain weight (GW) and RLD, and also lower plant stature and shorter biological cycle (BC). Bread wheat and triticale had similar GY, but the landrace of bread wheat, 'Venturero' produced greater GY than most of the bread wheat genotypes and triticale, with a high number of spikes m⁻² (S M⁻²), GW, the highest grain density and RLD, and the longest BC. More than 50% of root length density accumulated near the soil surface (20 cm) in all genotypes. Bread wheat had higher RLD than barley and triticale in the 20-100 cm strata, and the bread wheat landrace 'Venturero' produced more roots than any of the other genotypes from the soil surface down to 100 cm. Genotypes of barley and bread wheat

Como citar el artículo:

Miranda Domínguez, L. E., C. López Castañeda, I. Benítez Riquelme y J. A. Mejía Contreras. 2016. Desarrollo radical y rendimiento en diferentes variedades de trigo, cebada y triticale bajo condiciones limitantes de humedad del suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 393-407.

Recibido: julio de 2015. Aceptado: julio de 2016.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 393-407.

with higher RLD produced greater GY, confirming that they are more drought resistance.

Index words: *final aerial biomass; biological cycle; grain density; grain size; harvest index.*

INTRODUCCIÓN

En México, los cereales de grano pequeño se siembran bajo riego y en temporal o seco; la cebada, el trigo y el triticale, se cultivan en un área aproximada de 322 000, 713 000 y 4800 ha, con un rendimiento de grano promedio nacional de 2.7, 5.2 y 2.4 Mg ha⁻¹, respectivamente (SAGARPA, 2014). En condiciones de temporal en el ciclo primavera-verano el rendimiento de cebada (2 Mg ha⁻¹), trigo (2.1 Mg ha⁻¹) y triticale (2.4 Mg ha⁻¹) es más bajo que en riego en el ciclo otoño-invierno (cebada = 5.5; trigo = 5.8 y triticale = 3.2 Mg ha⁻¹), debido a las deficiencias hídricas del suelo que con frecuencia coinciden con las etapas de floración y llenado de grano, al reducir severamente la producción y calidad del grano (López-Castañeda, 2013).

La reducción en el rendimiento y calidad del grano puede ser mayor en áreas en las que el trigo se siembra en el ciclo otoño-invierno (aproximadamente 20 000 ha) (SAGARPA, 2014), donde el cultivo depende de la humedad almacenada en el suelo después de la temporada de lluvias y las plantas experimentan altos niveles de estrés hídrico que se reflejan en rendimientos aún más bajos (0.6 Mg ha⁻¹) (SAGARPA, 2014), como suele suceder en la región Mixteca Alta de Oaxaca y en otros estados como Nuevo León, Michoacán y Baja California. En estas condiciones ecológicas tan drásticas, el rendimiento se podría incrementar significativamente, al seleccionar variedades con caracteres agronómicos que les permitan adaptarse mejor a los ambientes con sequía, sobre todo en las etapas de floración y formación del grano.

Al considerar que los cultivos de temporal con frecuencia enfrentan serias limitaciones en la cantidad de agua disponible en el suelo, para su crecimiento, desarrollo y rendimiento, la selección debe estar enfocada a obtener genotipos resistentes o tolerantes a sequía, que posean atributos que le permitan a la planta: (i) capturar mayor cantidad de humedad disponible, (ii) intercambiar agua transpirada por moléculas de CO₂ más efectivamente para producir biomasa y (iii) convertir mayor proporción de biomasa en grano (p. ej.:

la proporción de materia seca que es grano o índice de cosecha) (Passioura y Angus, 2010). Aunque estos tres componentes del rendimiento bajo condiciones limitantes de humedad con frecuencia interactúan entre sí, son suficientemente independientes para evaluarlos en forma separada, de tal manera que la selección en alguno de ellos resultará en un aumento en el rendimiento (Passioura, 2006).

Un incremento en la captura de agua por las raíces, puede lograrse al seleccionar genotipos con sistemas radicales de mayor densidad y profundidad que absorban mayor cantidad de agua y nutrientes; el mejoramiento de la habilidad de las raíces para absorber agua y nitrógeno del suelo más pronto y más rápido es una estrategia eficiente para la sincronización entre la disponibilidad de nitrógeno y agua en el perfil del suelo y su demanda por la planta; esta estrategia dicta que las raíces crezcan rápido, inicien su proliferación temprana y profusamente para interceptar y capturar el nitrógeno, y el agua antes de que estos se muevan fuera del alcance de las raíces en el perfil del suelo (Palta *et al.*, 2007). Las raíces juegan un papel muy importante para mantener el balance hídrico de la planta bajo condiciones de déficit hídrico edáfico y su importancia como característica de resistencia a sequía en cereales de grano pequeño, se ha reconocido a través de los años (Salim *et al.*, 1965). Sin embargo, a la fecha son pocos los estudios realizados, para determinar los atributos de crecimiento de las raíces que puedan contribuir a un mejor comportamiento agronómico y mayor rendimiento de grano bajo condiciones de déficit hídrico en el suelo; Kramer (1969) y Richards (2008) sugirieron que las características de crecimiento de las raíces que una planta resistente a sequía debe tener: son un sistema radical profundo, extenso y muy ramificado como el del sorgo, no obstante, la conexión entre el rendimiento de grano y la cantidad de humedad utilizada por la planta apenas es perceptible, particularmente en un cultivo de grano, cuyo rendimiento depende de la cantidad y la etapa fenológica en que es utilizada.

El trigo 'Venturero' cultivado en la Mixteca Alta Oaxaqueña, es un buen ejemplo de las plantas adaptadas a condiciones de humedad residual que experimentan sequía, al disminuir el contenido de humedad en el suelo conforme transcurre el ciclo biológico; en estas condiciones, las plantas desarrollan sistemas de raíces que continúan en expansión a pesar del déficit hídrico edáfico, confirmando a la planta, la capacidad de sobrevivir a la deshidratación y producir grano;

el trigo 'Venturero' proviene del germoplasma que fue introducido a México por los españoles, en la época de la colonia y que ha sido cultivado en condiciones marginales de humedad y temperatura, y baja fertilidad del suelo en el ciclo otoño-invierno bajo condiciones de humedad residual en el suelo, desarrollando una alta capacidad de adaptación a este tipo de ambientes; las poblaciones de trigo 'Venturero' se caracterizan por presentar una amplia variabilidad genética en precocidad, altura de planta y espigas con y sin aristas. El rendimiento de grano de este germoplasma 'criollo', conocido también como 'Venturero', es bajo comparado con el que se obtiene en las siembras convencionales de trigo en temporal, sin embargo, el grano es apreciado por su calidad de gluten que permite su uso en la elaboración de tortillas para la alimentación humana.

Otra posibilidad de aumentar el rendimiento de grano en cereales de grano pequeño bajo condiciones limitantes de humedad, es a través de un intercambio gaseoso más efectivo entre el área foliar de la planta y la atmosfera (moléculas de H₂O por moléculas de CO₂), de tal manera que esto se traduzca en una mayor acumulación de biomasa en la planta; no obstante que el intercambio gaseoso de las plantas es afectado por el estrés hídrico, al reducirse la concentración de CO₂ en el interior de las hojas (Passioura y Angus, 2010); un rápido déficit hídrico de la planta conlleva un rápido cierre de estomas, pero un déficit hídrico lento como ocurre típicamente en condiciones de campo, cuando el suelo se está deshidratando puede tener un efecto mayor en el desarrollo del área foliar con efectos más graduales en la conductancia estomática (Condon *et al.*, 1992); en estas condiciones el cierre estomático usualmente resulta en un aumento en la temperatura de las hojas y consecuentemente en un mayor déficit de presión de vapor, de tal manera que el impacto de la baja concentración interna de CO₂ en la eficiencia transpiratoria de la planta puede ser menor (Condon *et al.*, 2002). El estrés hídrico también puede afectar otras características de la planta como la altura que disminuye a consecuencia de una reducción en la acumulación de materia seca, tasa de asimilación neta, tasa relativa de crecimiento, tasa de aparición de hojas y macollos, y la tasa de expansión del área foliar; y el índice de cosecha que decrece debido a la muerte de florecillas durante la emergencia de la hoja bandera, al iniciarse el estrés hídrico severo típico de ambientes con sequía terminal y que se refleja en una reducción en el número de granos por espiga y granos m⁻²

(Siddique *et al.*, 1989). Además, la sequía también puede reducir significativamente la expansión del área foliar y la acumulación de materia seca de las plantas, y puede afectar la duración de las etapas críticas de desarrollo en el periodo de pre-antesis (iniciación floral, espiguilla terminal y espigamiento) y la duración de las etapas reproductivas en periodo post-antesis (floración o antesis, periodo de llenado del grano y madurez fisiológica) (López-Castañeda y Richards, 1994b); el déficit hídrico tiene efectos más severos en el rendimiento, cuando coincide con la antesis y el llenado del grano (Kirby y Appleyard, 1984). Wang *et al.* (2015) observaron que un déficit hídrico moderado en la etapa de crecimiento vegetativo en plantas de trigo, disminuyó el efecto de foto-inhibición en la hoja bandera causado por la sequía y el calor durante el periodo de llenado del grano; adicionalmente determinaron que en las plantas tratadas con déficit hídrico moderado, la sequía inhibió la fotosíntesis, principalmente a través de una disminución en la tasa fotosintética máxima del transporte de electrones, mientras que la disminución en la eficiencia de la carboxilación limitó la fotosíntesis bajo condiciones de estrés por calor; la sequía durante la etapa vegetativa mejoró la tolerancia a ambos, la sequía y el estrés por calor, ocurridos durante el periodo de llenado del grano.

La conversión de la biomasa en grano, representada por el índice de cosecha (p. ej.: el cociente entre el rendimiento de grano y la biomasa aérea de la planta) ha aumentado substancialmente en muchos cultivos durante las últimas décadas; la introducción de los genes de enanismo en los cereales de grano pequeño para resolver el problema de acame tuvo beneficios inesperados al aumentar el índice de cosecha; en ambientes favorables de humedad pasó de 0.33 a más de 0.50 (Passioura y Angus, 2010). Este incremento ha sido asociado con un aumento en el número de granos m⁻², con un aumento pequeño en el peso del grano o producción de biomasa (Evans, 1993). La selección de genotipos mejor adaptados al patrón de distribución de la humedad durante la estación de crecimiento, puede resultar en un rápido desarrollo del área foliar que reduzca significativamente las pérdidas de humedad por evaporación directa del suelo debajo del dosel del cultivo y favorezca un buen balance de la evapotranspiración antes y después de la floración, lo que se reflejará en un mayor índice de cosecha (López-Castañeda y Richards, 1994c; Passioura, 2006).

En un futuro se requerirán sistemas integradores

para el estudio de caracteres cuantitativos complejos como la estabilidad del rendimiento de plantas bajo estrés hídrico y la investigación deberá utilizar los recursos genómicos más modernos, combinando las nuevas tecnologías en genética cuantitativa, genómica y biomatemáticas, con un amplio conocimiento ecofisiológico de las interacciones entre el genotipo y el ambiente de crecimiento, y finalmente, el mejoramiento genético del cultivo (Parry *et al.*, 2012).

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo estudiar la variabilidad genética en el rendimiento de grano y sus componentes, y la densidad, y profundidad de raíces, características morfológicas que pueden contribuir a un mejor comportamiento agronómico de la cebada, el trigo (antiguas y modernas variedades y una criolla denominado 'Venturero') y el triticale, en condiciones limitantes de humedad residual del suelo en el ciclo otoño-invierno, en la Mixteca Alta Oaxaqueña.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio Experimental

Se estableció un experimento en campo bajo condiciones de humedad edáfica residual en el ciclo otoño-invierno 2013-2014, en la comunidad de San Cristóbal Suchixtlahuaca, Distrito de Coixtlahuaca, Oaxaca, México (17° 44' N, 97° 19' O y 2130 m de altura). Esta localidad se caracteriza por presentar clima cálido semiseco (BS1kw(w)(i)gw"), con verano cálido y seco; temperatura media anual de 15.8 °C y precipitación anual de 556 mm, con lluvias en verano

y escasa precipitación en invierno, y poca oscilación climática (García, 1988). El suelo donde se estableció el experimento es de textura arcillosa en el perfil de 0 a 80 cm; en el estrato de 0-20 cm mostró valores de densidad aparente ligeramente más altos que en los otros estratos y valores de humedad ligeramente más bajos en presiones equivalentes a la capacidad de campo (CC) y porcentaje de marchitamiento permanente (PMP). El pH en el estrato de 0-20 cm fue más bajo que en los otros estratos, mientras que el contenido de materia orgánica, nitrógeno total, fósforo y potasio fue mayor en el estrato de 0-20 cm que en los estratos de 20-40, 40-60 y 60-80 cm; la conductividad eléctrica del suelo tendió a presentar valores más altos en los estratos de 40-60 y 60-80 cm que en los estratos de 0-20 y 20-40 cm (Cuadro 1).

Material Genético

Se utilizaron 20 genotipos de trigos harineros antiguos y modernos, y un criollo 'Venturero', tres genotipos de cebada y uno de triticale (Cuadro 2). Los genotipos de trigo incluyeron materiales criollos antiguos como 'Gabo' y 'Marroqui', genotipos considerados como progenitores de la 'Revolución Verde'; 'Yaqui 50' un material criollo originario del Valle del Yaqui, Sonora, México y otros genotipos representativos de diferentes décadas de la 'Revolución Verde'; además de dos genotipos de cebada de dos hileras (Betzes y Lenetah) y una de seis hileras (Cleopatra), y un triticale experimental; Betzes, Lenetah y Triticale 118 se introdujeron de la Universidad de California, Riverside, CA, Estados Unidos de Norte América (Cuadro 2).

Cuadro 1. Características físicas y químicas del suelo utilizado para el experimento.

Profundidad	Características									
	Físicas					Químicas				
cm	Textura	DA	CC	PMP	pH	MO	N	P	K	CE
0-20	Arcillosa	1.69	33.2	20.0	7.8	3.9	0.6	0.07	0.59	0.46
20-40	Arcillosa	1.65	34.4	20.2	7.9	2.3	0.5	0.01	0.49	0.41
40-60	Arcillosa	1.62	34.7	20.7	7.9	2.6	0.4	0.01	0.45	0.49
60-80	Arcillosa	1.61	35.5	21.1	7.9	2.5	0.4	0.01	0.37	0.52

Textura, método del hidrómetro de Bouyoucos; DA = densidad aparente, método de la probeta (g cm⁻³); CC = capacidad de campo (%), olla de presión a 0.1 kPa; PMP = porcentaje de marchitamiento permanente (%), membrana de presión a 15 kPa; pH, medidor electrónico de pH; MO = materia orgánica (%), método de Walkley y Black; N = nitrógeno total (%), método de Kjeldahl, semi-micro; P = fósforo (ppm), método de Olsen; K = potasio (ppm), método de Olsen; C.E. = conductividad eléctrica (mmhos cm⁻¹), método del puente de conductividad eléctrica.

Cuadro 2. Genotipos de trigo, triticale y cebada utilizados en el experimento.

Genealogía	Origen M-V-2010 [†]	Año de liberación	Peso de 100 granos g [†]
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)			
Lenetah (Cebada 2 hileras)*	V-47	-	4.31
Betzes (Cebada 2 hileras) [§]	V-46	1957	3.34
Cleopatra (Cebada 6 hileras) [¶]	V-45	-	3.86
Triticale (<i>Triticosecale</i> Wittmack)			
Triticale 118 (Primavera) [§]	V-48	2000	2.48
Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)			
Criollos antiguos			
Gabo [§]	V-3	1954	2.86
Marroqui [§]	V-4	1948	3.59
Yaqui 50 [‡]	V-5	1950	2.87
Criollo 'Venturero' [#]	-	-	3.31
Década de los 60's			
Huamantla [#]	-	1959	2.63
Nainari 60 [§]	V-8	1960	2.68
Década de los 70's			
Cleopatra VS-74 [‡]	V-14	1974	2.87
Pavón F-76 [§]	-	1976	3.49
Salamanca S-75 [¶]	V-16	1975	3.37
Década de los 80's			
Gálvez M-87 [¶]	V-27	1987	3.47
Temporalera M-87 [#]	-	1987	3.26
Década de los 90's			
Verano S-91 ^{††}	V-29	1991	3.28
Borlaug M-95 ^{††}	V-30	1995	2.63
Romoga F-96 ^{††}	V-31	1996	2.78
Modernos			
Náhuatl F-2000 [¶]	V-35	2000	2.61
Blanca Grande [§]	V-39	2005	2.76
Rebeca F-2000 [¶]	V-37	2000	3.28
Tlaxcala F-2000 [¶]	V-34	2000	2.69
Líneas avanzadas			
VEE/5/SKH8/4/RRV/WW15/3/BJ//ON*3/BON ICW86 1034-300L-300AP-0L-5AP-0L-0AP (F ₆) ^{**}	V-42	-	3.86
Temporalera M-87/Col. 1718 CPRST-13-12T (F ₄) ^{§§} (Espiga con aristas y alto número de espiguillas/espiga)	V-40	2010	2.16
Temporalera M-87/Col.1718 CPRST-13-13T (F ₄) ^{§§} (Espiga sin aristas y alto número de espiguillas/espiga)	V-41	2010	2.85

[†] La multiplicación del germoplasma y los datos del peso de 100 granos se obtuvieron en el ciclo de verano 2010 en condiciones de secano, en el Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México; * Germoplasma obtenido de la Colección de Cereales de Grano Pequeño (Small Cereals Collection, Idaho, U.S.A.); [¶] Material genético obtenido del INIFAP; Chapingo, México; ^{††} Variedades obtenidas del CIMMYT, El Batán, Texcoco, Estado de México; [§] Germoplasma proveniente de la Universidad de California, Riverside, CA, U.S.A.; [#] Material genético colectado en la Comunidad de San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca, en Septiembre de 2013; ^{**} Línea avanzada procedente del ICARDA, Aleppo, Siria; ^{§§} Genotipos de trigo obtenidos por el método genealógico, Dr. Cándido López Castañeda, Profesor Investigador Titular, Colegio de Postgraduados.

Manejo del Trabajo Experimental

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; la unidad experimental consistió de cuatro surcos de 4 m de longitud, separados a 0.40 m. La siembra se realizó el día 5 de octubre de 2013 en suelo seco, se depositó la semilla en el fondo del surco y cubrió con azadón. Se utilizó una densidad de siembra de 100 kg de semilla ha^{-1} y se aplicó una dosis de fertilización de 40-40-00 al momento de la siembra, con urea como fuente de nitrógeno y superfosfato de calcio triple como fuente de fósforo. Al observar que no llovía cinco días después de la siembra, se procedió a dar un riego para favorecer la germinación de la semilla en el suelo; el agua se consiguió de una pequeña presa localizada a 300 m del lugar en el que se estableció el experimento, el agua se aplicó con una manguera de 3" de diámetro, en una cantidad suficiente para humedecer los 5 cm más cercanos a la superficie del suelo. De la misma forma se aplicó un segundo riego a los 20 dds; tres días después, se presentaron las primeras lluvias y el experimento se dejó a merced de la precipitación hasta la madurez fisiológica. Las malezas de hoja ancha y de hoja angosta se eliminaron mediante deshierbes manuales entre los 30 y 60 dds. No se observó la incidencia de plagas.

Variables de Estudio

Días a antesis (DA); se determinó cuando el 50% de las espigas mostraban las anteras expuestas en dehiscencia.

Días a madurez fisiológica (MF); se determinó cuando el 80% de los órganos aéreos de las plantas presentaban el color paja característico de cada genotipo.

Biomasa aérea final (BM, g m^{-2}); se obtuvo al cosechar los tallos completos presentes en los surcos centrales de cada unidad experimental, después de eliminar los extremos, para determinar su peso seco total y dividirlo entre el área cosechada.

Rendimiento de grano (RG, g m^{-2}); se obtuvo al determinar el peso del grano después del desgrane de la muestra utilizada para determinar la biomasa aérea final.

Índice de cosecha (IC); se calculó al dividir el rendimiento de grano entre la biomasa área final (RG/BM).

Espigas M^{-2} (E M^{-2}); se determinó al contar el número

total de tallos fértiles (NTF) con espiga y dividirlo entre el área cosechada.

Peso de 100 granos (P100g, g); se determinó al pesar 100 granos elegidos al azar en cada unidad experimental.

Granos por espiga (G E^{-1}); se determinó al contar y promediar el número de granos por espiga en 10 espigas completas de la muestra utilizada, para determinar la biomasa aérea final.

Granos M^{-2} (G M^{-2}); se calculó al multiplicar el número de espigas m^{-2} por el número de granos por espiga ($\text{E M}^{-2} \times \text{G E}^{-1}$).

Altura de planta (AP, cm); se midió la longitud del tallo desde la superficie del suelo hasta la última espiguilla en la espiga en cinco plantas en cada unidad experimental.

Peso hectolítrico o densidad del grano (PH, g mL^{-1}); se calculó como el cociente entre el peso (g) y el volumen (mL) de una muestra de 10 g de grano, tomada al azar del grano cosechado en cada unidad experimental.

Densidad de raíces (DR, cm cm^{-3}); se obtuvieron muestras de suelo del experimento para calcular la densidad de raíces. Las muestras se tomaron de todas las parcelas de Triticale 118, Cleopatra y Lenetah (cebada) y Criollo 'Venturero', Yaqui 50, Marroquí, Tlaxcala F-2000 y Náhuatl F-2000 (trigo). Se extrajeron cuatro muestras de suelo de cada parcela con una barrena del tipo Veihmeyer, con boquilla de 2.1 cm de diámetro en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60 y 60-80 cm; dos sobre la línea de plantas y dos entre líneas de plantas. Las raíces se separaron del suelo completamente seco con pinzas de depilar y se colocaron en viales de plástico con 50 ml de agua destilada; posteriormente, los segmentos de raíz se dispersaron en 500 ml de agua en una charola de plástico transparente de 30 × 40 cm, colocada sobre una cuadrícula de 0.5 × 0.5 cm (Tennant, 1975). Se contó el número de intersecciones entre los segmentos de raíz y las líneas verticales y horizontales de la cuadrícula (Tennant, 1975). La densidad de raíces ($\text{cm de raíz cm}^{-3}$ de suelo) se estimó con el producto del número de intersecciones x el factor de conversión de longitud (0.3928), para una cuadrícula de 0.5 × 0.5 cm (Tennant, 1975; López-Castañeda y Richards, 1994a).

Datos Meteorológicos

Los datos diarios de temperatura máxima y mínima del aire, y la precipitación acumulada semanalmente se

registraron con un termómetro de máxima y mínima de columna de mercurio (Marca Taylor) y un pluviómetro de acumulación semanal en el lugar en el que se estableció el experimento en condiciones de campo, respectivamente.

Contenido de Humedad Edáfica

Se extrajeron muestras de suelo con una barrena del tipo Veihmeyer, para determinar el contenido hídrico en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60 y 60-80 cm, semanalmente durante el experimento. Las muestras de suelo se secaron en una estufa con circulación de aire forzado marca GCA Corporation, U.S.A., modelo 17. El contenido de humedad aprovechable (HA) se calculó de acuerdo al método gravimétrico [HA (%) = ((Peso del suelo húmedo – Peso del suelo seco) / Peso del suelo seco) 100].

Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de varianza para las variables estudiadas, utilizando el programa SAS (2009) (Statistical Analysis System, Versión 9.1, para Windows). Para la comparación de medias, se calculó la diferencia mínima significativa (DMS, $P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura, Lluvia y Contenido Hídrico del Suelo

Las temperaturas mínimas y máximas promedio registradas durante el ciclo fueron 7 y 24 °C (Figura 1); estos valores de temperatura se consideran favorables para el crecimiento y desarrollo del trigo y la cebada, considerando que la temperatura base para el crecimiento de la cebada y el trigo tiene un valor de 0 °C (Cao y Moss, 1989; López-Castañeda *et al.*, 1996) y un valor de 30-32 °C, para la temperatura máxima a la que el crecimiento de las plantas empieza a disminuir rápidamente (Vincent, 1989).

La cantidad de lluvia registrada durante el experimento fue 305 mm de los cuales, el 81% ocurrió en las primeras tres semanas después de la siembra y el 19% en la etapa de elongación del tallo (56 dds) y al inicio del periodo de llenado de grano (84 dds) (Figura 1). La distribución de la lluvia durante el experimento, mostró un patrón de sequía intermitente durante el periodo de preantesis y un patrón de sequía terminal durante el periodo de postantesis (Figura 1); las deficiencias hídricas en ésta etapa reducen considerablemente el contenido hídrico en las células de la planta, mostrando síntomas de marchitamiento y pérdida de turgencia,

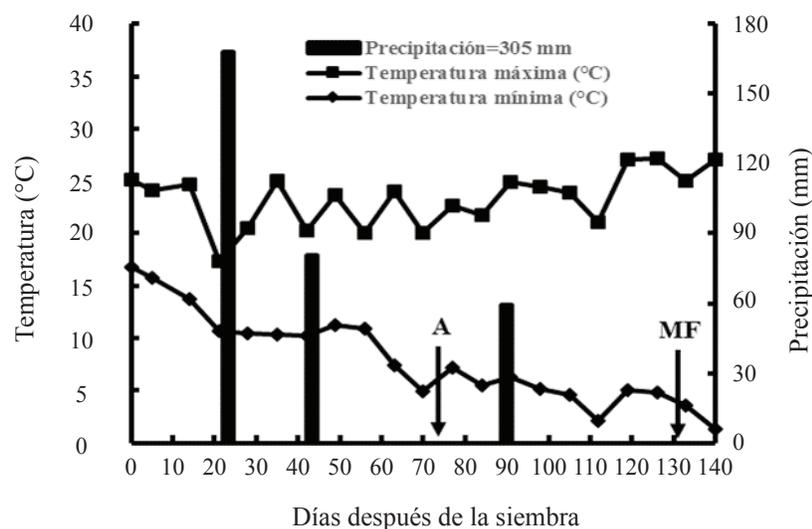


Figura 1. Temperatura máxima y mínima promedio semanal, y precipitación semanal acumulada durante el ciclo otoño-invierno 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. A = antesis o floración y MF = madurez fisiológica.

que repercuten en una disminución del intercambio gaseoso y fotosíntesis de la planta y finalmente en el rendimiento de grano (Blum, 2011).

El contenido hídrico en todos los estratos del suelo se mantuvo cercano a capacidad de campo (CC) entre los cinco (aplicación del riego de siembra) y 21 dds (168 mm de lluvia); se observó un segundo y tercer pico de alta humedad aprovechable en todos los estratos del suelo, debido a las precipitaciones ocurridas a los 42 (80.5 mm de lluvia) y 91 dds (59 mm de precipitación). No obstante, estos periodos de alta humedad aprovechable en el suelo, se observaron periodos de sequía intermitente en el suelo; el contenido hídrico edáfico disminuyó por debajo del porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) en los estratos de 0-20 y 20-40 cm entre los 63 y 84 dds, y entre los 98 y 140 dds en el estrato de 0-20 cm, y entre los 112 y 140 dds en el estrato de 20-40 cm (Figura 2). El primer periodo de sequía en el suelo coincidió con las etapas de espigamiento, antesis e inicio de la formación del grano, y el segundo periodo de déficit hídrico edáfico se presentó durante la mayor parte del periodo de llenado del grano hasta la madurez fisiológica (Figura 2). La mayor disminución en el contenido hídrico del suelo en los estratos de 0-20 y 20-40 cm, se debió a una mayor extracción de agua, al considerar que el 50% de las raíces, se concentran en estos estratos del suelo en trigo, cebada y triticale en condiciones de secano (López-Castañeda y Richards, 1994a).

Comparación del Rendimiento de Grano y sus Componentes entre Especies

Las mayores diferencias en rendimiento de grano y sus componentes, se observaron entre las especies estudiadas; la cebada produjo 47, 12, 37, 16 y 32% mayor rendimiento de grano, biomasa aérea, índice de cosecha, número de granos espiga⁻¹ y peso de 100 granos que el trigo, y 47, 47 y 32% mayor rendimiento de grano, índice de cosecha y peso de 100 granos que el triticale (Cuadro 3). La cebada tuvo mayor rendimiento de grano en menor número de días a antesis y madurez fisiológica que el trigo y el triticale, y tuvo menor peso hectolítrico del grano y altura de planta que el trigo y el triticale. El triticale produjo 27, 15 y 18% mayor número de espigas m⁻², número de granos m⁻² y peso hectolítrico que la cebada, y 18, 31, 25 y 7% mayor biomasa aérea, número de espigas m⁻², número de granos m⁻² y peso hectolítrico que el trigo. El trigo tuvo mayor altura de planta y mayor número de días a antesis que la cebada y el triticale (Cuadro 3).

La cebada fue menos afectada por la sequía que el trigo y el triticale, debido a que completó sus procesos de desarrollo fenológico en menor tiempo y de ésta forma, evadió en mayor grado el severo estrés hídrico terminal durante el periodo de llenado del grano; otros estudios en condiciones de secano con sequía terminal han determinado que la cebada supera en rendimiento de grano al trigo y al triticale, debido a su más rápido

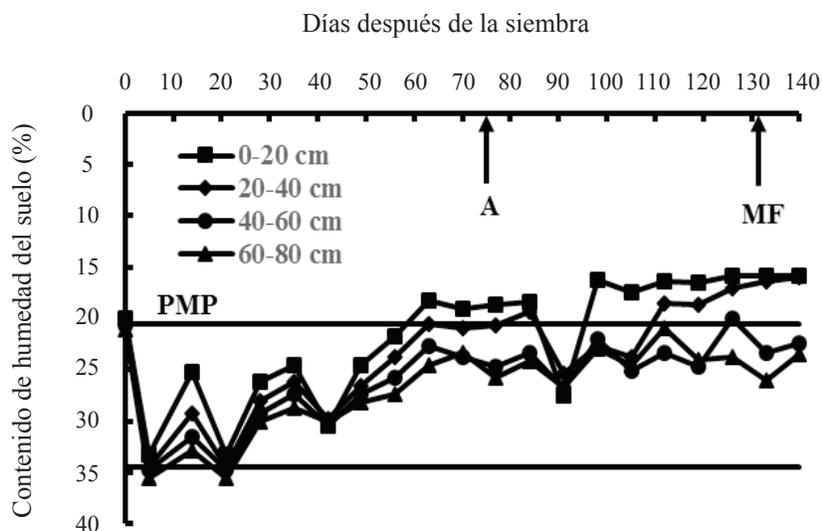


Figura 2. Contenido hídrico edáfico en los estratos de 0-20 (a), 20-40 (b), 40-60 (c) y 60-80 cm (d) bajo condiciones de secano en el ciclo otoño-invierno 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. A = antesis o floración y MF = madurez fisiológica.

Cuadro 3. Rendimiento y características fenológicas y fisiológicas de los cultivos de cebada, trigo y triticale en condiciones de secano, en el ciclo otoño-invierno 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca.

Especie	RG	BM	IC	E M ²	G M ²	G E	P100G	PH	DA	DMF	AP
	- - - g m ² - - -						g	g mL ⁻¹			cm
Cebada	101	526	0.19	195	5269	31	2.5	39.4	64	126	67
Trigo	54	463	0.12	184	4647	26	1.7	44.7	76	132	80
Triticale	54	567	0.10	266	6226	28	1.7	47.9	70	135	75
DMS (<i>P</i> ≤ 0.05)	10	57	0.01	31	946	4	0.2	3	2	3	3

RG = rendimiento de grano; BM = biomasa aérea final; IC = índice de cosecha; E M² = espigas m²; G M² = granos m²; G E = granos por espiga; P100G = peso de 100 granos; PH = peso hectolítrico; DA = días a antesis; DMF = días a madurez fisiológica; AP = altura de planta.

desarrollo del área foliar, mayor acumulación de materia seca y mayor precocidad (López-Castañeda y Richards, 1994b).

Un estudio conducido bajo condiciones de secano con líneas de porte alto, intermedio y bajo de avena, cebada de primavera e invierno, trigo de invierno y centeno de invierno, mostró que las variedades de cebada de invierno y primavera tuvieron mayor rendimiento de grano que las variedades de trigo, avena y centeno invernales, debido a su mayor índice de cosecha (Singh y Stoskopf, 1971); se observó también que la altura de planta estuvo negativamente relacionada con el índice de cosecha y que una reducción en la altura de planta, la cual reduce el tamaño de la demanda del tallo, pudo haber disminuido la capacidad de almacenamiento de asimilados en el tallo; una correlación negativa y significativa entre la altura de planta y el índice de cosecha en trigos de invierno, sugiere que el índice de cosecha puede mejorar, reduciendo el tamaño de la planta (Singh y Stoskopf, 1971; Fischer, 1989).

El índice de cosecha fue el componente que más contribuyó al alto rendimiento de grano de cebada posiblemente, debido a una mejor distribución de los asimilados entre los órganos vegetativos y el grano (Singh y Stoskopf, 1971). Estos autores señalan también que un mayor índice de cosecha y rendimiento de grano bajo sequía, pueden lograrse, al seleccionar plantas de menor porte, entrenudos más cortos o menor número de entrenudos y un periodo vegetativo más corto; la cebada reúne algunos de estos caracteres, lo que puede explicar su mejor comportamiento que el trigo y el triticale, en condiciones de sequía terminal (López-Castañeda y Richards, 1994b). Otros caracteres de la planta que pueden contribuir a mayor índice de cosecha y rendimiento de grano, bajo condiciones de

estrés hídrico terminal en cereales de grano pequeño: son una mayor tasa de llenado de grano y mayor capacidad de removilización de reservas del tallo al grano; en condiciones de sequía terminal en el sureste de Australia, se determinó que la removilización de reservas del tallo al grano puede contribuir al rendimiento de grano de cebada hasta en 70% y en trigo 57% (López-Castañeda y Richards, 1994b).

Comparación del Sistema Radical entre Especies

La mayor densidad radical se concentró cerca de la superficie del suelo (0-20 cm) en la cebada (69%), el trigo (56%) y el triticale (71%) (Figura 3); la densidad de raíces en promedio de los diferentes genotipos dentro de especies, mostró que el trigo tuvo 39, 63 y 33% mayor densidad radical que la cebada en los estratos de 40-60, 60-80 y 80-100 cm, y 50, 69, 63 y 100% mayor densidad radical que el triticale, en los estratos de 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm (Cuadro 4). En el estrato de 0-20 cm no se observaron diferencias significativas entre especies y en el estrato de 20-40 cm, no se observaron diferencias significativas entre la cebada y el trigo (Cuadro 4). Los valores de la densidad de raíces observados en el presente estudio son más bajos en promedio de las tres especies que los determinados para las mismas especies en el sureste de Australia (López-Castañeda y Richards, 1994a) y Australia Occidental (Siddique *et al.*, 1989) bajo en condiciones de sequía terminal; estas diferencias pueden estar relacionadas con el número de días requeridos para alcanzar la antesis que el presente estudio fue 70 días y en el sureste de Australia varió de 118 a 134 dds (López-Castañeda y Richards, 1994a) y de 100-125 dds en Australia

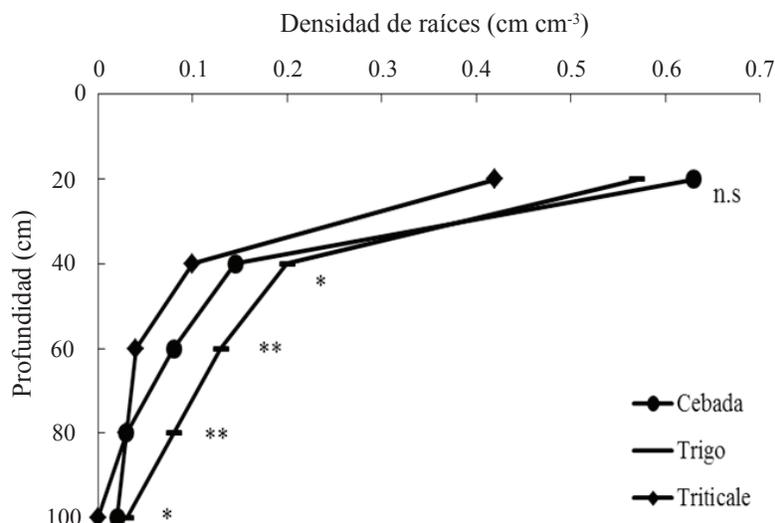


Figura 3. Densidad radical en diferentes estratos del suelo, de los cultivos de cebada, trigo y triticale en condiciones de secano, en el ciclo otoño-invierno 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. **($P \leq 0.01$); *($P \leq 0.05$); n.s. = no significativo.

Occidental (Siddique *et al.*, 1989); se ha determinado que el crecimiento del sistema radical en trigo culmina cuando las plantas alcanzan la etapa de antesis o floración (Barraclough, 1984).

La superioridad en densidad del sistema radical de la cebada sobre el trigo y el triticale, en condiciones de sequía terminal se ha observado también en otros trabajos de investigación; López-Castañeda y Richards (1994a) determinaron que la cebada produjo 40% mayor densidad de raíces que trigo y triticale en los 15 cm más cercanos a la superficie del suelo, manteniendo significativamente mayor densidad radical hasta los 90 cm de profundidad; Atta *et al.* (2013) confirmaron que la mayor densidad de raíces en cebada y trigo bajo estrés hídrico, se concentró cerca de la superficie del suelo (15 cm de profundidad). También, Gregory *et al.*

(1992) y Atta *et al.* (2013) observaron que la cebada produjo mayor densidad radical que trigo entre los 0 y 75 cm de profundidad del suelo en condiciones de secano con estrés hídrico terminal en Australia Occidental.

Las divergencias en la densidad radical entre el trigo y la cebada, y el triticale, observadas en los estratos de 40-100 cm, pueden deberse a diferencias en el número de días a floración y consecuentemente, la duración del crecimiento y cambios en la intercepción de luz y arquitectura del dosel; estos factores son importantes para el crecimiento del sistema radical, en virtud de que la duración del funcionamiento del área foliar y la oferta de carbono para el sistema radical tienen influencia en el crecimiento y exploración de las raíces (Watt *et al.*, 2013).

Cuadro 4. Densidad radical en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, de los cultivos de cebada, trigo y triticale en condiciones de secano, en el ciclo otoño-invierno 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca.

Especies	Densidad radical				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
	----- cm cm ⁻³ -----				
Cebada	0.63	0.15	0.08	0.03	0.02
Trigo	0.57	0.20	0.13	0.08	0.03
Triticale	0.42	0.10	0.04	0.03	0.00
DMS ($P \leq 0.05$)	0.25	0.06	0.04	0.02	0.01

Comparación del Rendimiento de Grano y sus Componentes entre Genotipos

La variabilidad genética en rendimiento de grano y sus componentes entre genotipos individuales fue substancial; la variedad de cebada Cleopatra produjo mayor rendimiento de grano, índice de cosecha y granos espiga⁻¹ que todos los demás genotipos; además, Cleopatra registró el menor número de días a madurez fisiológica (Cuadro 5). También, se observaron diferencias entre genotipos para la biomasa aérea final, espigas m⁻², número de granos m⁻² y altura de planta; Cleopatra, Lenetah, Betzes, Triticale 118, criollo 'Venturero', Yaqui 50, Marroqui, Nainari 60, Huamantla, Salamanca S-75, Verano S-91, Romoga F-96, Borlaug M-95 y la línea F₆ de ICARDA, tuvieron mayor biomasa aérea final que los demás genotipos; Betzes y el Triticale 118 produjeron mayor número de espigas m⁻² que los otros genotipos; Cleopatra, Lenetah, Betzes, Triticale 118, criollo 'Venturero', Yaqui 50, Nainari 60, Huamantla, Salamanca S-75, Verano S-91, Romoga F-96, Borlaug M-95, Blanca Grande, Rebeca F-2000, Náhuatl F-2000 y la línea F₆ de ICARDA, tuvieron mayor número de granos m⁻² que los demás genotipos; Cleopatra y el criollo 'Venturero' obtuvieron mayor peso de 100 granos que los demás genotipos; y Marroquí tuvo la mayor altura de planta (Cuadro 5).

En otros estudios en cereales de grano pequeño bajo condiciones de estrés hídrico terminal, también se ha confirmado que la cebada tiene un mejor comportamiento agronómico que el trigo, el triticale y la avena; la mejor variedad de cebada O'Connor produjo 39% más grano que la mejor variedad de trigo Kulin, debido a que su biomasa aérea final e índice de cosecha fueron 25 y 4% mayores que los de Kulin, en dos localidades de secano en Nueva Gales del Sur, Australia (López-Castañeda y Richards, 1994a). En otro trabajo de investigación con cebada bajo condiciones de riego, sequía y temporal se determinó que el rendimiento de grano estuvo positivamente relacionado con la biomasa aérea final y el número de granos m⁻²; las líneas que produjeron mayor rendimiento de grano también tuvieron mayor biomasa aérea final y granos m⁻² (López-Castañeda, 2011).

Comparación del Sistema Radical entre Genotipos

Al comparar en forma individual las líneas utilizadas para determinar la densidad de raíces, se observó que la mayor proporción de raíces se concentró cerca de la superficie del suelo (0-20 cm), sin presentar diferencias significativas entre genotipos (Cuadro 6). El criollo 'Venturero' fue el genotipo que produjo más raíces en las profundidades de 20-100 cm (Figura 4). En el estrato de 60-80 cm también se observaron diferencias significativas en la densidad de raíces entre genotipos; Lenetah, Triticale 118, Yaqui 50, Marroqui, y Náhuatl F-2000 tuvieron mayor densidad de raíces que Cleopatra y Tlaxcala F-2000 (Figura 4).

La presencia de una alta proporción de raíces cerca de la superficie del suelo se ha observado también en otros trabajos de investigación; Gregory *et al.* (1992) determinaron que tanto la variedad de trigo Gutha como las variedades de cebada O'Connor y Beecher, produjeron la mayor proporción de raíces cerca de la superficie del suelo (15 cm) y que el sistema radical de Gutha estuvo confinado a una profundidad menor de 60 cm, mientras que las raíces de O'Connor y Beecher penetraron hasta 80 cm de profundidad, en condiciones de secano con sequía terminal en Australia Occidental. En otro estudio de raíces bajo condiciones de estrés hídrico terminal en el sureste de Australia, se determinó que la cebada O'Connor tuvo 23% mayor densidad de raíces que la variedad Meteor de trigo cerca de la superficie del suelo (10 cm) y que las diferencias en densidad radical entre estos genotipos, se mantuvieron hasta los 90 cm de profundidad del suelo (López-Castañeda y Richards, 1994a).

El mayor tamaño de las raíces en el trigo 'Venturero', le confiere una mayor capacidad de adaptación a condiciones de déficit hídrico; estudios previos en la comparación del tamaño del sistema radical entre trigos antiguos y modernos, indican que los cultivares antiguos tienen sistemas de raíces más grandes que los cultivares modernos; un sistema radical más grande, extenso y profundo, puede optimizar la absorción de agua y nutrientes, y ayudar a maximizar el rendimiento de grano (Waines y Ehdaie, 2007). En el presente estudio, el trigo 'Venturero' tuvo la más alta densidad de raíces y produjo el rendimiento de grano más alto

Cuadro 5. Rendimiento y características fenológicas y fisiológicas de los diferentes genotipos de cebada, trigo y triticale en condiciones de secano, en el ciclo otoño-invierno 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca.

Genotipos	RG	BM	IC	E M ⁻²	G M ⁻²	G E	P100G	PH	DA	DMF	AP	
	- - g m ⁻² - -						g	g mL ⁻¹				cm
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)												
Cleopatra	135	512	0.26	125	6319	51	3.1	40.1	67	116	74	
Lenetah	93	492	0.19	208	4630	23	2.5	39.4	64	126	60	
Betzes	76	573	0.13	252	4857	19	2.0	38.6	60	135	67	
Triticale (<i>Triticosecale</i> Wittmack)												
Triticale 118	54	567	0.10	266	6226	28	1.7	47.9	70	135	75	
Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)												
Criollo 'Venturero'	88	495	0.18	241	5172	22	3.0	64.6	105	150	89	
Criollos antiguos												
Yaqui 50	70	546	0.13	191	4641	24	1.9	46.5	67	129	97	
Marroqui	42	587	0.07	186	3854	21	1.3	37.9	90	135	107	
Gabo	26	437	0.06	183	3815	21	1.1	36.8	91	132	91	
Década de los 60's												
Nainari 60	58	497	0.11	192	5910	29	1.3	37.9	71	135	85	
Huamantla	39	504	0.08	202	5030	25	1.0	38.9	88	132	78	
Década de los 70's												
Salamanca S-75	68	480	0.14	183	4797	26	2.0	38.7	67	129	71	
Cleopatra VS-74	65	396	0.16	178	3980	22	2.3	50.7	67	126	65	
Pavón F-76	44	420	0.11	201	4037	20	1.5	43.2	74	125	73	
Década de los 80's												
Gálvez M-87	72	421	0.17	133	3924	31	1.9	51.5	67	125	74	
Temporalera M-87	39	371	0.10	172	3308	19	1.5	40.3	72	129	74	
Década de los 90's												
Verano S-91	60	464	0.13	187	5189	28	1.7	47.9	67	129	73	
Romoga F-96	57	509	0.11	220	5706	26	1.7	43.7	72	132	73	
Borlaug M-95	13	489	0.03	159	5366	34	1.4	43.5	95	142	60	
Modernos												
Blanca Grande	84	462	0.18	187	5807	31	1.9	55.0	67	126	74	
Tlaxcala F-2000	70	386	0.17	169	4166	25	2.0	50.3	67	128	71	
Rebeca F-2000	55	461	0.11	192	4875	29	1.5	40.9	86	131	76	
Náhuatl F-2000	49	457	0.11	194	5984	33	1.3	43.9	71	135	82	
Líneas avanzadas												
VEE/5/SKH8/4/RRV/WW15/3/BJ//ON*3/BON ICW86 1034-300L-300AP-0L-5AP-0L-0AP (F ₆ . ICARDA. Siria)	73	487	0.15	159	4754	30	1.7	50.1	67	134	92	
Temp. M-87/Col. 1718 CPRST-13-12T (F ₄)	43	462	0.09	169	4100	25	1.5	43.1	72	132	92	
Temp. M-87/Col.1718 CPRST-13-13T (F ₄)	30	384	0.08	156	3173	21	1.3	34.3	81	132	93	
Media General	60	476	0.13	189	4748	26	1.8	44.0	75	131	79	
DMS ($P \leq 0.05$)	22	123	0.03	66	2031	8	0.3	6	5	6	5	

RG = rendimiento de grano; BM = biomasa aérea final; IC = índice de cosecha; E M⁻² = espigas m⁻²; G M⁻² = granos m⁻²; G E = granos por espiga; P100G = peso de 100 granos; PH = peso hectolítrico; DA = días a antesis; DMF = días a madurez fisiológica; AP = altura de planta.

Cuadro 6. Densidad radical en los estratos de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, de los cultivos de cebada, trigo y triticale en condiciones de secano, en el ciclo otoño-invierno, 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca.

Genotipos	Densidad radical				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
----- cm cm ⁻³ -----					
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)					
Cleopatra	0.62	0.12	0.08	0.02	0.00
Lenetah	0.64	0.17	0.08	0.04	0.04
Triticale (<i>Triticosecale</i> Wittmack)					
Triticale 118	0.42	0.10	0.04	0.03	0.00
Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)					
Criollo 'Venturero'	0.73	0.47	0.31	0.25	0.13
Yaqui 50	0.67	0.17	0.11	0.04	0.00
Marroqui	0.58	0.14	0.09	0.06	0.00
Tlaxcala F-2000	0.32	0.07	0.05	0.01	0.00
Náhuatl F-2000	0.56	0.16	0.08	0.03	0.00
Media General	0.57	0.18	0.10	0.06	0.11
DMS ($P \leq 0.05$)	0.48	0.12	0.07	0.03	0.00

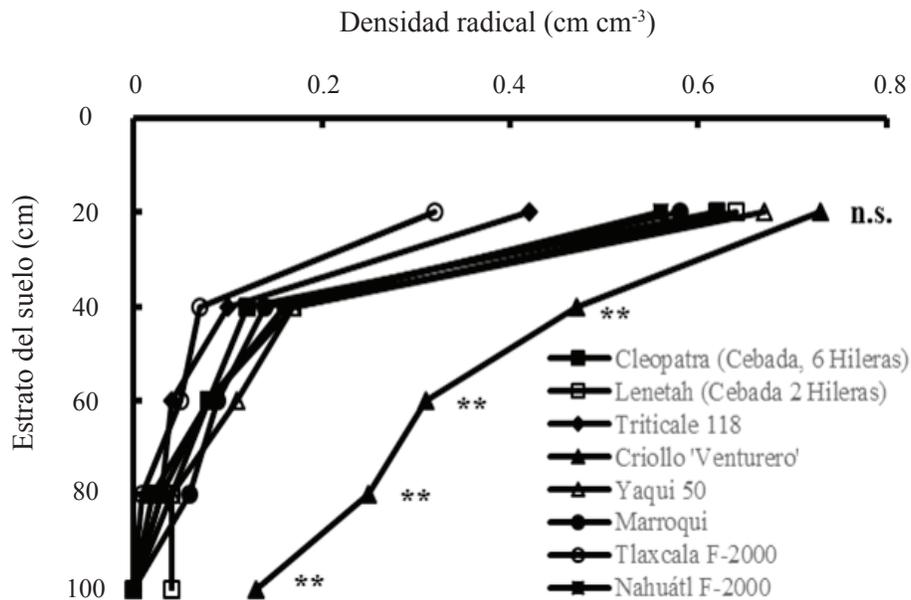


Figura 4. Densidad radical determinada en diferentes estratos del suelo en distintos genotipos de cebada, trigo y triticale en condiciones de secano, en el ciclo otoño-invierno 2013-2014. San Cristóbal Suchixtlahuaca, Oaxaca. **($P \leq 0.01$); n.s. = no significativo.

entre los genotipos de trigo, características indicativas de un mejor comportamiento de éste material en comparación con los otros genotipos de trigo, bajo condiciones de humedad residual con sequía terminal. La relación entre las características del sistema radical y el rendimiento de grano bajo condiciones de estrés hídrico también se ha demostrado en variedades de cebada maltera en Želešice, República Checa, donde se observó que las variedades con mayor tamaño del sistema radical produjeron mayor rendimiento de grano bajo sequía y tuvieron mayor contenido de almidón, sacáridos, extracto de malta y rendimiento de proteína (Chloupek *et al.*, 2010).

Las variedades de cebada produjeron mayor rendimiento de grano que los genotipos de trigo y triticale gracias a su mayor índice de cosecha, peso o tamaño del grano y mayor densidad de raíces, así como la menor estatura de planta y ciclo biológico más corto; estos atributos hacen a la cebada uno de los cereales más populares en áreas de secano con déficit hídrico terminal durante la antesis y el periodo de llenado de grano, pues generalmente produce grano a pesar del estrés hídrico, debido principalmente a su rápido crecimiento y precocidad (López-Castañeda y Richards, 1994b), y sistema de raíces más profundo y profuso (López-Castañeda y Richards, 1994a). El trigo y el triticale presentaron menor rendimiento de grano que la cebada y tuvieron un comportamiento similar entre sí, sin embargo, el trigo 'Venturero' produjo un rendimiento de grano similar a las variedades de cebada Lenetah y Betzes, y a las variedades de trigo Gálvez M-87 y Blanca Grande; a diferencia de estos genotipos, el trigo 'Venturero' tuvo mayor número de espigas m^{-2} y tamaño del grano, y el más alto peso hectolítrico o densidad del grano, la mayor densidad de raíces, y el ciclo biológico más largo, corroborando su gran adaptación a condiciones de baja humedad residual y estrés hídrico terminal severo.

Los atributos de la planta que se deben considerar en los criterios de selección de nuevos genotipos de cereales de grano pequeño, adaptados a condiciones de humedad residual y sequía terminal, como las que se tuvieron durante el experimento, son un sistema radical profundo y profuso siendo el carácter genético más importante para lograr mejorar la resistencia a sequía y el rendimiento.

CONCLUSIONES

- La cebada fue la especie sobresaliente al tener mayor rendimiento de grano, biomasa aérea, índice de cosecha, número de granos por espiga y peso de 100 granos que el trigo, y mayor rendimiento de grano, índice de cosecha y peso de 100 granos que el triticale; la cebada produjo su alto rendimiento en menor número de días a antesis y madurez fisiológica que el trigo y el triticale.
- El triticale tuvo un comportamiento interesante al producir mayor número de espigas m^{-2} , número de granos m^{-2} y peso hectolítrico que la cebada, y mayor biomasa aérea, número de espigas m^{-2} , número de granos m^{-2} y peso hectolítrico que el trigo; el trigo tuvo mayor altura de planta y número de días a antesis que la cebada y el triticale.
- La mayor proporción de raíces en la cebada, el trigo y el triticale se concentró cerca de la superficie del suelo (20 cm), sin presentar diferencias significativas entre especies; el trigo produjo mayor densidad de raíces que la cebada entre los 40 y 100 cm, y mayor densidad radical que el triticale entre los 20 y 100 cm.
- La variabilidad entre todos los genotipos en conjunto mostró que la variedad de cebada Cleopatra, fue la que tuvo el más alto rendimiento de grano, índice de cosecha y granos espiga⁻¹; este mayor rendimiento de grano se obtuvo con menor número de días a madurez fisiológica que los demás genotipos.
- El trigo 'Venturero' produjo mayor rendimiento de grano, índice de cosecha, número de espigas m^{-2} , peso de 100 granos, peso hectolítrico, número de días a antesis y madurez fisiológica, densidad radical y tuvo una mejor distribución de raíces que los demás genotipos de trigo entre los 20 y 100 cm de profundidad.
- Los genotipos de cebada y trigo con mayor densidad de raíces, produjeron mayor rendimiento de grano, corroborando su mayor resistencia a sequía o adaptación a condiciones de déficit hídrico terminal.

LITERATURA CITADA

- Atta, B. M., T. Mahmood, and R. M. Trethowan. 2013. Relationship between root morphology and grain yield of wheat in north-western NSW, Australia. *Aust. J. Crop Sci.* 7: 2108-2115.
- Barraclough, P. B. 1984. The growth and activity of winter wheat roots in the field: root growth of high-yielding crops in relation to shoot growth. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 103: 439-442.

- Blum, A. 2011. Plant breeding for water-limited environments. Springer. New York, NY, USA.
- Cao, W. and D. N. Moss. 1989. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Sci.* 29: 1018-1021.
- Chloupek, O., V. Dostál, T. Středa, V. Psota, and O. Droňáková. 2010. Drought tolerance of barley varieties in relation to their root system size. *Plant Breed.* 129: 630-636.
- Condon, A. G., R. A. Richards, and G. D. Farquhar. 1992. The effect of variation in soil-water availability, vapor-pressure deficit and nitrogen nutrition on carbon isotope discrimination in wheat. *Australian J. Agric. Res.* 43: 935-947.
- Condon, A. G., R. A. Richards, G. J. Rebetzke, and G. D. Farquhar. 2002. Improving intrinsic water-use efficiency and crop yield. *Crop Sci.* 42: 122-131.
- Evans, L. T. 1993. Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge University Press. Great Britain.
- Fischer, R. A. 1989. Cropping systems for greater drought resistance. pp. 201-211. *In:* F. W. Baker (ed.). Drought resistance in cereals. C.A.B. International. UK.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- Gregory, P. J., D. Tennant, and R. K. Belford. 1992. Root and shoot growth, and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil in a Mediterranean-type environment. *Aust. J. Agric. Res.* 43: 555-573.
- Kirby, E. J. M. and M. Appleyard. 1984. Cereal guide development. Plant Breeding Institute, Arable Unit, National Agricultural Centre, Stoneleigh, Kenilworth, Warwickshire CV82LZ. England.
- Kramer, P. J. 1969. Plant and soil water relationships: A modern synthesis. McGraw-Hill Book Co., Inc. New York, NY, USA.
- López-Castañeda, C. and R. A. Richards. 1994a. Variation in temperate cereals in rainfed environments. I. Grain yield, biomass and agronomic characteristics. *Field Crops Res.* 37: 51-62.
- López-Castañeda, C. and R. A. Richards. 1994b. Variation in temperate cereals in rainfed environments. II. Phasic development and growth. *Field Crops Res.* 37: 63-72.
- López-Castañeda, C. and R. A. Richards. 1994c. Variation in temperate cereals in rainfed environments. III. Water use and water-use efficiency. *Field Crops Res.* 39: 85-98.
- López-Castañeda, C., R. A. Richards, G. D. Farquhar, and R. E. Williamson. 1996. Seed and seedling characteristics contributing to variation in early vigor among temperate cereals. *Crop Sci.* 36: 1257-1266.
- López-Castañeda, C. 2011. Variación en rendimiento de grano, biomasa y número de granos en cebada bajo tres condiciones de humedad del suelo. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 14: 907-918.
- López-Castañeda, C. 2013. Resistencia a sequía en trigo. pp. 35:39. *In:* S. Cruz-Izquierdo, O. J. Ayala-Garay, N. Cruz-Huerta, I. Ramírez-Ramírez y E. Martínez-Villegas (eds.). Avances de Investigación 2012. Postgrado en Recursos Genéticos y Reproductividad-Genética. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de México, México.
- Palta, J. A., I. R. P. Fillery, and G. J. Rebetzke. 2007. Restricted-tillering wheat does not lead to greater investment in root and early nitrogen uptake. *Field Crops Res.* 104: 52-59.
- Parry, M. A. J., J. Wang, and J. L. Araus. 2012. New technologies, tools and approaches for improving crop breeding. *J. Int. Plant Biol.* 54: 210-214.
- Passioura, J. B. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce – from breeding to field management. *Agric. Water Manage.* 80: 176-196.
- Passioura, J. B. and J. F. Angus. 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Adv. Agron.* 106: 37-75.
- Richards, R. A. 2008. Genetic opportunities to improve cereal root systems for dryland agriculture. *Plant Product. Sci.* 11: 12-16.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2014. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <http://www.siap.gob.mx> (Consulta: junio 15, 2016).
- Salim, M. H., G. W. Todd, and A. M. Schlehuder. 1965. Root development of wheat, oats, and barley under conditions of soil moisture stress. *Agron. J.* 57: 603-607.
- SAS Institute. 2009. SAS for Windows. Release 9.1. Cary, NC, USA.
- Siddique, K. H. M., E. J. M. Kirby, and M. W. Perry. 1989. Ear: Stem ratio in old and modern wheat varieties; Relationship with improvement in number of grains per ear and yield. *Field Crops Res.* 21: 59-78.
- Singh, I. D. and N. C. Stoskopf. 1971. Harvest index in cereals. *Crop Sci.* 63: 224-226.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.* 63: 995-1001.
- Vincent, C. D. 1989. Recent advances in modelling crop response to temperature. *Outlook Agric.* 18: 54-57.
- Waines, J. G. and B. Ehdaie. 2007. Domestication and crop physiology: Roots of green-revolution wheat. *Ann. Bot.* 100: 991-998.
- Wang, X., M. Vignjevic, F. Liu, S. Jacobsen, D. Jiang, and B. Wollenweber. 2015. Drought priming at vegetative growth stages improves tolerance to drought and heat stresses occurring during grain filling in spring wheat. *Plant Growth Regul.* 75: 677-687.
- Watt, M., S. Moosavi, S. C. Cunningham, J. A. Kirkegaard, G. J. Rebetzke, and R. A. Richards. 2013. A rapid, controlled-environment seedling root screen for wheat correlates well with rooting depths at vegetative, but not reproductive, stages at two field sites. *Ann. Bot.* 112: 447-455.

Perspectiva del diseño cartográfico para estudios de uso del suelo y ordenamiento territorial: una revisión internacional, técnica y normativa

Perspective of cartographic design for land use and land management studies: an international, technical and policy review

Laura Cano Salinas^{1‡}, Rodrigo Rodríguez Laguna², José René Valdez Lazalde³,
Rosa Icela Beltrán Hernández¹, César Abelardo González Ramírez¹ y
Otilio Arturo Acevedo Sandoval²

¹ Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5. 42186 Mineral de la Reforma, Hgo., México.

² Área Académica de Ciencias Agrícolas y Forestales, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Av. Universidad km. 1, Ex-Hacienda de Aquetzalpa Apartado Postal 32. 43600 Tulancingo, Hgo., México.

[‡] Autora responsable (lau.cano@yahoo.com.mx)

³ Postgrado Forestal. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

RESUMEN

Además de las actividades básicas en la ordenación del territorio, como la generación de mapas temáticos y las consultas espaciales, es importante aplicar normas y regulaciones sobre el uso del suelo y planeación territorial. La creciente diversidad de estudios que analizan el cambio de uso del suelo, pone de manifiesto que la configuración espacial del uso del suelo es un factor clave en la resolución de muchos problemas ambientales. Sin embargo, en la revisión llevada a cabo, se encontraron diseños cartográficos, variados y definidos en función de las necesidades y propósitos de cada estudio. La evolución y expansión de la normatividad que regule el diseño cartográfico, es el primer paso para lograr un vínculo científico entre las políticas actuales de ordenamiento territorial y las evaluaciones de uso del suelo. De esta manera, las predicciones del cambio de uso del suelo serán más acertadas y permitirán el establecimiento de fronteras de cambio. Por otra parte, con el constante desarrollo de las nuevas tecnologías de percepción remota se han puesto al descubierto debilidades en los resultados cartográficos, y es imprescindible estandarizar algunos aspectos como la tipificación de la vegetación de acuerdo a un fin específico. La metodología CORINE Land Cover utilizada en toda Europa es un buen ejemplo de ello. Este trabajo reveló la necesidad de construir una base cartográfica adaptable y funcional a distintas situaciones, cuyos resultados puedan ser comparados con otros periodos estudiados. Es por ello,

que se presenta una propuesta inicial sobre los aspectos técnicos a considerar en el diseño cartográfico, cuyo desarrollo permitirá a largo plazo, la actualización de bases de datos históricos sobre el cambio de uso del suelo y cobertura vegetal con fines de planeación territorial.

Palabras clave: *dinámica de la cobertura del suelo; criterios cartográficos; política ambiental; percepción remota.*

SUMMARY

Besides the basic activities in regional planning, such as generation of thematic maps and spatial queries, it is important to apply rules and regulations to land use and territorial planning. The increasing diversity of studies analyzing land use change shows that spatial configuration of land use is a key factor in solving many environmental problems. However, our review found that cartographic designs varied and were defined according to the needs and purposes of each study. The evolution and expansion of regulations governing cartographic design is the first step towards a scientific link between current planning policies and land use assessments. This will allow predictions of land use change to be more accurate and to establish frontiers of change. Moreover, with its constant development, new remote sensing technologies have uncovered weaknesses in mapping, and thus, it is imperative to standardize some aspects such as

Como citar el artículo:

Cano Salinas, L., R. Rodríguez Laguna, J. R. Valdez Lazalde, R. I. Beltrán Hernández, C. A. González Ramírez y O. A. Acevedo Sandoval. 2016. Perspectiva del diseño cartográfico para estudios de uso del suelo y ordenamiento territorial: una revisión internacional, técnica y normativa. *Terra Latinoamericana* 34: 409-417.

Recibido: noviembre de 2015. Aceptado: agosto de 2016.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 409-417.

definition of vegetation according to a specific purpose. The CORINE Land Cover methodology across Europe is the best example. This work revealed the need to build a functional cartographic database adaptable to different situations, and whose results would enable comparison among periods. For this reason, we present here an initial proposal for technical aspects to be considered in cartographic design, whose development will allow long-term updating of historical databases on land use change and vegetation cover to support territorial planning.

Index words: *land cover dynamic; mapping criteria; environmental policy; remote sensing.*

INTRODUCCIÓN

El diseño de políticas para normar el cambio de uso del suelo, es uno de los desafíos en la planeación territorial de cualquier región. Las modificaciones no reguladas del uso del suelo, son una causa local de origen humano y sus consecuencias se ven reflejadas a nivel regional. Por esta razón, es importante tener una interpretación del problema con mayores y mejores elementos técnicos para la toma de decisiones. Sin embargo, la disponibilidad de datos históricos y la escasa precisión de los escenarios predictivos han sido factores limitantes en este tipo de estudios (de Chazal y Rounsevell, 2009). Por otro lado, la gestión del territorio, aplicada al análisis de los cambios de cobertura y uso del suelo, es importante para una caracterización integral del problema. La legislación ambiental debe adaptarse a cada caso con el fin de implementar un marco jurídico congruente con las condiciones de cada región. De esta manera, se puede vincular el ordenamiento territorial con la evaluación de uso del suelo para asignar usos adecuados a la tierra, dentro de un marco legal (Salas- Bourgoin *et al.*, 2008).

Por otra parte, la evolución tecnológica y la disponibilidad de imágenes de satélite de mayor resolución han sido aprovechadas por México para mejorar el proceso de cuantificación de los recursos naturales (FAO, 2010). Sin embargo, con el procesamiento digital de imágenes se han puesto al descubierto las debilidades de los datos generados, y la necesidad de utilizar normas y estándares para documentar la calidad cartográfica y la de los productos derivados de tales mapas (Fallas, 2002).

En este contexto, el objetivo del presente estudio es mostrar los hallazgos acerca de la experiencia técnica y normativa de las regiones de Norteamérica, Latinoamérica y Europa en materia de uso del suelo y ordenamiento territorial, que contribuya al conocimiento de los criterios y el diseño cartográfico de evaluación de la cobertura de la tierra por percepción remota.

Normativa Internacional sobre Cambio de Uso del Suelo

La legislación ambiental es un factor indirecto de suma importancia en la ordenación del territorio porque permite entender la trayectoria del manejo del suelo. Los Cuadros 1, 2 y 3 presentan el marco jurídico vigente en distintas partes del mundo.

De la información presentada en el Cuadro 2 resulta un dato evidente, los países europeos cuentan con una base de datos común (CORINE Land Cover) que define los usos y coberturas terrestres de forma generalizada para toda la comunidad europea. La trascendencia de esta metodología deriva en ventajas sobre la organización del territorio, no obstante, el ordenamiento territorial europeo es guiado por la “Carta Europea de Ordenación del Territorio” actualizada hasta el año 1993, y la planificación de las tierras en cada país es reproducida y adaptada a cada uno de los niveles de organización territorial.

CORINE Land Cover (Programa de coordinación de información del medio ambiente, por sus siglas en inglés) es un proyecto desarrollado en Europa en el año 1987 con el fin de estandarizar las nomenclaturas de las coberturas terrestres para los países europeos, que permitiera hacer una comparación entre los usos de los suelos y facilitara la toma de decisiones tanto regionales como globales. Uno de sus objetivos principales es compilar la información sobre el estado del ambiente en toda la Unión Europea y asegurar que la información obtenida sea consistente y compatible (Agencia Ambiental Europea, 1994). La nomenclatura de dicha metodología se basa en 44 clases de uso y cobertura y la determinación de la escala establecida (1:100 000) permite una representación amplia y semidetallada de la información. Adicionalmente, en términos de factibilidad se ajusta a restricciones de presupuesto y límites de tiempo de estudio promedios (Agencia Ambiental Europea, 1994).

Cuadro 1. Escala cartográfica y legislación en materia de ordenamiento territorial y uso del suelo en Norteamérica.

Sistema Norteamericano		
Escala	País	Soporte jurídico / Instrumentos de gestión
Cartografía diversa. Escalas desde 1:17,000,000 hasta 1:2,400	Estados Unidos de América	La Ley de Política Nacional en Materia de Medio Ambiente /National Environmental Policy Act (NEPA) 1969, Ley de Manejo Orgánico (Organic Administration Act) de 1987, Ley de Uso Múltiple y Rendimiento Sostenido (Multiple-Use Sustained-Yield Act, MUSYA) de 1960, Ley Taylor sobre Pastoreo (Taylor Grazing Act) de 1934.
	Canadá	Ley Canadiense de Protección Ambiental, 1999 (Canadian Environmental Protection Act, CEPA 1999), Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente (Environmental Protection and Enhancement Act).

Fuente: Commission for Environmental Cooperation (<http://www.cec.org/lawdatabase>).

Cuadro 2. Metodología cartográfica y legislación en materia de ordenamiento territorial y uso del suelo en Europa.

Sistema Europeo		
Metodología cartográfica de uso del suelo	País	Soporte jurídico / Instrumentos de gestión
CORINE Land Cover escala 1:100,000 (Landsat y SPOT)	Alemania	Carta Europea de Ordenación del Territorio (1983), Planes de Uso de la Tierra y Planes de Ordenamiento Ambiental a nivel distrital y local.
	Suiza	Ley Federal de Planificación Territorial (1979), Lineamientos para el Desarrollo Espacial de Suiza (1995), Plan Director Cantonal con escalas definidas de 1:50,000 y 1:25,000.
	Italia	Ley Urbanística de 1942, Ley 1150 de 1942, Planes territoriales regionales y provinciales con escalas definidas de 1:250,000, 1:50,000 y 1:25,000.
	Portugal	Decreto Ley 176-A de 1988 sobre planes regionales, Decreto Ley 794/76 sobre política de suelos, Decreto Ley 69/90 sobre la formulación de planes de OT, Decreto Ley 448/91 sobre régimen de parcelaciones urbanas.
	Holanda	Ley del Plan Nacional de Ordenación Territorial (1950), Ley de OT (1962, reformada en 1985 y 1994), Informe anual: "Cuarta Nota Sobre la Planificación Territorial de los Países Bajos" con dos representaciones cartográficas: "Estructura Espacial Actual" y "Escenario de Desarrollo Espacial".
	Francia	Ley de Orientación del Suelo de 1967, Ley de Montaña de 1985, Ley 95-115 sobre orientación para la Ordenación y el Desarrollo del Territorio, Informe: Diseñar la Francia del año 2015 de la DATAR (Delegación para el Manejo del Territorio y la Acción Regional), Planes de Ocupación del Suelo a nivel local con escalas definidas de 1:5,000.
	Grecia	Decreto Ley del 17 de julio de 1923 sobre formas de uso de la tierra, Ley de Expansión de Ciudades y Desarrollo Urbano (1337/1983), Ley General de Construcción (1577/1985).
	España	Ley del Suelo de 1956 (reformada en 1975 y 1990), Ley de Régimen del Suelo y Ordenación Urbana de 1992, Leyes regionales sobre Ordenamiento Territorial en cada provincia.

Fuente: European Commission (http://europa.eu/eu-law/legislation/index_es.htm).

Cuadro 3. Escala cartográfica y legislación en materia de ordenamiento territorial y uso del suelo en México y Latinoamérica.

Sistema Latinoamericano		
Escala	País	Soporte Jurídico / Instrumentos de Gestión
Cartografía 1:1,000,000 y 1:250,000	† México	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) última reforma 2014, Ley General de Asentamientos Humanos de 1993, Ley General de Cambio Climático de 2012, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable de 2003.
	‡ Venezuela	Ley Orgánica de OT de 1983, Planes departamentales con escalas definidas de 1:250,000 y planes municipales 1:25,000.
	‡ Bolivia	Marco General de Ordenamiento Territorial (MARGOT).
	‡ Colombia	Decreto 2811, 1974: Código Nacional de Recursos Naturales, Renovables y de Protección del Medio Ambiente, Ley del Mar (Ley 10, 1978): bases para el OT marino, Ley de Reforma Urbana (Ley 9, 1989), Decreto 1333, 1986 sobre OT urbano, Ley Ambiental (Ley 99, 1993), Ley Orgánica de Áreas Metropolitanas (Ley 128, 1994), Ley de Organización y Funcionamiento de los Municipios (Ley 136, 1994), Ley Orgánica del Plan de Desarrollo (Ley 152, 1994), Ley 388, 1997: marco conceptual e instrumental para formular y ejecutar planes municipales y distritales de Ordenamiento Territorial.
	‡ Costa Rica	Ley Orgánica Ambiental No. 7554, Decreto de Plan de Ordenamiento Ambiental Nacional, Ley de Uso y Conservación de Suelos.
	‡ Uruguay	Directrices de Ordenamiento Territorial y Desarrollo del Uruguay (1996).
	‡ Brasil	Artículo 30 de la Constitución Federal (1988), Ley 6.766 regulatoria del uso de suelo urbano.
	‡ Argentina	Decreto Ley 8912 sobre OT y uso del suelo de la Provincia de Buenos Aires

Fuentes: † Diario Oficial de la Federación. México (<http://dof.gob.mx/ley-reg.php>), ‡ Massiris-Cabeza, 2002.

Por otra parte, en Latinoamérica las políticas de uso del suelo y ordenamiento territorial son notablemente más recientes que en Europa (Cuadro 1). De acuerdo con este cuadro, la legislación en materia de uso del suelo y ordenamiento territorial se encuentra en constante formulación y perfeccionamiento. En este aspecto, México ha sido un país activo en la legislación ambiental de Latinoamérica, sin embargo, fue uno de los últimos países en instituir una ley ambiental integrada (LGEEPA, 1988), comparado con Colombia y Venezuela, por ejemplo, cuyas leyes equivalentes fueron instauradas en 1974 y 1976 respectivamente.

Para finalizar este breve análisis, es importante resaltar el modelo mexicano de legislación ambiental, el cual distribuye las competencias de la materia en los tres niveles de gobierno (nacional, estatal y municipal), lo que permite una forma de gestión ambiental más eficaz. Esta política ha quedado establecida en la LGEEPA, pero ha tenido mayor énfasis dentro de la Ley General de Cambio Climático (2012), la cual estipula que las acciones para la solución de problemas ambientales, así como la realización de inventarios y manejo de recursos naturales será competencia y obligación del nivel de organización territorial correspondiente.

Estudios de Cambio de Uso del Suelo

Debido a que el uso del suelo es una de las 13 variables climáticas esenciales definidas por el Sistema de Observación Climática Global (GCOS, por sus siglas en inglés), los estudios sobre cambio de uso del suelo y vegetación deben ser actualizados constantemente. La ausencia de tal expresión cartográfica en un estudio de cambio de uso del suelo, hace difícil visualizar la relación entre los procesos de cambio (causas, efectos, escenarios probables) y los fenómenos asociados, no solo ecológicos, sino económicos y sociales (Mas *et al.*, 2009).

Uno de los aspectos esenciales en el diseño cartográfico del análisis de cambio de uso del suelo es el tipo de insumo. Por un lado, se tienen las tradicionales fotografías aéreas (ortofotos). No obstante, el uso de las imágenes satelitales ha desplazado a las ortofotos por varias ventajas. Entre ellas, la capacidad de monitoreo terrestre, cuya característica permite que actualmente los estudios de deforestación y cambio de uso del suelo a partir de imágenes de satélite, puedan ser repetidos mucho más rápidamente que con el cotidiano y costoso método de fotointerpretación (NASA, 2010).

En México, la generación de información para el conocimiento y evaluación del uso del suelo y vegetación han avanzado conforme a las técnicas modernas mundiales (FAO, 2010). Los sensores Landsat han monitoreado la superficie terrestre las últimas cuatro décadas. En febrero del 2013 fue lanzado el sensor Landsat 8 con un mayor número de bandas espectrales, lo que representa una enorme ventaja en el procesamiento de imágenes porque es posible identificar distintos tipos de cobertura más específicamente. Por esta razón, las imágenes Landsat constituyen una fuente de datos confiable para la extracción de información valiosa. Los Cuadros 4 y 5 muestran la popularidad del uso de escenas Landsat.

Un segundo criterio fundamental es la escala cartográfica, cuya selección está basada principalmente en el nivel de resolución espacial de las imágenes. Por lo tanto, cada escala de trabajo tiene una aplicación específica porque responde a la necesidad de representar una situación particular (Colditz *et al.*, 2012). La escala 1:100 000 es útil para el manejo de cuencas hidrológicas, zonificación de riesgos y detección de

la expansión urbana o agrícola (Tarantino *et al.*, 2007; Oñate-Valdiviesco y Bosque-Sendra, 2010; Salvati *et al.*, 2012).

Paralelo a la definición de la escala, es necesario adecuar una nomenclatura temática acorde al objeto de estudio. Cada uno de los diferentes sistemas de clasificación de cobertura, internacionales como el de la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO, por sus siglas en inglés) y nacionales como los del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) o el utilizado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para el Inventario Nacional Forestal (INF), responden a necesidades y escalas específicas de representación. Sin embargo, las experiencias de los estudios de evaluación del cambio de cobertura (Cuadro 5) han hecho necesario establecer sistemas comparables y adaptables para una amplia variedad de propósitos, ya que con frecuencia se confunden y generan errores como la sobre-evaluación en las estimaciones de determinados tipos de cobertura (Mas *et al.*, 2009). El Cuadro 4 muestra la inquietud en conocer cómo afectan distintos factores de las técnicas

Cuadro 4. Estudios científicos que evalúan técnicas o parámetros de percepción remota en el análisis de uso del suelo y cobertura vegetal.

Evaluación de técnicas de percepción remota				
Objetivo	Tipo de imagen (resolución espacial)	Periodo de estudio	No. clases extraídas	Autor
Comparar el rendimiento de dos técnicas de mejora de cambio y dos técnicas de clasificación para la identificación de cambios en la cubierta vegetal de California.	Landsat TM (30 m)	1990-1996	5	Rogan <i>et al.</i> , 2002
Determinar la magnitud del error y precisión del monitoreo de los cambios de uso de suelo, debido a la frecuencia de adquisición de imágenes.	Landsat TM (30 m)	1987-2000 (5 series)	6	Lunetta <i>et al.</i> , 2004
Evaluar la efectividad de 4 métodos de detección de cambios de uso de suelo en el este del Mediterráneo, Turquía.	Landsat TM (30 m)	1985-2005 (2 series)	12	Berberoglu y Akin, 2009
Comparar tres algoritmos de clasificación de imágenes Landsat para estudios de uso del suelo en EEUU.	Landsat TM y ETM+ (30 m)	2002-2010	5	Srivastava <i>et al.</i> , 2012
Mejorar la comprensión de cómo el cambio de políticas forestales afecta la gestión local de los bienes comunes en 4 comunidades de Michoacán, México.	Landsat TM y ETM+ (30 m), Ortofotos	1990-2006	5	Barsimantov y Antezana, 2012
Presentar la metodología para elaborar la cartografía de cobertura terrestre del año 2005 de México así como un análisis espacial.	MODIS (250 m), Google Earth	2005	19	Colditz <i>et al.</i> , 2012
Evaluar dos algoritmos de clasificación de imágenes y analizar los cambios de uso de suelo en el Delta del Nilo.	Landsat TM y ETM+ (30 m)	1984-2005	5	Elhag <i>et al.</i> , 2013
Presentar la metodología para desarrollar una serie anual de cobertura del suelo en Canadá.	MODIS (250 m)	2000-2011	25	Pouliot <i>et al.</i> , 2014

Cuadro 5. Estudios científicos que aplican técnicas de percepción remota para el análisis de uso del suelo y cobertura vegetal.

Aplicación las técnicas de percepción remota				
Objetivo	Tipo de imagen (resolución espacial)	Periodo de estudio	No. clases extraídas	Autor
Describir el desarrollo de una base de datos multitemporal de cubierta vegetal adecuada para el análisis de motores de cambio de uso de suelo (urbanos y rurales) en Chihuahua, México.	Landsat MSS (30 m), Cartografía de USV del INEGI	1986-1992	15	Currit, 2005
Analizar la asociación de la migración y los cambios de uso de suelo a nivel de cuenca en Michoacán, México.	Ortofotos (1:50,000 y 1:37,000)	1975-2000	12	López <i>et al.</i> , 2006
Explorar las tendencias a corto plazo de los procesos que determinan el cambio de uso del suelo en la Sierra Norte de Oaxaca, México.	Landsat ETM+ (30m), Mapas de USV del INEGI	1980-2000	15	Gómez-Mendoza <i>et al.</i> , 2006
Generar mapas de cambio de uso del suelo para apoyar los estudios de prevención de deslizamientos en Caramanico, Italia.	Landsat TM (30 m)	1987-2000	4	Tarantino <i>et al.</i> , 2007
Cuantificar la biomasa aérea de bosque en tres estados de EE UU y determinar los efectos de la resolución espacial en las estimaciones.	Modis (250 m) y AVHRR (1 km)	1992-2001	17	Zheng <i>et al.</i> , 2008
Analizar el impacto del cambio de uso del suelo en términos de prestación de servicios ecosistémicos en el Golfo de México.	Landsat (30 m)	1973-1989	10	Martínez <i>et al.</i> , 2009
Analizar la dinámica del cambio de uso del suelo en Hangzhou, China.	SPOT (10 m), Landsat ETM+ (30 m)	2001-2003	10	Jin-Song <i>et al.</i> , 2009
Calcular los cambios en el uso del suelo en México mediante la integración de mapas y datos de las reservas de carbono derivados de los inventarios forestales y de suelo.	Cartografía USV del INEGI	1993-2002	18	de Jong <i>et al.</i> , 2010
Generar un escenario de uso del suelo en una cuenca hidrográfica de América del Sur.	Landsat TM (30 m)	1986-2001 (2 series)	4	Oñate-Valdivieso y Bosque, 2010
Analizar el efecto del cambio de uso de suelo en la temperatura de la superficie terrestre en Beijing, China.	Landsat TM y ETM+ (30m)	1995-2000	6	Jiang y Tian, 2010
Estudiar los cambios de cobertura terrestre en los últimos 50-70 años en Zanzibar Tanzania	Ortofotos (1:14,000, 1:20,000, 1:25,000)	1930-2004 (5 series)	9	Käyhkö <i>et al.</i> , 2011
Evaluar el crecimiento de población y el cambio de uso de suelo en Delhi, India.	ASTER (15 m)	1972-2003	8	Rahman <i>et al.</i> , 2012
Calcular el valor de los cambios de uso del suelo en términos de servicios ambientales en tres localidades costeras de Veracruz.	Ortofotos 1:75,000 (0.8 m)	1995-2006	5,6 y 8	Mendoza-González <i>et al.</i> , 2012
Evaluar la asociación entre el régimen de tenencia de la tierra y los cambios en la cubierta boscosa a nivel municipal en la República Mexicana.	MODIS (250 m), Google Earth	2001-2010	8	Bonilla-Moheno <i>et al.</i> , 2013
Evaluar los cambios en la cobertura de la tierra en España mediante el análisis de series de tiempo de imágenes satelitales para distinguir el uso del suelo de origen humano de los cambios impulsados por el cambio climático.	AVHRR (1 km ²), MODIS (250 m), Mapas CORINE Land Cover España	1989-2006	16	Stellmes <i>et al.</i> , 2013

del procesamiento de imágenes en la efectividad de los métodos de percepción remota y los resultados cartográficos.

La información presentada en los Cuadros 4 y 5, representa el panorama general del alcance de los estudios del cambio de uso del suelo y cobertura vegetal no solo en México, sino en varias partes del mundo y con distintos fines. Por lo tanto, es claro que el análisis del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal es una variable indispensable para la toma de decisiones referentes a distintos aspectos ambientales en cualquier nivel territorial.

Criterios Técnicos para la Cartografía de Uso del Suelo y Vegetación con Fines de Planificación Territorial

El desarrollo de una región demanda la clasificación de su territorio como uno de los primeros pasos para la delimitación de unidades de cobertura y uso del suelo. Esta labor es indispensable para el establecimiento de modelos de ordenamiento territorial y para la planeación de múltiples actividades sociales y económicas. En nuestro país, la centralización del poder en el gobierno federal ha generado que la regulación de los cambios de uso del suelo dependa de la legislación nacional. Por ello, la elaboración de normatividad a nivel estatal o municipal en éste ámbito se ha visto muy limitada. En este contexto, es necesario comenzar a generar normas técnicas que establezcan los criterios básicos que permitan la construcción de una base de datos históricos sobre uso del suelo y vegetación a distintos niveles de organización, que se caracterice por ser adaptable y comparable. No obstante, la elaboración de cartografía

de uso del suelo y cobertura vegetal es difícil debido a la extensión del territorio, la topografía, la gran diversidad vegetal, la dinámica de los paisajes, entre otros. Esta es una de las razones por las que en amplias extensiones del territorio (un estado por ejemplo) resulta difícil poder contar con insumos de la resolución espacial adecuada. Es decir, a una escala muy pequeña se perdería la enorme cantidad de procesos locales sobre la dinámica de uso del suelo, mientras que a una escala muy grande resultaría muy costoso mantener la base de datos actualizada. Un factor más que incide es la selección de categorías de la nomenclatura temática, ya que es un proceso que aún no ha sido estandarizado. Para abordar este aspecto, es importante señalar que existen procedimientos cartográficos del Sistema Nacional de Información Geográfica (SNIG) a través del INEGI, para la generación de cartografía temática pero solo se disponen para las escalas de 1:250 000 y 1:50 000. Sin embargo, el cubrimiento nacional para la segunda escala no está completo ni actualizado en México.

De esta manera, surgió el propósito de plantear algunos criterios técnicos que permitan construir un procedimiento eficaz que facilite la obtención de resultados satisfactorios y comparables entre los diversos productos cartográficos de uso del suelo y vegetación (Cuadro 6). Cabe señalar, que los insumos propuestos constituyen información actualizada y gratuita en México. Es por ello que la ventaja de utilizar este tipo de información satelital radica en su facilidad de adquisición.

No cabe duda que este tipo de propuestas representa un reto ambicioso de implementar, no obstante, el mismo SNIG de nuestro país, se está involucrando en

Cuadro 6. Criterios técnicos básicos para el diseño cartográfico de los estudios de uso del suelo con fines de planeación territorial en 3 niveles de organización.

Criterio	Nivel		
	Nacional	Estatal/Regional	Municipal
Escala cartográfica	1:250,000 o menor	1:100,000	1: 25,000 o mayor
Tipo de insumo	Landsat, MODIS, Google Earth	Landsat, Google Earth	SPOT, Aster, Google Earth
Unidad mínima cartografiable	1 km ²	0.16 km ²	0.01 km ²
Nomenclatura de clases	Primer nivel	Segundo nivel (1 subdivisión)	Tercer nivel (2 subdivisiones)
Nivel de nomenclatura	Formación vegetal	Formación vegetal + Tipo de vegetación	Formación vegetal +Tipo de vegetación + Comunidad

el manejo de nuevas técnicas de producción y edición de la cartografía que satisfagan la amplia gama de necesidades en cuestión de recursos naturales.

CONCLUSIONES

- La gran variedad de aplicaciones a las evaluaciones de la tasa de cambio en la cobertura terrestre ha sido constante en las últimas tres décadas, sin embargo, los estudios de este tipo con fines de planeación territorial son escasos. Esta revisión científica y normativa permitió conocer la necesidad de visualizar escenarios basados no solo en las tendencias de cambio sino también en objetivos políticos específicos, es decir, es necesaria la aplicación de criterios técnicos unificados en el diseño cartográfico de los estudios de uso de suelo. Esto representaría una enorme ventaja ya que sería posible comparar resultados entre distintos estudios con fines semejantes.

- En conclusión, vincular la política ambiental con los aspectos técnicos es tarea difícil en el actual mundo globalizado. No obstante, es digno de reconocer los progresos de la normatividad ambiental no solo en México sino en toda América Latina. Además, la creciente y mejorada base de datos satelital de Landsat, por ejemplo, representa una gran ventaja para este tipo de estudios al momento de extraer la información. Es por ello que se recomienda continuar incorporando nuevas ideas y aportaciones que vinculen los instrumentos políticos con los reglamentos técnicos para que la legislación ambiental garantice su efectividad y de esta manera, la información generada de certidumbre a las acciones de desarrollo del gobierno a través de bases de datos con alta capacidad de adaptación.

LITERATURA CITADA

- Barsinmantov, J. and J. N. Antezana. 2012. Forest cover change and land tenure change in Mexico's avocado region: Is community forestry related to reduced deforestation for high value crops? *Appl. Geogr.* 32: 844-853.
- Berberoglu, S. and A. Akin. 2009. Assessing different remote sensing techniques to detect land use/cover changes in the eastern Mediterranean. *Int. J. Appl. Earth Observat. Geoinformat.* 11: 46-53.
- Bonilla-Moheno, M., D. J. Redo, T. M. Aide, M. L. Clark, and H. R. Grau. 2013. Vegetation change and land tenure in Mexico: A country-wide analysis. *Land Use Policy* 30: 355-364.
- CEC (Commission for Environmental Cooperation). 1999. Disponible en: (<http://www.cec.org/lawdatabase>). (Consulta: mayo 5, 2014).
- Colditz, R. R., G. López Saldaña, P. Maeda, J. Argumedo Espinoza, C. Meneses Tovar, A. Victoria Hernández, C. Zermeño Benítez, I. Cruz López, and R. Ressler. 2012. Generation and analysis of the 2005 land cover map for Mexico using 250 m MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 123: 541-552.
- Currit, N. 2005. Development of a remotely sensed, historical land-cover change database for rural Chihuahua, Mexico. *Int. J. Appl. Earth Observat. Geoinformat.* 7: 232-247.
- de Chazal, J. and M. Rounsevell. 2009. Land-use and climate change within assessments of biodiversity change: A review. *Global Environ. Change* 19: 306-315.
- de Jong, B., C. Anaya, O. Masera, M. Olguín, F. Paz, J. Etchevers, R. D. Martínez, G. Guerrero, and C. Balbontín. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *For. Ecol. Manage.* 260: 1689-1701.
- Diario Oficial de la Federación. 2014. Disponible en (<http://dof.gob.mx/ley-reg.php>). (Consulta: abril 30, 2014).
- EEA (European Environment Agency). 1994. CORINE Land Cover. Copenhagen K, Denmark.
- Elhag, M., A. Psilovikos, and M. Sakellariou-Makrantonaki. 2013. Land use changes and its impacts on water resources in Nile Delta region using remote sensing techniques. *Environ. Dev. Sustain.* 15: 1189-1204.
- EC (European Commission). 2014. European Union law, legislation. Disponible en (http://europa.eu/eu-law/legislation/index_es.htm). (Consulta: mayo 10, 2014).
- Fallas, J. (2002). Normas y estándares para datos geoespaciales. Laboratorios de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Escuela de Ciencias Ambientales y Programas Regional en Manejo de Vida Silvestre. Universidad Nacional Heredia, Costa Rica. Disponible en <http://www.una.ac.cr/ambi/telesig>. (Consulta: abril 30, 2014).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales: Informe Nacional México. Roma.
- Gómez-Mendoza, L., E. Vega-Peña, M. I. Ramírez, J. L. Palacio-Prieto, and L. Galicia. 2006. Projecting land-use change processes in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico. *Appl. Geogr.* 26: 276-290.
- Jiang, J. and G. Tian. 2010. Analysis of the impact of land use/land cover change on land surface temperature with remote sensing. *Proc. Environ. Sci.* 2: 571-575.
- Käyhkö, N., N. Fagerholm, B. S. Asseid, and A. J. Mzee. 2011. Dynamic land use and land cover changes and their effect on forest resources in a coastal village of Matemwe, Zanzibar, Tanzania. *Land Use Policy* 28: 26-37.
- Ley General de Asentamientos Humanos. 1993. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión Secretaría General. Secretaría de Servicios Parlamentarios. México. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/133.pdf>. (Consulta: abril 30, 2014).
- Ley General de Cambio Climático. 2012. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión Secretaría General. Secretaría de Servicios Parlamentarios. México. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>. (Consulta: abril 30, 2014).
- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. 2003. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión Secretaría General. Secretaría de Servicios Parlamentarios. México. Disponible

- en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/259.pdf>. (Consulta: abril 30, 2014).
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. 1988. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión Secretaría General. Secretaría de Servicios Parlamentarios. México. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>. (Consulta: abril 30, 2014).
- López, E., G. Bocco, M. Mendoza, A. Velázquez, and J. R. Aguirre-Rivera. 2006. Peasant emigration and land-use change at the watershed level: A GIS-based approach in central México. *Agric. Syst.* 90: 62-78.
- Lunetta, R. S., D. M. Johnson, J. G. Lyon, and J. Croswell. 2004. Impacts of imagery temporal frequency on land-cover change detection monitoring. *Remote Sens. Environ.* 89: 444-454.
- Martínez, M. L., O. Pérez-Maqueo, G. Vázquez, G. Castillo-Campos, J. García-Franco, K. Mehltreter, M. Equihua, and R. Landgrave. 2009. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *For. Ecol. Manage.* 258: 1856-1863.
- Mas, J. F., A. Velázquez y S. Couturier. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Invest. Amb.* 1: 23-39.
- Massiris-Cabeza, A. 2002. Ordenación del territorio en América Latina. *Scripta Nova. Rev. Elect. Geogr. Cienc. Soc.* 6. ISSN: 1138-9788.
- Mendoza-González, G., M. L. Martínez, D. Lithgow, O. Pérez-Maqueo, and P. Simonin. 2012. Land use change and its effects on the value of ecosystem services along the coast of the Gulf of Mexico. *Ecol. Econom.* 82: 23-32.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2010. Landsat's critical role in urban planning: Hot times in the city. pp. 109-112. *In*: R. K. McHale (ed.). *Landsat and its valuable role in satellite imagery of earth*. Nova. New York, NY, USA.
- Oñate-Valdiviesco, F. and J. Bosque Sendra. 2010. Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. *J. Hydrol.* 395: 256-263.
- Pouliot, D., R. Latifovic, N. Zabic, L. Guindon, and I. Olthof. 2014. Development and assessment of a 250 m spatial resolution MODIS annual land cover time series (2000–2011) for the forest region of Canada derived from change-based updating. *Remote Sens. Environ.* 140: 731-743.
- Rahman, A., S. Kumar, S. Fazal, and M. A. Siddiqui. 2012. Assessment of land use/land cover change in the north-west district of delhi using remote sensing and GIS techniques. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 40: 689-697.
- Rogan, J., J. Franklin, and D. A. Roberts. 2002. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using thematic mapper imagery. *Remote Sens. Environ.* 80: 143-156.
- Salas-Bourgoin, M., F. Delgado-Espinoza, Y. Esteva y M. Sampson-Sandia. 2008. La ordenación del territorio y la vocación de uso agrícola de la tierra en Venezuela. *Rev. Geogr. Venez.* 49: 267-288.
- Salvati, L., M. Munafo, V. Gargiulo Morelli, and A. Sabbi. 2012. Low-density settlements and land use changes in a Mediterranean urban region. *Landscape Urban Plan.* 105: 43-52.
- Srivastava, P. K., D. Han, M. A. Rico-Ramírez, M. Bray, and T. Islam. 2012. Selection of classification techniques for land use/land cover change investigation. *Adv. Space Res.* 50: 1250-1265.
- Stellmes, M., A. Röder, T. Udelhoven, and J. Hill. 2013. Mapping syndromes of land change in Spain with remote sensing time series, demographic and climatic data. *Land Use Policy* 30: 685-702.
- Tarantino, C., P. Blonda, and G. Pasquariello. 2007. Remote sensed data for automatic detection of land-use changes due to human activity in support to landslide studies. *Nat. Hazards* 41: 245-267.
- Zheng, D., L. S. Heat, and M. J. Ducey. 2008. Satellite detection of land-use change and effects on regional forest aboveground biomass estimates. *Environ. Monit. Assess.* 144: 67-79.

Eficiencia agronómica, rendimiento y rentabilidad de genotipos de maíz en función del nitrógeno

Agronomic efficiency, grain yield and profitability of maize genotypes in function of nitrogen

Cid Aguilar Carpio^{1‡}, José Alberto Salvador Escalante Estrada¹, Immer Aguilar Mariscal⁴, José Apolinar Mejía Contreras², Víctor Florentino Conde Martínez¹ y Antonio Trinidad Santos³

¹ Programa de Botánica, ² Programa de Genética, ³ Programa de Edafología del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

[‡] Autor responsable (aguilar.cid@colpos.mx)

⁴ Facultad de Biología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad No. 1001 Col. Chamilpa. 62209 Cuernavaca, Morelos, México.

RESUMEN

En el cultivo de maíz, la fertilización nitrogenada es una alta inversión que posiblemente incrementa el rendimiento. Sin embargo, es imprescindible ser eficiente en el uso del agua y nitrógeno (N), para la producción. El nitrógeno mejora la composición de proteínas en el grano, pero de forma excesiva es perjudicial a la salud humana. El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto del nitrógeno en genotipos de maíz sobre: a) la ocurrencia de las fases fenológicas; b) producción de materia seca y rendimiento; c) eficiencia en el uso del agua y nitrógeno; d) contenido de nitrógeno y proteína en el grano; y e) rentabilidad en maíz. La siembra de los genotipos Michoacán-21, HS-2 y Promesa con 0, 80 y 160 kg N ha⁻¹, se realizó en Montecillo, Estado de México en junio de 2011. Se registró, la ocurrencia de las fases fenológicas y madurez fisiológica del maíz, la materia seca (MS), rendimiento de grano (RG), contenido de nitrógeno y proteína en el grano, eficiencia en el uso de agua y nitrógeno (EUA y EAN) y rentabilidad económica. Se observaron diferencias entre genotipos en la ocurrencia de las fases fenológicas. La respuesta al nitrógeno entre genotipos fue variable. El mayor MS y RG fue en el genotipo Promesa con 80 kg N ha⁻¹ y 160 kg N ha⁻¹ respectivamente. La EUA y EAN más alta, se obtuvo en Promesa con 80 kg N ha⁻¹. El contenido de nitrógeno y proteína más alto fue en el grano de maíz de HS-2 con 160 kg N ha⁻¹. El mayor ingreso neto (\$12 685.90) se logró con Promesa y 80 kg N ha⁻¹.

Palabras clave: fertilización; grano; urea.

SUMMARY

To increase maize yields, high investments in nitrogen fertilization are needed. Therefore, it is imperative to be efficient in the use of water and nitrogen (N) during production. Nitrogen improves the composition of proteins in grain, but in excess it is harmful to human health. The objective of the study was to determine the effect of nitrogen in genotypes of maize on a) occurrence of phenological phases, (b) dry matter production and yield, (c) water and nitrogen use efficiency, (d) nitrogen content and protein in grain, and e) profitability. The genotypes Michoacán-21, HS-2 and Promesa with 0, 80, and 160 kg N ha⁻¹ were planted in Montecillo, State of Mexico, in June 2011. The phenological phases, dry matter (DM), grain yield (GY), nitrogen content, protein, water and nitrogen use efficiency (WUE and NUE) as well as economic profitability at physiological maturity were recorded. Differences among genotypes in phenological phases were observed. The response to nitrogen among genotypes was variable. The highest DM was achieved with Promesa and 80 kg N ha⁻¹. The highest GY was obtained with Promesa with 160 kg N ha⁻¹. The highest WUE and NUE were achieved in Promesa with 80 kg N ha⁻¹. The highest content of nitrogen and protein was found in HS-2 with 160 kg N ha⁻¹. The highest net income (\$12 685.90) was achieved with Promesa and 80 kg N ha⁻¹.

Index words: fertilization; grain; urea.

Como citar este artículo:

Aguilar Carpio, C., J. A. Salvador Escalante Estrada, I. Aguilar Mariscal, J. A. Mejía Contreras, V. F. Conde Martínez y A. Trinidad Santos. 2016. Eficiencia agronómica, rendimiento y rentabilidad de genotipos de maíz en función del nitrógeno. *Terra Latinoamericana* 34: 419-429.

Recibido: abril de 2015. Aceptado: junio de 2016.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 419-429.

INTRODUCCIÓN

En México, el maíz es el cultivo más importante desde el punto de vista alimenticio, industrial, político y social. El consumo *per cápita* de maíz es de 330 g d⁻¹ (Reynoso *et al.*, 2014), con un contenido de proteína que puede oscilar entre 8 y 11% del peso del grano, que en su mayor parte se encuentran en el endospermo (Benítez y Pfeiffer, 2006). Se desarrolla en diferentes zonas edafoclimáticas, además de formar parte de los usos y costumbres de diversas regiones étnicas. Los principales estados productores de maíz en México son: Sinaloa, Jalisco, Michoacán, Edo. de México y Chiapas. El Estado de México ocupa el cuarto lugar, con una producción de 1 575 300 toneladas, donde el 84% (467 578 ha) de la superficie sembrada es bajo condiciones de lluvia estacional (LLE), la precipitación media del estado es de 558 mm con rendimiento promedio de 2.97 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2011). Los agricultores de riego prefieren el uso de semillas híbridas, por su alto potencial de producción y sus características agronómicas favorables como tolerancia a enfermedades, resistencia al acame y ciclo vegetativo corto (Espinosa *et al.*, 2003), y los de LLE prefieren los nativos que seleccionan ciclo tras ciclo. Por lo cual, se deben explorar las variedades que conviene sembrar en cada agrosistema y el manejo más apropiado para una mayor producción. En la agricultura es imprescindible ser eficiente en el uso del agua (EUA) y nitrógeno (N), ya que estos son los insumos más importantes para la producción, deben estar bien provistos en cantidad y oportunidad para asegurar un estado fisiológico óptimo al momento de la floración, que es cuando se determina el rendimiento (Andrade *et al.*, 2002). La EUA se incrementa con la aplicación de nitrógeno. En un estudio realizado por Faraldo *et al.* (2011) en tres híbridos de maíz se obtuvo una EUA de 0.89 en el 2009 y para el 2010 se incrementó a 2.28 g m⁻² mm⁻¹. El nitrógeno en las plantas estimula el crecimiento de las raíces, permitiendo que el cultivo aproveche la humedad del subsuelo y a su vez el crecimiento del dosel vegetal (Morales y Escalante, 2007), que cubre el suelo, con el cual se reduce la evaporación (Parker, 2000). La fertilización nitrogenada es determinante para incrementar el rendimiento de maíz (Borrás, 2001). Sin embargo, representa una inversión de alto costo y riesgo ambiental. Al respecto, Turrent-Fernández *et al.* (2004) al realizar un análisis económico en maíces de Chiapas, Guerrero y Quintana Roo, con 0, 80 y 160 kg N ha⁻¹

observó que a medida que se incrementan los insumos, aumenta el costo de producción y disminuye el ingreso neto. La incorporación de nitrógeno en el suelo es muy importante, debido a que la mayoría de los suelos agrícolas presentan niveles bajos de este nutrimento (p. ej.: 3.46 ppm, para Montecillo, Estado de México, Cruz-Flores *et al.*, 2002). Al respecto, Pecina *et al.* (2011), al evaluar cuatro variedades de maíz de los Valles Altos en Texcoco, Edo de México, con una fertilización de 120 kg N ha⁻¹, encontró diferentes respuestas genotípicas en el rendimiento de grano (RG), desde 5.5 hasta 8.5 Mg ha⁻¹. Antuna *et al.* (2003) evaluó seis líneas endogámicas de maíz en los estados de Durango y Coahuila, los cuales presentaron variabilidad desde 1.94 hasta 5.04 Mg ha⁻¹ en el RG. Domínguez *et al.* (2001) reportó incrementos en el rendimiento del maíz de 1770, 2250 y 1200 kg ha⁻¹, con aplicación de 60, 120 y 180 kg N ha⁻¹, con respecto al testigo (sin N aplicado). Por otra parte, la aplicación de nitrógeno puede aumentar el RG, pero también elevar el contenido de proteínas y aminoácidos en los productos agrícolas (Yu-kui *et al.*, 2009). La composición química del grano, está definida por el factor genético, pero también depende de las prácticas de cultivo, condiciones climáticas y tipo de suelo (Agama-Acevedo *et al.*, 2011). Por ejemplo, Agama-Acevedo *et al.* (2011), en cuatro maíces de la raza Chalqueño en el Edo. de México, encontraron diferencias significativas en el contenido de proteína y nitrógeno, en el grano. Las proteínas, del grano de maíz han sido estudiadas ampliamente, su función es servir como fuente de nitrógeno para el germinado de la semilla (Benítez y Pfeiffer, 2006), pero el excesivo e inapropiado uso de la fertilización nitrogenada, puede causar una alta acumulación de este insumo en el grano, lo cual puede ser perjudicial a la salud humana, además de contaminar el ambiente y generar pérdidas económicas (Stagnari *et al.*, 2007). Álvarez *et al.* (2003) mencionan, que cuando se incrementa el nitrógeno existe un máximo a partir del cual no se observa respuesta en el rendimiento del grano.

La respuesta sobre el rendimiento, contenido de N y proteína en el grano de maíz a la fertilización nitrogenada puede variar en función del genotipo, nivel inicial de N en el suelo y el ambiente de desarrollo (López *et al.*, 2007). Los reportes sobre el tema en clima templado no son abundantes. Por lo que, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto del nitrógeno en tres genotipos de maíz sobre: a) la ocurrencia de

las fases fenológicas; b) la producción de materia seca, rendimiento y sus componentes; c) eficiencia en el uso del agua y nitrógeno; d) el contenido de nitrógeno y proteína en el grano, y e) la rentabilidad de la siembra del maíz bajo régimen de lluvia estacional.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló bajo un régimen de lluvia estacional en Montecillo, Estado de México, con clima templado (BS₁) (García, 2005), con lluvias en verano (precipitación anual de 558 mm) y altitud de 2240 m. Los tratamientos consistieron en sembrar el 01 de junio de 2011 el maíz nativo Michoacán 21, una variedad sintética HS-2 y el híbrido Promesa con tres niveles de fertilización nitrogenada 0, 80 y 160 kg ha⁻¹. La densidad de población fue de 6.25 pl m⁻² y una distancia entre surcos de 80 cm. El diseño experimental fue bloques completamente al azar con arreglo de parcelas divididas y cuatro repeticiones.

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + \beta_k + \epsilon_i \beta_k + B_j + (AB)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (1)$$

donde: Y_{ijk} , es la variable respuesta del i -ésimo nivel A (genotipo), en el i -ésimo nivel B (nivel de nitrógeno) en el j -ésimo bloque. μ , es la media general verdadera. A_i , es el efecto del i -ésimo genotipo. β_k , es el efecto del k -ésimo repetición. $\epsilon_i \beta_k$ es el error del genotipo B_j , es el efecto del j -ésimo nivel de nitrógeno. $(AB)_{ij}$, es el efecto de la interacción del i -ésimo genotipo, en la j -ésimo nivel de nitrógeno. ϵ_{ijk} , es el error experimental.

La unidad experimental fue de cuatro surcos de 0.8 m de ancho \times 4 m de longitud. Los resultados indican que fue un suelo de textura franco arcillo arenosa, densidad aparente de 1.22 g cm⁻³, pH 8.2, conductividad eléctrica 0.41 dS m⁻¹, materia orgánica de 1.70% y nitrógeno total de 3.46 ppm. Durante el desarrollo del estudio se registró la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) y mínima ($T_{\text{mín}}$) decenal y la suma de la evaporación (E_v , mm) y precipitación (PP , mm), datos proporcionados por la estación Agrometeorológica del Colegio de postgraduados. También se registró la ocurrencia de las fases fenológicas como: días a emergencia (E), floración (FL) y a madurez fisiológica (MF). El criterio utilizado para el registro fue presentado en Ritchie y Hanway (1982). Además, para cada fase fenológica se determinó la acumulación de unidades calor para

el cultivo (UC, °C d), mediante el método residual, el cual es descrito por la Ecuación 2 (Snyder, 1985):

$$UC = (T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}} / 2) - TB \quad (2)$$

donde: UC = unidades calor (°C d), $T_{\text{máx}}$ = temperatura máxima diaria (°C), $T_{\text{mín}}$ = temperatura mínima diaria (°C) y TB = temperatura base, considerada como 7 °C (García y López, 2002). La evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) se calculó a partir de los datos de la evaporación (E_v) del tanque tipo "A", utilizando 0.6 como coeficiente para el evaporímetro, kc inicial = 0.35, kc a mediados del periodo = 1.14 y kc final = 0.6 (Doorenbos y Pruitt, 1986), a partir de la Ecuación 3:

$$E_{Tc} = E_v \times 0.6 \times K_c \quad (3)$$

A la MF se evaluó la biomasa con base en materia seca total (MS total, g m⁻²), índice de cosecha (IC, %), rendimiento de grano (RG, 10% de humedad, g m⁻²), peso de 100 granos (P100G, g), número de granos (NG, m²), número de hileras (NH) y número de granos por hilera (NGH). Se calculó la eficiencia en el uso del agua del RG (EUARG, g m⁻² mm⁻¹) y MS (EUAMS, g m⁻² mm⁻¹) con la ecuación, $EUA = RG$ o MS (g m⁻²) / E_{Tc} (mm) ocurrida durante el ciclo del cultivo (Escalante, 1995) y la eficiencia agronómica del N (EAN, g g⁻¹ de N aplicado), considerado como el incremento en el rendimiento por unidad de fertilizante aplicado, se calculó a través de la siguiente ecuación: $EAN = RGN - RGSN / NA$. Donde: RGN = rendimiento de grano con nitrógeno (g m⁻²), RGSN = rendimiento de grano sin nitrógeno (g m⁻²) y NA = cantidad de nitrógeno aplicado (g m⁻²) (Fageria y Baligar, 2005).

Adicionalmente, posterior a la cosecha de grano, se determinó el contenido de nitrógeno total en las semillas de maíz, mediante el método de semi micro Kjeldahl, modificado para incluir nitratos (Chapman y Pratt, 1979). Se analizaron 454 muestras de material vegetal (10 g por muestra, grano).

A los datos del rendimiento y sus componentes, así como a la eficiencia en el uso del agua y nitrógeno, contenido de nitrógeno y proteína, se les aplicó un análisis de varianza (ANDEVA), con el programa estadístico de SAS (Statistical Analysis System, Versión 9.0), la prueba de comparación de medias Tukey ($\alpha = 0.05$).

Adicionalmente, se realizó un análisis económico para rendimiento, utilizando las siguientes Ecuaciones 4 y 5:

$$IN = YPy - (\Sigma XiPi + CF) \quad (4)$$

donde: IN = ingreso neto, Y = rendimiento (kg ha⁻¹), Py = precio por kg, $\Sigma XiPi$ = suma de costos variables, CF = costos fijos (Volke, 1982).

También se determinó la GPI con la relación:

$$GPI = (\Sigma XiPi + CF) / YPy \quad (5)$$

donde: GPI = ganancia por peso invertido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fenología, Condiciones Climáticas, Unidades Calor y Evapotranspiración

La media decenal de la T_{máx} y T_{mín} durante el desarrollo del cultivo fluctuó entre 31 y 21 °C, y entre 13 y 8 °C, respectivamente. Durante la etapa de siembra (S) a FL, la T_{máx} y T_{mín} promedio fue de 31 y 8 °C y de FL a MF fue de 25 y 8 °C, respectivamente (Figura 1). Dichos valores se encuentran dentro del umbral térmico en promedio de 18 a 22 °C apropiado para cultivares de maíz adaptados a los valles altos de México (Pecina *et al.*, 2011), lo cual indica que en

los genotipos estudiados la temperatura no fue limitante para una mayor expresión del rendimiento. La suma de la PP durante el ciclo del cultivo fue de 504 mm. Valor ligeramente inferior al señalado por Rivetti (2006) quien menciona que las necesidades de agua para el ciclo del maíz son de 575 mm aproximadamente. La mayor PP (374 mm) ocurrió en la etapa de S a FL de los genotipos, en los meses de junio y julio. Sin embargo, de FL a MF la PP fue más baja (129 mm). Esto limitó una mayor expresión del RG (Faraldo *et al.*, 2011).

Los genotipos en estudio, presentaron diferencias en las fechas a ocurrencia de las etapas fenológicas, con excepción de la emergencia donde fue similar (6 dds) con un requerimiento de calor de 69 °C d. En contraste, la floración de Michoacán-21 ocurrió a los 84 dds con UC de 866 °C d, en HS-2 a los 92 dds con UC de 953 °C d y en Promesa a los 90 dds con UC de 1003 °C d. La MF en Michoacán-21 fue a los 140 dds (1452 °C d), en HS-2 y en Promesa a los 146 dds con UC de 1490 °C d (Figura 1). En referencia, Díaz-López *et al.* (2013) reportaron en el ciclo del cultivo de maíz, requerimiento térmico de 1158 UC, valor inferior al encontrado en el presente estudio.

La acumulación de UC y la Etc durante el ciclo del cultivo, mostró una relación lineal con el tiempo que respondió al modelo $y = a + bx$. En cuanto a la Etc, del periodo de S a E fue de 12 mm, para todos los genotipos. De S a FL fue de 218, 241 y 231 mm para Michoacán-21, HS-2 y Promesa, respectivamente.

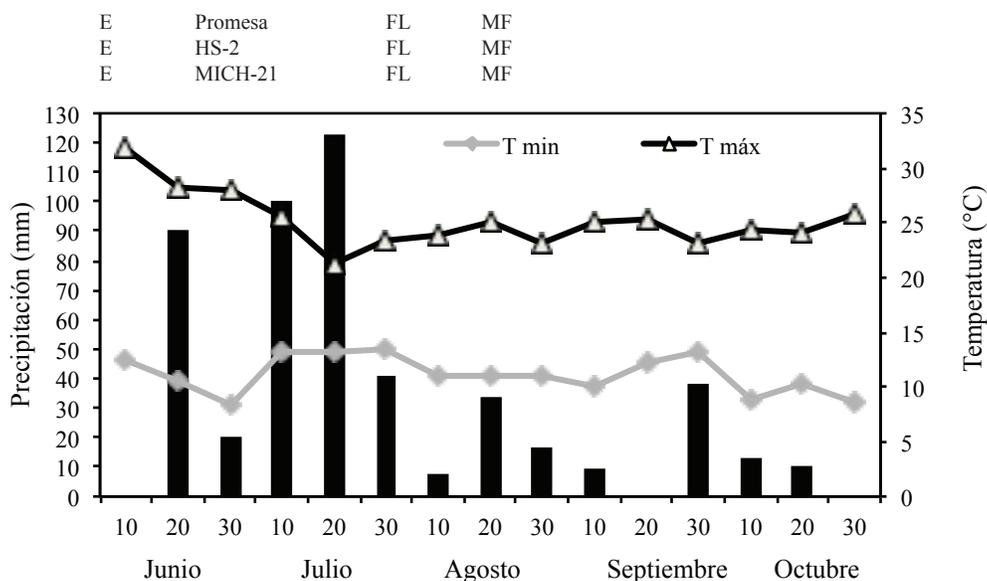


Figura 1. Medias decenales de la temperatura máxima (T_{máx}, °C), mínima (T_{mín}, °C) y suma decenal de la precipitación, durante el ciclo del cultivo de los maíces Michoacán-21, HS-2 y Promesa. E = emergencia; FL = floración; MF = madurez fisiológica. Montecillo, Estado de México, 2011.

De FL a MF fue de, 179, 171 y 181 mm para Michoacán-21, HS-2 y Promesa, respectivamente. La ETc total fue de 397 mm para Michoacán-21 y de 412 mm para HS-2 y Promesa (Figura 2). Esto indica que las necesidades de agua del cultivo difieren entre genotipos, por el mayor ciclo de crecimiento son más altos para HS-2 y Promesa.

Materia Seca Total (MS), Índice de Cosecha (IC), Rendimiento (RG) y sus Componentes

El MS, IC, RG y NGH mostraron cambios significativos debido a los diferentes genotipos (G), dosis de nitrógeno (N) y la interacción genotipo \times nitrógeno (G \times N). También se observaron diferencias en el P100G, entre G y N; en el NH y NG debido a N y en la interacción G \times N (Cuadro 1).

Desarrollo de los diferente genotipos. En cuanto a la MS, se observó que los cultivares mejorados superaron en 25 y 45% al nativo (Cuadro 2). El genotipo Promesa por su ciclo de crecimiento más largo tuvo oportunidad de interceptar mayor cantidad de radiación, lo que generó un incremento del 45% en MS con respecto a Michoacán-21 de ciclo más corto. En relación al IC, los genotipos Michoacán-21 y Promesa, estadísticamente presentaron similar distribución de MS hacia el grano. Esto indica que las diferencias en MS y RG entre Michoacán-21 y Promesa, son en la misma proporción. Promesa presentó el RG más alto (323 g m⁻²), mayor P100G, seguido de HS-2 y Michoacán-21 (236 g m⁻²).

Nitrógeno. Las diferentes aplicaciones de N ocasionaron incrementos significativos en la MS, IC, RG y sus componentes. La aplicación de 80 y 160 kg N ha⁻¹ incrementó en 251 g m⁻² la MS y el IC en 26%, con respecto a la nula fertilización (Cuadro 2), lo que indica que con la aplicación de N se promovió una mayor acumulación de MS hacia el grano respecto al resto de las estructuras de la planta, generado esto por un mayor tamaño de la demanda. Con 160 kg N ha⁻¹ el RG aumentó en promedio 105 g m⁻², esto fue atribuible al P100G y NG, con respecto al testigo (sin nitrógeno). Esto se relaciona con la disponibilidad de N inicial en el suelo, así como durante el llenado de grano (D'Andrea *et al.*, 2008). Otros estudios reportan incrementos en el RG del maíz con 160 kg N ha⁻¹ (Arrieché y Ruiz, 2010; Martínez- Rueda *et al.*, 2010). Estos resultados indican que el suministro de N al suelo, es necesario para incrementar la producción de MS, IC, NH, NGH, NG y P100G en la mazorca y en consecuencia el RG. Dicha respuesta se ha encontrado en otros casos donde se aplicó N, en el NG, P100G, RG, IC y MS (O'Neil *et al.*, 2004; Rasheed *et al.*, 2004; Khaliq *et al.*, 2009).

Genotipo \times Nitrógeno (G \times N). La respuesta a las diferentes dosis de N para MS y RG del maíz fue en función del genotipo (Figura 3). Así, para Promesa y HS-2 la respuesta a la aplicación de N se ajustó a un polinomio de segundo grado. En Promesa (7.9 g m⁻² por kg de N) fue superior al de HS-2 (3.8 g m⁻² por kg de N ha⁻¹) y en Michoacán-21 (2.3 g m⁻² por unidad de N) que fue la más baja (Figura 3A). En Promesa,

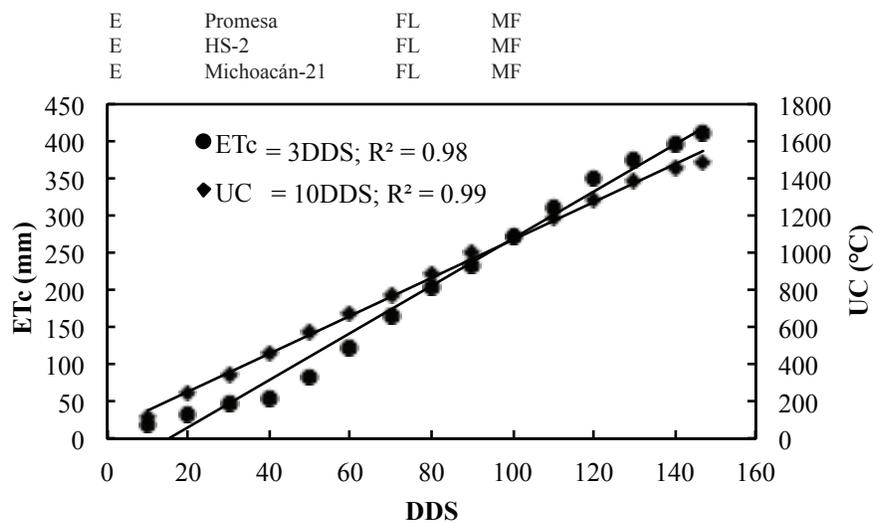


Figura 2. Unidades calor (UC); días después de la siembra (DDS); evapotranspiración (ETc) y fenología durante el ciclo del cultivo en los cultivares de maíz Michoacán-21, HS-2 y Promesa. E = emergencia; FL = floración; MF = madurez fisiológica. Montecillo, Estado de México, 2011.

Cuadro 1. Análisis de varianza para materia seca (MS), índice de cosecha (IC), rendimiento (RG) y sus componentes en genotipos de maíz en función del nitrógeno (N). Montecillo, Estado de México, 2011.

Factor	MS	IC	RG	P100G	NH	NGH	NG
	g m ⁻²	%	g m ⁻²	g			m ⁻²
G	**	**	**	**	NS	**	NS
N	**	**	**	**	**	**	**
G × N	*	**	**	NS	**	**	**

*, ** = $P \leq 0.05, 0.01$, respectivamente; NS = no significativo a $P \geq 0.05$; P100G = peso 100 granos; NH = número de hileras; NGH = número de granos hilera-1; NG = número de granos; G = genotipo.

la máxima producción de MS se logró con 80 kg N ha⁻¹; mientras que para HS-2 y Michoacán-21 se encontró con 160 kg N ha⁻¹. Esto indica una mayor eficiencia en el uso del N por el genotipo Promesa.

En cuanto a la respuesta a las diferentes aplicaciones de N para RG, se observó una tendencia cuadrática para los genotipos en estudio (Figura B). Así, la mayor respuesta al N se encontró con la aplicación de 80 y 160 kg N ha⁻¹. El RG de Promesa superó en 40 y 44%, con respecto a Michoacán-21 y HS-2 en cualquier nivel de N aplicado. Esto demuestra el potencial del híbrido Promesa y que tan eficiente es en el uso del nitrógeno. Respuestas variables al N entre genotipos de maíz también han sido reportadas por De la Cruz-Lázaro *et al.* (2009), Mamani-Pati *et al.* (2010) en Villahermosa, Tabasco.

Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) y Eficiencia Agronómica del Nitrógeno (EAN)

En cuanto a la EUAMS, se observó que los cultivares mejorados fueron más eficientes en el uso del agua que el nativo (Cuadro 3). El genotipo Promesa por su mayor cantidad de MS, generó la EUAMS más alta, con respecto a HS-2 y Michoacán-21. En relación al EUARG, Promesa mostró la más alta, debido a sus características genéticas (Faraldo *et al.*, 2011), seguido de HS-2 y Michoacán-21, que presentó la EUARG más baja. Las aplicaciones de N ocasionaron incrementos significativos en el EUAMS y EUARG que fueron similares con 80 y 160 kg N ha⁻¹ (Cuadro 3). Respuestas semejantes fueron reportadas por López *et al.* (2001). La EUAMS y EUARG mostraron diferencias significativas en la interacción Genotipo × dosis de N (Cuadro 3). La EUAMS más alta se encontró en el genotipo Promesa con 80 y 160 kg N ha⁻¹ seguido de HS-2 con 80 y 160 kg N ha⁻¹. La EUAMS más baja se encontró en Michoacán-21 y HS-2 sin N. Esto indica que la EUA más alta es consecuencia de un mayor tamaño de dosel y cobertura del suelo (Caviglia y Sadras, 2001), debido a diferencias genotípicas y N aplicado. La EUARG más alta se observó en Promesa con 80 y 160 kg N ha⁻¹ (Cuadro 3), seguido de Michoacán-21 con 80 y 160 kg N ha⁻¹. La EUARG más baja correspondió a Michoacán-21 y HS-2 sin aplicación de N. Esto indica que el genotipo Promesa presenta una eficiencia más alta en el uso del agua (Howell, 2001).

Cuadro 2. Materia seca (MS), índice de cosecha (IC), rendimiento (RG) y sus componentes de genotipos de maíz en función del nitrógeno (N) aplicado. Montecillo, Estado de México, 2011.

Factor		MS	IC	RG	P100G	NH	NGH	NG
		g m ⁻²	%	g m ⁻²	g			m ⁻²
Genotipo	Michoacán-21	860 c	27 a	236 b	27 a	16.3 a	22 b	2281 a
	HS-2	1076 b	22 b	240 b	22 b	14.8 a	26 a	2468 a
	Promesa	1250 a	25 a	323 a	28 a	15.1 a	25 a	2437 a
Tukey $\alpha = 0.05$ (DMS)		120	3	4.8	2.5	1.6	2.5	450
N (kg ha ⁻¹)	0	895 b	22 b	198 b	20 c	14 b	22 c	2000 b
	80	1146 a	26 a	298 a	27 b	16 a	24 b	2468 a
	160	1146 a	26 a	303 a	29 a	16 a	27 a	2718 a
Tukey $\alpha = 0.05$ (DMS)		77	2.1	5.1	1.1	1.6	1.7	250
Media general		1062	25	266	25	15	24	2393
CV (%)		6	6	0.9	8	6	4	10

En columnas para cada factor principal letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$). P100G = peso 100 granos; NH = número de hileras; NGH = número de granos hilera-1; NG = número de granos.

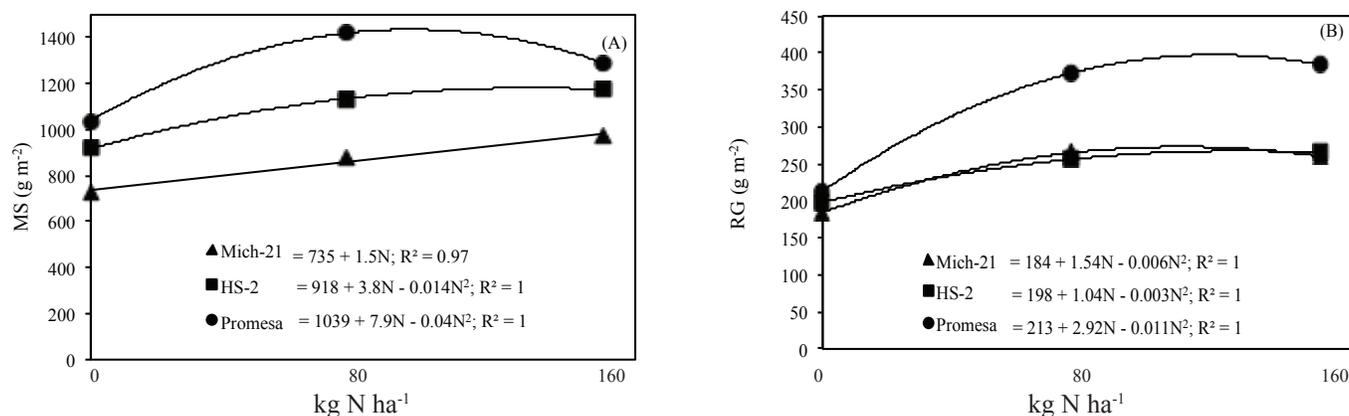


Figura 3. (A) Materia seca total (MS) y (B) rendimiento de grano (RG) en genotipos de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicada al suelo. Montecillo, Estado de México, 2011.

En cuanto a la EAN, se observaron diferencias significativas con respecto al factor genotipo. El genotipo Promesa demostró ser más eficiente en el uso del N, respecto de HS-2 y Michoacán-21 (Cuadro 3). Al respecto, Hernández *et al.* (2003)

también encontraron diferencias entre genotipos en la eficiencia en el uso del N en maíz. Por otra parte, con N también se observaron incrementos significativos en la EAN. Con 80 kg N ha⁻¹ se logra la más alta EAN, seguido de 160 kg N ha⁻¹, lo que indica que el N

Cuadro 3. Eficiencia en el uso del agua (EUA) y eficiencia agronómica de nitrógeno (EAN) en genotipos de maíz en función del nitrógeno aplicado. Montecillo, Estado de México, 2011.

Genotipo	Nitrógeno aplicado al suelo kg N ha ⁻¹	EUAMS g m ⁻² mm ⁻¹	EUARG	EAN g g ⁻¹
Michoacán-21		2.16 c	0.59 b	4.98 b
HS-2		2.61 b	0.58 c	3.78 c
Promesa		3.03 a	0.78 a	10.27 a
	Tukey $\alpha = 0.05$ (DMS)	0.29	0.01	0.22
	0	2.19 b	0.48 b	-
	80	2.80 a	0.73 a	12.4 a
	160	2.81 a	0.74 a	6.5 b
	Tukey $\alpha = 0.05$ (DMS)	0.18	0.01	0.40
Michoacán-21	0	1.83 c	0.46 f	-
	80	2.21 c	0.67 c	10.18 b
	160	2.45 bc	0.65 c	4.76 d
HS-2	0	2.23 c	0.48 f	-
	80	2.75 b	0.62 d	7.21 c
	160	2.85 b	0.64 d	4.15 e
Promesa	0	2.52 bc	0.51 e	-
	80	3.45 a	0.90 b	20.07 a
	160	3.13 ab	0.93 a	10.73 b
	Tukey $\alpha = 0.05$ (DMS)	0.29	0.01	0.22
	Media general	2.60	0.65	6.34
	CV (%)	6.40	1.20	3.46

En columnas para cada factor principal letras similares indican que los valores son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$).

promovió una mayor EAN, después de la cual dicha eficiencia disminuye. Dicha respuesta se relaciona con lo mencionado en Álvarez *et al.* (2003), quienes observaron alta eficiencia con bajo contenido de nitrógeno.

La EAN más alta correspondió a Promesa con 80 kg N ha⁻¹; seguido de la aplicación de 160 kg N ha⁻¹. La EAN más baja correspondió a Michoacán-21 y HS-2 con 160 kg N ha⁻¹. Esto indica que Promesa presenta ventajas fisiológicas sobre Michoacán-21 y HS-2 por ser más eficiente en el uso de los insumos. Una EAN superior a la encontrada en el presente estudio fue reportada por Barbieri *et al.* (2003). Dicha diferencia puede deberse al diferente genotipo y prácticas de manejo.

Contenido de Nitrógeno y Proteína

El contenido de N y proteína, presentó diferencias significativas entre genotipos. El maíz HS-2 y Michoacán-21 mostraron los contenidos de N y proteína más altos con respecto a Promesa que fue el más bajo (Cuadro 4). Variabilidad en el contenido de N y proteína entre genotipos de maíz también han sido reportadas por Mendoza *et al.* (2006) y Hernández *et al.* (2003).

En relación a la aplicación de N, se observó diferencias en el contenido de N y proteína en el grano (Cuadro 4). Respuestas similares en maíz han sido reportadas por López *et al.* (2007), Rasheed y Mahmood (2004) y Shapiro y Wortmann (2006), en donde se observaron aumentos significativos en el contenido de N y proteína en el grano de maíz, por efecto de la fertilización nitrogenada.

En cuanto a la interacción G × N se observaron diferencias significativas para el contenido de N y proteína del grano (Cuadro 4). Esto indica que el efecto de la fertilización con N favoreció su absorción y asimilación por la planta para finalmente concentrarse en el grano (Zepeda *et al.*, 2007). El genotipo HS-2 con 160 kg N ha⁻¹ presentó la mayor acumulación de N y proteína en el grano (1.76 y 11%, respectivamente), Promesa presentó una tendencia similar, no así para Michoacán-21. Al respecto Yu-kui *et al.* (2009) y Zepeda-Bautista *et al.* (2009), señalan que la aplicación de N puede incrementar el contenido de proteína del grano de maíz. El contenido de nitrógeno y proteína del grano encontrado en el presente estudio fue superior

al reportado por Agama *et al.* (2011), para cuatro cultivares de maíz de la raza Chalqueño cultivados en el Edo. de México (N 1.49% y proteína 9.36%).

Análisis Económico

En cuanto al análisis económico para el RG se observó que la siembra del maíz Promesa con 80 kg N ha⁻¹ generó el mayor ingreso neto (IN), al igual que la ganancia por peso invertido (GPI). Así, por cada peso invertido, se recuperó \$ 1.61 (Cuadro 5). Para agricultores de capital limitado se recomienda el uso de Promesa, debido a que genera el mayor IN sin aplicación de N (\$0.85 por peso invertido). Al respecto Turrent-Fernández *et al.* (2004) en Chiapas, Quintana Roo, Veracruz y Guerrero en siembra con riego, observaron el más alto IN con los híbridos H-516 y H-515, con la más alta fertilización (160 kg N ha⁻¹).

Cuadro 4. Contenido de nitrógeno y proteína en genotipos de maíz en función de la aplicación de nitrógeno al suelo. Montecillo, Estado de México, 2011.

Genotipo	Nitrógeno aplicado al suelo	Nitrógeno en grano	Proteína
	kg N ha ⁻¹	----- % -----	
Michoacán-21	0	1.63 ab	10 a
	160	1.63 b	10 b
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.05	0.3
HS-2	0	1.65 a	10 a
	160	1.64 a	10 a
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.07	0.5
Promesa	0	1.59 b	9 b
	160	1.63 b	10 b
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.08	0.5
Michoacán-21	0	1.63 b	10 b
	160	1.63 b	10 b
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.08	0.5
HS-2	0	1.54 c	10 b
	160	1.76 a	11 a
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.08	0.5
Promesa	0	1.54 c	9 c
	160	1.63 b	10 b
	Tukey α = 0.05 (DMS)	0.08	0.5
	Media general	1.62	10
	C. V. (%)	1.8	1.8

En columnas para cada factor letras similares indican que son estadísticamente iguales (Tukey, α = 0.05).

Cuadro 5. Rendimiento (RG), ingresos totales (IT), costos fijos (CF), costos variables (CV) y costos totales (CT), ingresos netos (IN) y ganancia por peso invertido (GPI) en genotipos de maíz en función del nitrógeno (N) aplicado. Montecillo, Estado de México, 2011.

Genotipo	N	RG	IT	CF	CV	CT	IN	GPI
	kg ha ⁻¹					\$		
Michoacán-21	0	1842	10131	5033.6	340	5373.6	4757.4	0.89
	80	2652	14586	5033.6	1863	6896.6	7689.4	1.11
	160	2605	14327.5	5033.6	3286	8319.6	6007.9	0.72
HS-2	0	1987	10928.5	5033.6	1300	6333.6	4594.9	0.73
	80	2565	14107.5	5033.6	2823	7856.6	6250.9	0.8
	160	2650	14575	5033.6	4246	9279.6	5295.4	0.57
Promesa	0	2130	11715	5033.6	1300	6333.6	5381.4	0.85
	80	3735	20542.5	5033.6	2823	7856.6	12685.9	1.61
	160	3847	21158.5	5033.6	4246	9279.6	11878.9	1.28

IT = RG precio por kg de maíz (\$ 5.50); CF = incluye costo de preparación del terreno, siembra, riego, manejo de maleza y plagas; CV = incluye el costo de la fertilización y cosecha de maíz.

Esto contrasta con los resultados de este estudio, ya que se presentó el mayor IN con 80 kg N ha⁻¹ en Promesa, HS-2 y Michoacán-21. Dichas diferencias se relacionan con los diferentes genotipos utilizados, diferente suministro de agua y condiciones ambientales.

CONCLUSIÓN

- Los genotipos en estudio presentaron diferencias en la ocurrencia de las fases fenológicas. Promesa presentó mayor respuesta al nitrógeno que HS-2 y Michoacán-21. La aplicación de nitrógeno 80 y 160 kg ha⁻¹ incrementaron la eficiencia en el uso del agua, eficiencia agronómica de nitrógeno, producción de materia seca y rendimiento. Dicho incremento fue en función del genotipo utilizado. El contenido de nitrógeno y proteína del grano fue más alto en el genotipo HS-2 con una aplicación de 160 kg N ha⁻¹. El mayor ingreso neto se logró con Promesa con 80 kg N ha⁻¹.

- Para Montecillo, Estado de México, el uso del maíz híbrido Promesa con una fertilización entre 80 y 160 kg ha⁻¹ de nitrógeno es una buena opción para productores que siembran en temporal, debido a que alcanzar un rendimiento de 3.8 Mg ha⁻¹, esto se pudiera incrementar con la asociación de riegos, por ser este híbrido eficiente en el uso del agua y nitrógeno, probablemente el rendimiento aumentaría.

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México que mediante CONACYT se otorgó el apoyo económico para llevar a cabo este trabajo de investigación.

LITERATURA CITADA

- Agama-Acevedo, E., Y. Salinas-Moreno, G. Pacheco-Vargas y L. A. Bello-Pérez. 2011. Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: Morfología del almidón. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2: 317-329.
- Antuna, O., F. Rincón, E. Gutiérrez, N. A. Ruíz y L. Bustamante. 2003. Componentes genéticos de características agronómicas y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 26: 11-17.
- Andrade, F., L. Echarte, R. Rizzalli, A. Della Maggiora, and M. Casanovas. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Sci.* 42: 1173-1179.
- Álvarez, R., H. S. Steinbach, C. R. Álvarez y S. Grigera. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la Pampa Ondulada. *Informaciones Agronómicas* 18: 14-19. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Arrieche, L. E. y M. Ruiz D. 2010. Influencia de la fertilización química y orgánica sobre el carbono de la biomasa microbiana y rendimiento del maíz en suelos de pH contrastantes. *Agrociencias* 44: 249-260.
- Barbieri, P., H. E. Echeverría y H. R. Sainz Rozas. 2003. Respuesta del cultivo de maíz bajo siembra directa a la fuente y al método de aplicación de nitrógeno. *Cien. Suelo* 21: 18-23.
- Benítez C., C. G. y H. Pfeiffer P. 2006. El maíz: Origen, composición química y morfología. *Mat. Avanz.* 7: 15-20.

- Borrás, L. and M. E. Otegui. 2001. Maize kernel weight response to post flowering source-sink ratio. *Crop Sci.* 49: 1816-1822.
- Caviglia, O. P. and V. O. Sadras. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water- and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crops Res.* 69: 259-266.
- Chapman, H. D. y P. F. Pratt. 1979. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Trillas. México.
- Cruz-Flores, G., D. Flores R., G. Alcántar G., A. Trinidad S. y R. Vivanco E. 2002. Eficiencia de uso de nitrógeno y fósforo en genotipos de trigo, triticale y maíz. *Terra* 20: 411-422.
- D'Andrea, K. E., M. E. Otegui, and A. G. Cirilo. 2008. Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Res.* 105: 228-239.
- De la Cruz-Lázaro, E., H. Códova-Orellana, M. A. Estrada-Botello, J. D. Mendoza-Palacios, A. Gómez-Vázquez y N. P. Brito-Manzano. 2009. Rendimiento de grano de genotipos de maíz sembrados bajo tres densidades de población. *Univ. Cienc. Tróp. Húm.* 25: 93-98.
- Díaz-López, E., J. M. Loeza-Corte, J. M. Campos-Pastelín, E. J. Morales-Rosales, A. Domínguez-López y O. Franco-Mora. 2013. Eficiencia en el uso de la radiación, tasa de asimilación neta e integral térmica en función del fósforo en maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia* 47: 135-146.
- Domínguez, G. F., G. A. Studdert y H. E. Echeverría. 2001. Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. *Cienc. Suelo* 19: 47-56.
- Doorenbos, J. y W. O. Pruitt. 1986. Las necesidades de agua por los cultivos. FAO. Serie Riego y Drenaje. Manual. Tomo 24.
- Escalante, E. J. A. 1995. Aprovechamiento del recurso agua en cultivos de secano. *Agroproductividad* 12: 28-32.
- Espinosa C., A., M. Sierra M. y N. Gómez M. 2003. Producción y tecnología de semillas mejoradas de maíz por el INIFAP en el escenario sin la PRONASE. *Agron. Mesoamer.* 14: 117-121.
- Fageria, N. K. and V. C. Baligar. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Adv. Agron.* 88: 97-185.
- Faraldo, M. L., G. T. Vergara, G. A. Casagrande, J. P. Arnaiz, H. Mirasson y C. Ferrero. 2011. Eficiencia en el uso del agua y radiación en maíz, girasol y soja, en la región oriental de la Pampa, Argentina. *Agron. Trop.* 61: 47-57.
- García, E. 2005. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Mexico, D. F.
- García P., A. D. y C. López C. 2002. Temperatura base y tasa de expansión foliar del maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 25: 381-386.
- Hernández, A., V. Barrientos, A. Chassaigne y J. Alezones. 2003. Evaluación y selección de poblaciones y líneas de maíz (*Zea mays* L.) eficientes en la asimilación de nitrógeno. *Biagro* 15: 115-120.
- Howell, T. A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.* 93: 281-289.
- Khaliq, T., A. Ahmad, A. Hussain, and M. A. Ali. 2009. Maize hybrids response to nitrogen rates at multiple locations in semiarid environment. *Pak. J. Biol.* 41: 207-224.
- López, S., E. Guevara, M. Maturano, M. Melaj, J. P. Bonetto, S. Meira, O. Martin y N. Bárbaro. 2001. Absorción de nitrógeno en trigo en relación con la disponibilidad hídrica. *Terra*. 20: 7-15.
- López P., P., F. Prieto G., M. Gaytán M. y A. D. Román G. 2007. Caracterización fisicoquímica de diferentes variedades de cebada cultivadas en la Región Centro de México. *Rev. Chil. Nutr.* 34: 71-77.
- Mamani-Pati, F., D. E. Clay, C. G. Carlson, S. A. Clay, G. Reicks, and K. Kim. 2010. Nitrogen rate, landscape position and harvesting of corn stover impacts on energy gains and sustainability of corn production systems in South Dakota. *Agron. J.* 102: 1535-1541.
- Martínez-Rueda, C. G., G. Estrada-Campuzano, V. V. Beltrán-Guzmán, G. Ortega-Rojas y A. Contreras-Rendón. 2010. Contenido de agua en el grano y capacidad potencial de demanda en híbridos de maíz para Valles Altos. *Rev. Fitotec. Mex.* 33: 95-100.
- Mendoza E., M., E. Andrio Enríquez, J. M. Juárez Goiz, C. Mosqueda Villagómez, L. Latournerie Moreno, G. Castañón Nájera, A. López Benítez y E. Moreno Martínez. 2006. Contenido de lisina y triptófano en genotipos de maíz de alta calidad proteica y normal. *Univ. Cienc.* 22: 153-161.
- Morales R., E. J. y J. A. Escalante E. 2007. Eficiencia en el uso de los insumos agrícolas en la producción de biomasa y el rendimiento del sistema combinado girasol-frijol en función del nitrógeno. *Terra Latinoamericana* 25: 373-381.
- O'Neil, P. M., J. F. Shanahan, J. S. Schepers, and B. Caldwell. 2004. Agronomic responses of corn hybrids from different eras to deficit and adequate levels of water and nitrogen. *Agron. J.* 96: 1660-1667.
- Parker, R. 2000. La ciencia de las plantas. Paraninfo. Madrid, España.
- Pecina M., J. A., M. C. Mendoza-Castillo, J. A. López-Santillán, F. Castillo-González, M. Mendoza-Rodríguez y J. Ortiz-Cereceres. 2011. Rendimiento de grano y sus componentes en maíces nativos de Tamaulipas evaluados en ambientes contrastantes. *Rev. Fitotec. Mex.* 34: 85-92.
- Rasheed, M. and T. Mahmood. 2004. Effect of different planting methods and nutrient management on quality traits of hybrid maize. *Int. J. Agric. Biol.* 6: 162-164.
- Rasheed, M., W. M. Bhutta, M. Anwar-ul-Haq, and A. Ghaffar. 2004. Genotypic response of maize hybrids to NP applications. *Int. J. Agric. Biol.* 6: 721-722.
- Reynoso Q., C. A., A. González H., D. de J. Pérez L., O. Franco M., J. L. Torres F., G. A. Velázquez C., C. Breton L., A. Balbuena M. y O. Mercado V. 2014. Análisis de 17 híbridos de maíz sembrados en 17 ambientes de los Valles Altos del centro de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5: 871-882.
- Ritchie, S. W. and J. J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Special report No. 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Ames, IA, USA.
- Rivetti, A. R. 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. I. Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *Rev. Fac. Cienc. Agr.* 38: 25-36.
- Shapiro, C. A. and C. S. Wortmann. 2006. Corn response to nitrogen rate, row spacing and plant density in Eastern Nebraska. *Agron. J.* 98: 529-535.
- SIAP (Sistema de Información Agropecuaria). 2011. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. SAGARPA. México. Disponible en: http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar_comanuar.html (Consulta: septiembre 12, 2012).
- Snyder, R. L. 1985. Hand calculating degree days. *Agric. For. Meteorol.* 35: 353-358.
- Stagnari, F., V. Di Bitetto, and M. Pisante. 2007. Effects of N fertilizers and rates on yield, safety and nutrients in processing spinach genotypes. *Sci. Hortic.* 114: 225-233.

- Turrent-Fernández, A., R. Camas-Gómez, A. López-Luna, M. Cantú-Almaguer, J. Ramírez-Silva, J. Medina-Méndez y A. Palafox-Caballero. 2004. Producción de maíz bajo riesgo en el Sur-Sureste de México: II. Desempeño financiero y primera aproximación tecnológica. *Agric. Téc. Méx.* 30: 205-221.
- Volke, H. V. 1982. Optimización de insumos de la producción en la agricultura. Colegio de Postgraduados. México, D. F., México.
- Yu-kui, R., J. Shi-ling, Z. Fu-suo, and S. Jian-bo. 2009. Effects of nitrogen fertilizer input on the composition of mineral elements in corn grain. *Agrociencia* 43: 21-27.
- Zepeda, B., R., A. Carballo C., A. Muñoz O., J. A. Mejía C., B. Figueroa S. y F. V. González C. 2007. Fertilización nitrogenada y características físicas, estructurales y calidad del nixtamal-tortilla del grano de híbridos de maíz. *Agric. Téc. Méx.* 33: 17-24.
- Zepeda B., R., A. Carballo C., A. Muñoz O., J. A. Mejía C., B. Figueroa S., F. V. González C. y C. Hernández A. 2009. Proteína, triptófano y componentes estructurales del grano en híbridos de maíz (*Zea mays* L.) producidos bajo fertirrigación. *Agrociencia* 43: 143-152.

Diseño de un sistema de riego hidrante parcelario con los métodos por Turnos y Clement: análisis técnico y económico

Design of a system of farm hydrant with the Turns and Clement methods: technical and economic analysis

Bartolomé Espinosa Espinosa^{1‡}, Héctor Flores Magdaleno¹,
Roberto Ascencio Hernández¹ y Guillermo Carrillo Flores¹

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.
Autor responsable (bespinosa@live.com.mx)

RESUMEN

El uso óptimo y sostenible de los recursos hídricos disponibles para riego, requiere que las instalaciones usadas para irrigar permitan administrar el agua con las estrategias de manejo adecuadas a cada situación. Este aspecto, es imprescindible para rentabilizar las inversiones en infraestructura para los cultivos en la zona regable y por la evolución de las políticas y mercados agrícolas. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo realizar un análisis técnico y económico de un sistema de riego a hidrante parcelario empleando los métodos por Turnos y Clement, en el módulo Yurécuaro del Distrito de Riego 087, localizado en el estado de Michoacán, México, con la finalidad de recomendar a los usuarios un diseño para los sistemas de riego. El análisis de los resultados mostró que el diseño hidráulico por el método de Turnos requiere diámetros menores de tubería para su funcionamiento, mientras que para el diseño empleando el método de Clement demandó diámetros mayores que le permitieron mayor flexibilidad en el sistema de riego. El costo de inversión inicial del sistema de riego diseñado con el método de Clement fue 28% mayor en comparación con el método de diseño por Turnos. Los costos de operación del sistema de riego por el método de Turnos, fue 12.5% mayores en comparación con el método de Clement.

Palabras clave: *costos de riego; irrigación; recursos hídricos.*

SUMMARY

The optimal and sustainable use of water resources available for irrigation requires that the irrigation facilities are able to manage water with appropriate strategies for each situation. This aspect, is absolutely necessary to make profitable investments in infrastructure for crops in irrigated areas and because of the evolution of policies and agricultural markets. For this reason, the objective of this study was to perform a technical and economic analysis of a plot hydrant irrigation system design using the Turns and the Clement methods in the module Yurecuaro of Irrigation District 087, located in the state of Michoacán, Mexico, in order to recommend a better design solution for irrigation systems. Analysis of the results shows that the hydraulic design by the Turns method requires smaller pipe diameters to operate, while the design using the Clement method requires larger diameters that allow greater flexibility in the irrigation system. The initial investment cost of the irrigation system designed with the Clement method was 28% higher than that with the Turns method. Operating costs of irrigation using the Turns method were 12.5% higher than the costs using the Clement method.

Index words: *irrigation costs; irrigation; water resources.*

Como citar el artículo:

Espinosa Espinosa, B., H. Flores Magdaleno, R. Ascencio Hernández y G. Carrillo Flores. 2016. Análisis técnico y económico del diseño de un sistema de riego a hidrante parcelario utilizando el método por Turnos y la técnica de Clement. *Terra Latinoamericana* 34: 431-440.

Recibido: noviembre de 2015. Aceptado: julio de 2016.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 431-440.

INTRODUCCIÓN

En dos terceras partes de México el clima es árido y semiárido con precipitaciones medias inferiores a 500 mm, mientras que en la tercera parte restante son mayores a 1600 mm anuales. Esta distribución irregular de la lluvia ha obligado a construir obras de riego aprovechando los recursos hidráulicos locales para optimizar el desarrollo de los cultivos (CONAGUA, 2008). En México se cultivan 20 millones de hectáreas de las cuales 6.4 millones son de riego, lo que coloca al país entre los primeros del mundo en superficie irrigada. El sector agrícola consume 77% del volumen de agua utilizada (61.2 km³), con una eficiencia global de 45%, y los sistemas de producción bajo riego generan 55% de la producción agrícola nacional y 70% de los productos agrícolas de exportación (Tun-Dzul *et al.*, 2011). La principal limitante para optimizar la producción agrícola en México es la poca disponibilidad de agua en las zonas áridas y semiáridas del país, la explosión demográfica y la demanda de los sectores económicos en dichas zonas; con el crecimiento poblacional la demanda de agua para consumo humano e industrial se eleva, reduciendo su disponibilidad para las áreas agropecuarias. Por tal motivo, es necesario el uso eficiente del agua en el sector agropecuario, mediante el mejoramiento de métodos e instrumentos para conducir, distribuir y aplicar el agua de riego; así como en el diseño, revisión y evaluación de los sistemas de riego. El uso óptimo y sostenible del recurso hídrico disponible para riego requiere que la infraestructura permita gestionar el agua de riego con las estrategias de manejo más adecuadas en cada situación, y solo condicionada por los cultivos que se adopten en la zona, así como por la evolución de las políticas y mercados agrícolas (Planells *et al.*, 1999).

Además, la baja disponibilidad de agua en las presas del país ha repercutido en la sobreexplotación de los acuíferos, lo cual origina la necesidad de establecer estrategias para un mayor control en la administración del recurso hídrico. Entre estas estrategias, destaca la tecnificación del riego que implica la incorporación de técnicas y métodos racionales cuantitativos que permitan ejercer un mayor control de esta importante práctica agrícola, que a nivel de parcela sugiere su diseño y programación eficiente del riego (Catalán y Villa, 2009).

Un sistema de riego tiene como objetivo central, satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, en el momento adecuado y con la cantidad necesaria de manera eficiente y uniforme, es decir, que la mayor cantidad de agua quede almacenada en la zona radical a disposición del cultivo (Ángeles, 2000), tomando en cuenta el requerimiento de riego, representado por la necesidad de agua del cultivo, a fin de garantizar condiciones óptimas de desarrollo (FAO, 2006). La tecnificación del riego no necesariamente implica que se alcancen altas eficiencias, si estos sistemas no se operan adecuadamente bajo las premisas de su diseño (Tun-Dzul *et al.*, 2011). En un sistema de riego con éxito, un conjunto de recursos produce el máximo rendimiento, para lograrlo, es necesario un proceso de optimización que apoye el diseño y operación de los sistemas de aplicación de agua en la agricultura, mediante la combinación de variables que satisfagan las condiciones de riego por lo cual es necesario la selección apropiada de los métodos y estrategias relacionadas con la disponibilidad de agua, las características del clima, suelo y cultivo; asimismo, de las condiciones sociales y económicas y de las restricciones de distribución del sistema. (Holzapfel *et al.*, 2007).

La inversión en los sistemas de riego implica un capital de alto costo; sin embargo, los costos de funcionamiento y operación son insignificantes en comparación con aquellos costos que son derivados de la reparación de maquinaria, combustible, gastos de agua y mano de obra si no se tiene un sistema de riego bien diseñado (Herwin, 1981).

Para aumentar la sustentabilidad de la agricultura, un aspecto importante que ha sido considerado por numerosos investigadores es el eficiente diseño de los sistemas de riego. Rodríguez *et al.* (2006) mencionan que el diseño óptimo de una red de distribución tiene varios aspectos relevantes de tipo hidráulico, rentabilidad, disponibilidad de tuberías, calidad del agua y distribución de la demanda. El diseño y manejo de los sistemas de riego afecta en forma sustantiva la eficiencia de aplicación e involucra numerosas variables y restricciones, cuyo principal objetivo es maximizar los beneficios y minimizar costos. En un sistema de riego exitoso, los recursos utilizados deben producir el máximo retorno, para obtener lo expresado anteriormente, el diseño y manejo de los métodos de aplicación de agua requieren el soporte de un

proceso de optimización debido a la gran cantidad de combinaciones posibles de variables que satisfacen las condiciones de riego establecidas (Lorite *et al.*, 2009).

Dos tendencias a seguir en el diseño hidráulico de los sistemas de riego son: realizar el dimensionamiento más económico en cuanto al tamaño del diámetro de la red. Si bien este tipo de método resulta ser de los más económicos, también implica un consumo de energía mayor al generar mayores pérdidas por fricción por su menor capacidad de conducción en la red; además de restringir la flexibilidad de operación, obligando a los usuarios a una estricta organización en la operación de la red para el suministro de agua; como segunda tendencia está tener máxima flexibilidad en el manejo de la red, esto es, que el sistema de riego tenga la capacidad de entregar el agua a los usuarios en tiempos relativamente cortos. Lograr una mayor flexibilidad implica un sobredimensionamiento de la red y por lo tanto un mayor costo inicial. En contraparte, tienen la ventaja de abatir los costos de operación por consumo de energía al tener una mayor capacidad de conducción en la red hidráulica.

La organización de la demanda por redes de distribución a presión ha tenido una amplia aceptación debido a que proporciona autonomía al agricultor para decidir el momento y la lámina de riego. No obstante, este tipo de organización presenta el inconveniente de que el costo de la red es mayor, ya que es necesario redimensionarla para caudales mayores. La organización por turnos es una alternativa factible gracias a la gestión automática aplicada a las redes de distribución a presión que permite superar el inconveniente de la coordinación. La automatización de la gestión permite programar que determinados hidrantes puedan abrir y regar durante un lapso de tiempo limitado (Monserrat *et al.*, 2012). El método de Clement provoca una subestimación de caudales en la cabecera de red de 35 a 40%, una de las causas más importantes es que no se cumple la hipótesis de igual probabilidad de apertura de tomas en los diferentes días de la semana y durante todas las horas de la jornada efectiva de riego (Tarjuelo *et al.*, 2006), haciendo que el riego, pueda o no ser continuo, dependiendo de las necesidades del usuario, quien es el que determina cuando regar.

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue realizar un análisis técnico y económico del diseño de un sistema de riego a hidrante parcelario empleando dos métodos de diseño, el método por Turnos y

el método de Clement, con la finalidad de recomendar a los usuarios una mejor solución de diseño para los sistemas de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en el módulo de riego Yurécuaro, del Distrito de Riego 087, localizado en la cuenca Lerma-Chapala. Tiene una superficie de riego de 4234.61 ha, 770 usuarios y una dotación promedio de 5.5 ha por usuario. Este módulo está entre 19° 45' y 20° 30' N y 101° 25' y 102° 30' de O, a una altura media de 1690 m. Al norte limita con el Río Lerma; al sur con la Carretera Yurécuaro-Tanhuato; al oriente con el Canal Principal Margen Derecha y al poniente con la Presa Gonzalo.

El clima, según la clasificación de Köppen y modificado por Enriqueta García (1973), es subhúmedo con lluvias en verano y vegetación de estepa, con precipitación media que varía entre los 750 mm a los 820 mm anuales en las distintas áreas de la cuenca y temperatura media anual de 18.8 °C.

Diseño Agronómico

Para el desarrollo del presente trabajo, se realizó un levantamiento topográfico con equipo GPS diferencial para la generación de polígonos de parcelas y estructuras de la zona de riego, y una estación total para la generación de curvas de nivel.

El requerimiento de riego y el Coeficiente Unitario de Riego (CUR) se obtuvieron utilizando el programa estadístico Cropwat 8.0 (FAO, 2010), con base en el patrón de cultivos, fechas de siembra e información climatológica de la zona de estudio; la información climatológica se tomó de la estación meteorológica No. 16141 "Yurécuaro", utilizando valores promedio anuales de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación del Extractor Rápido de Información Climatológica ERIC III, versión 2.0 (IMTA, 2009). Los valores de humedad, velocidad del viento y radiación solar se estimaron con base en los datos de temperatura, altitud y latitud de la zona, de acuerdo con el programa estadístico Cropwat 8.0. Con los datos de temperatura máxima y mínima, se estimó la evapotranspiración de referencia (ET_0) utilizando el método de Penman-Monteith (FAO, 2006). Posteriormente, con los datos de precipitación, el programa estadístico calculó la precipitación efectiva

con el método de Precipitación confiable mediante la ecuación FAO/AGLW (FAO, 2010). Asimismo, fue necesario agregar los cultivos existentes, fechas de siembra y sus respectivos coeficientes de cultivo (K_c) en la zona de riego (FAO, 2006), para generar el patrón de cultivos correspondiente. Finalmente se obtuvieron las láminas de riego en mm d^{-1} y el CUR en $\text{L s}^{-1} \text{ha}^{-1}$ para cada mes. Con los datos de CUR, para el mes de máxima demanda, y considerando las eficiencias de conducción, distribución, y aplicación, multiplicado por la superficie de la zona de estudio, se obtuvo la capacidad del sistema de riego.

Diseño Hidráulico

Con la información obtenida del diseño agronómico, se definió para ambos métodos un gasto máximo de operación (L s^{-1}) considerando un tiempo de riego de 22 h por día. La lámina calculada se basó en los requerimientos de riego, lo que implica que el gasto máximo sea el necesario para satisfacer las necesidades hídricas de ese día. Utilizando el gasto máximo, se calculó el número de hidrantes empleando la expresión (1):

$$\text{No. de hidrantes funcionando} = \frac{Q_{\text{máx}}}{Q_{\text{hidrante}}} \quad (1)$$

dónde: $Q_{\text{máx}}$ es el gasto de diseño obtenido con el diseño agronómico (L s^{-1}); Q_{hidrante} es el gasto específico del hidrante a utilizar (L s^{-1}).

Para calcular el número de turnos se utilizó la expresión (2):

$$\text{No. de turnos} = \frac{\text{No. total de hidrantes}}{\text{No. de hidrantes funcionando}} \quad (2)$$

Para realizar el diseño hidráulico del sistema de riego por el método de Turnos, se definieron dos tiempos: la duración y la frecuencia del turno. El primero correspondió al tiempo que transcurrió mientras cada sección de riego recibía agua en su turno, y el segundo al tiempo en que cada sección de riego comenzó a recibir agua en un turno y el momento en que comenzará a recibir agua en el turno siguiente (Peña, 2007). Este método implica tener una estricta organización con los usuarios.

Para la operación del sistema de riego diseñado por el método de Turnos, se estableció un horario específico

para que cada uno de los hidrantes se encontrara abierto en un tiempo determinado y el arreglo de los turnos estuvo dado en función de la posición de los hidrantes, con la finalidad de que no regaran al mismo tiempo parcelas que utilicen un mismo ramal; logrando dividir el gasto máximo de diseño, haciéndolo circular por diferentes ramales y minimizando los diámetros de tubería utilizados.

El sistema de riego diseñado con el método de Clement se realizó suponiendo una distribución aleatoria de caudales, de manera que, si una red tiene N tomas con una dotación d , las cuales pueden estar abiertas o cerradas en un momento dado, es improbable que todas estén abiertas a la vez y por tanto que el caudal en cabecera (Q_0) sea $Q_0 = N d$. Se calculó el caudal que podía circular por cada línea para una determinada garantía de suministro, buscando reducir el diámetro necesario respecto al requerido con todas las tomas abiertas (Planells *et al.*, 1999).

El gasto que fluyó en cada tramo de la red correspondió al periodo de máxima demanda durante la época de riego, el cual se obtuvo con el diseño agronómico. El método de Clement, pretende lograr una máxima garantía de suministro de acuerdo con el gasto disponible que abastece la red; para lograr la máxima garantía de suministro y dimensionar la red de tuberías, se utilizó la expresión (1), con la que se determinó el número máximo de hidrantes que estuvieron operando en un ramal, los cuales no superaron el gasto máximo de diseño.

Los cálculos para el diseño hidráulico del sistema de riego para los dos métodos se realizaron utilizando el programa WCADI 2008 (WCADI, 2008). Con las curvas de nivel, se generó una malla para obtener las coordenadas x , y , z de cada punto en toda la superficie de la zona de estudio, y considerar la topografía de la zona en el análisis. Se digitalizaron los nodos y se crearon los trazos de los tramos de tubería. En el caso del método por Turnos, una vez obtenido el número de turnos para el sistema de riego, se procedió a indicar los hidrantes que estarían operando en cada uno de los ramales para proceder al diseño de la red. Para el método de Clement, se procedió a indicar los rangos de certeza de acuerdo con la garantía de suministro, en este caso fue un máximo de 100% y un mínimo de 88%, además de introducir los parámetros de diseño y proceder al cálculo de la red con dicho método. Se ingresaron datos del límite de velocidad permisible, parámetros para el cálculo de las pérdidas de carga, realizando un

análisis hidráulico por presión inicial, con el propósito de calcular la carga necesaria para el funcionamiento de todo el sistema y obtener el dimensionamiento de las líneas de conducción para cada uno de los métodos.

Costos de Inversión

Tanto para el método de Turnos como el de Clement, se consideraron los siguientes costos de inversión: adquisición de la tubería, accesorios y conexiones para la tubería, instalación de la tubería, movimiento de tierras, tren de descarga, obra civil del cárcamo de bombeo, equipo de bombeo y obra eléctrica. Los beneficios directos de la rehabilitación y modernización de la infraestructura hidroagrícola son el rescate de volúmenes de agua y la mejor oportunidad del riego. Para evaluar económicamente estos beneficios, se consideró el impacto del volumen ahorrado y la oportunidad de riego en el incremento de la utilidad neta agrícola, ya que al utilizar más eficientemente el recurso agua se pueden alcanzar mayores rendimientos.

Evaluación Económica

La evaluación económica se realizó contrastando los métodos de diseño por Turnos y Clement, se calcularon los indicadores de rentabilidad más importantes: Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y la relación Beneficio Costo (B/C).

El Valor Presente Neto (VPN) se obtuvo mediante la expresión (3):

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \tag{3}$$

dónde: VPN es el valor presente neto (\$); B_t son los beneficios totales en el año t (\$); C_t son los costos totales en el año t (\$); $B_t - C_t$ es el flujo neto en el año t (\$); n es el número de años del horizonte de evaluación; r es la tasa social de descuento; y t es el año calendario, en donde el año 0 será el inicio de las erogaciones.

Para el cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) se utilizó la expresión (4), donde VPN es igual a 0:

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+TIR)^t} = 0 \tag{4}$$

dónde: B_t son los beneficios totales en el año t (\$); C_t son los costos totales en el año t (\$); $B_t - C_t$ es el flujo neto en el año t (\$); n es el número de años del horizonte de evaluación; TIR es la tasa interna de retorno (%); y t es el año calendario, en donde el año 0 será el inicio de las erogaciones.

Para el cálculo de la Relación Beneficio Costo (B/C), se utilizó la expresión (5):

$$B/C = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{Vi}{(1+i)^n}}{\sum_{i=0}^n \frac{Ci}{(1+i)^n}} \tag{5}$$

dónde: B/C es la relación Beneficio/Costo (Adimensional); V_i es el valor de la producción (\$); C_i son los egresos ($i = 0, 2, 3, 4, \dots, n$) (\$); i es la tasa de descuento.

Se elaboró para ambos métodos, un análisis de sensibilidad del porcentaje de incremento en el monto de inversión y del porcentaje de reducción en los beneficios (SHCP, 2012), realizando cambios en una variable a la vez y observando los efectos en el VPN y en la TIR.

Se calculó el costo anual equivalente en dos pasos con base en el valor del dinero en el tiempo. Primero se calculó el valor presente de todos los costos asociados a la posesión del activo durante toda su vida con la expresión (6). Estos costos incluyen el precio de compra, costos de mantenimiento y de operación durante 30 años, tiempo de vida esperado en los proyectos de infraestructura hidroagrícola.

$$VPC = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \tag{6}$$

dónde: VPC es el valor presente del costo total del proyecto (\$); C_t son los costos totales en el año t (\$); r es la tasa social de descuento; t es el año calendario, en donde el año 0 será el del inicio de las erogaciones y n es el número de años del horizonte de evaluación.

Posteriormente se determinó el flujo de efectivo que, si se pagara cada año, tendría el mismo valor presente (VPC); éste será el costo anual equivalente y está dado por la expresión (7):

$$CAE = VPC \left[\frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \right] \tag{7}$$

dónde: CAE es el costo anual equivalente (\$); VPC es el valor presente del costo total del proyecto (\$); m es el número de años de vida útil del activo y r es la tasa social de descuento. El método de riego más conveniente fue aquel que presentó el menor CAE. Si la vida útil de los activos, mediante los métodos de riego analizados es la misma, la comparación entre éstos se realiza únicamente a través del valor presente de los costos de los métodos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, el mes de máxima demanda fue febrero con un coeficiente unitario de riego (CUR) de $0.73 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$; considerando una eficiencia global de 73.5%, el CUR calculado fue de $0.99 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. El CUR obtenido con el programa estadístico Cropwat 8.0 consideró un tiempo de operación del sistema por día de 24 h, en este caso, para el diseño agronómico de la zona de estudio se consideró un tiempo de operación por día de 22 h por lo que se estimó un factor de corrección de 0.91. El CUR resultante para el sistema de riego fue de $1.08 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. El gasto máximo del sistema (Q_{max}) obtenido fue de $278.19 \text{ L s}^{-1} \approx 280 \text{ L s}^{-1}$.

El gasto en los hidrantes fue de 40 L s^{-1} , con una presión de operación de 1.5 kg cm^{-2} . Para el sistema de riego en conjunto, la presión requerida por el método de turnos fue de 3.1 kg cm^{-2} y utilizando el método de Clement fue de 2.6 kg cm^{-2} (Cuadro 1).

La longitud total de tubería fue de 14 652 m, para una superficie física de 257.59 ha, donde los mayores costos de inversión se presentaron en el sistema diseñado por el método de Clement, con excepción del costo del equipo de bombeo y la obra eléctrica, donde fueron menores; y el costo de la obra civil cárcamo de bombeo no tuvo variación (Cuadro 2 y 3).

En la estimación del valor presente de los flujos de costos y beneficios se adoptó una tasa social de

descuento del 12%, correspondiente a la recomendada por la SHCP para reflejar el valor real de los recursos públicos y privados a ser empleados durante la ejecución y operación del programa. Los indicadores de rentabilidad reflejaron que los sistemas de riego de ambos métodos son rentables, debido a que por un lado el VPN es mayor a cero, la TIR es mayor al 12% (tasa social de descuento recomendada por la SHCP) y la relación B/C es mayor a 1 (Cuadro 4).

El valor presente del costo total (VPC) y el costo anual equivalente (CAE), considerando los costos de inversión, operación, mantenimiento y reparaciones fueron menores en \$ 1 421 924.42 y \$ 176 522.90, respectivamente, para el método de Turnos en comparación con los de Clement, lo cual representa una diferencia del 11.6% (Cuadro 5); tomando en cuenta estos valores el método de Turnos resulta ser más conveniente. Por el contrario, considerando solamente los costos de operación, mantenimiento y reparaciones se observa que el VPC y el CAE son menores en \$ 91 659.40 y \$ 11 378.93, respectivamente, para el método de Clement en comparación con el de Turnos, lo cual representa una diferencia del 1.7% (Cuadro 5); tomando en cuenta estos valores el método más conveniente resulta ser el de Clement. Este análisis se llevó a cabo debido a que los proyectos de infraestructura hidroagrícola en México son subsidiados en el monto de adquisición y el usuario aporta los gastos de operación y mantenimiento durante su vida útil.

El sistema de riego logra el uso óptimo y sostenible de los recursos hídricos, permitiendo la gestión del agua con estrategias de manejo adecuadas, tal y como lo mencionan Planells *et al.* (1999); además de conseguir la rentabilidad de la inversión en infraestructura hidroagrícola; por ende, se incrementa la superficie de producción debido a que se mejora la eficiencia global del riego, garantizándose un suministro oportuno de agua, para incrementar el rendimiento de la producción agrícola.

Cuadro 1. Resultados del diseño hidráulico por los métodos de Turnos y Clement.

Método	Diámetros	Sistema		Tomas o hidrantes	
		P	Q	P	Q
	mm	kg cm ⁻²	L s ⁻¹	kg cm ⁻²	L s ⁻¹
Turnos	400, 355, 315, 250, 200, 160	3.1	280	1.5	40
Clement	450, 400, 355, 315, 250, 200, 160	2.6	280	1.5	40

Cuadro 2. Costos para el sistema diseñado con el método de Turnos.

Concepto	Unidad	Cantidad	Importe (M.N.)
			\$
Tubo PVC C/C C-5 160 mm (6")	m	6114	581 582.02
Tubo PVC C/C C-5 200 mm (8")	m	5376	792 266.50
Tubo PVC C/C C-5 250 mm (10")	m	1932	443 803.58
Tubo PVC C/C C-5 315 mm (12")	m	312	113 426.04
Tubo PVC C/C C-5 355 mm (14")	m	378	141 693.30
Tubo PVC C/C C-5 400 mm (16")	m	540	264 864.60
Instalación de tubería	Lote	1	93 505.44
Accesorios y conexiones	Lote	1	327 269.05
Movimiento de tierras	Lote	1	944 060.36
Tren de descarga	Lote	1	257 158.69
Obra civil cárcamo de bombeo	Lote	1	250 139.35
Equipo de bombeo	Lote	1	439 690.45
Obra eléctrica	Lote	1	758 828.30
Total			5 408 287.68

El requerimiento de riego calculado muestra las necesidades de agua del cultivo que se debe proporcionar con el riego para garantizar condiciones óptimas de desarrollo (FAO, 2006); no obstante, el requerimiento varía a lo largo de la República Mexicana, donde existen grandes diferencias climáticas y de distribución de lluvia.

Como lo mencionan Rodríguez *et al.* (2006), el diseño óptimo de la red de distribución tiene aspectos de tipo hidráulico, rentabilidad, disponibilidad de tuberías, calidad de agua y distribución óptima de la demanda. Mismos que llevan a determinar el método más adecuado en determinado proyecto. Los aspectos

Cuadro 3. Costos para el sistema diseñado con el método de Clement.

Concepto	Unidad	Cantidad	Importe (M.N.)
			\$
Tubo PVC C/C C-5 160 mm (6")	m	1 644	156 382.20
Tubo PVC C/C C-5 200 mm (8")	m	4 266	628 684.70
Tubo PVC C/C C-5 250 mm (10")	m	4 314	990 977.60
Tubo PVC C/C C-5 315 mm (12")	m	2 334	848 514.00
Tubo PVC C/C C-5 355 mm (14")	m	864	323 870.40
Tubo PVC C/C C-5 400 mm (16")	m	312	153 032.88
Tubo PVC C/C C-5 450 mm (18")	m	918	562 532.04
Instalación de tubería	Lote	1	146 559.75
Accesorios y conexiones	Lote	1	512 959.13
Movimiento de tierras	Lote	1	972 925.08
Tren de descarga	Lote	1	285 731.88
Obra civil cárcamo de bombeo	Lote	1	250 139.35
Equipo de bombeo	Lote	1	399 718.59
Obra eléctrica	Lote	1	689 843.91
Total			6 921 871.51

Cuadro 4. Indicadores de rentabilidad para los métodos de Turnos y Clement.

Método	Indicadores de rentabilidad		
	VPN	TIR	Relación B/C
	\$	%	
Turnos	2615	16.20	1.24
Clement	1193	13.63	1.10

mencionados fueron estudiados en el presente trabajo y se definió la viabilidad de los métodos con base en los costos de inversión, operación y mantenimiento.

En el método de Clement existió menor pérdida de energía al utilizar un diámetro mayor, conduciendo el mismo gasto dadas las condiciones de operación; mientras que en el método por Turnos, la pérdida de energía es mayor y al someterse a un tandeo riguroso de operación se puede conducir el mismo gasto con un diámetro mayor (Cuadro 1).

El costo del sistema por el método de Turnos es menor que el del método de Clement en \$1 513 583.83, lo cual representa una diferencia del 22%. Esto, se debe principalmente a que hay un requerimiento de tubería con distintos diámetros en cada método; así para el primer método se ocuparon diámetros de tubería de 160 a 400 mm para su funcionamiento, mientras que para el segundo método se emplearon diámetros de 160 a 450 mm (Cuadro 2 y 3), confirmado esto por Monserrat *et al.* (2012), con la ventaja del método de Clement en que el agricultor decide el momento y lámina de riego.

Tarjuelo *et al.* (2006) compararon el método de Clement con la generación de curvas aleatorias de demanda diaria (CADD) y comprobaron que el primer método sobreestima el caudal en la cabecera de la red de un 35 a 40%, tal y como resultó en el presente estudio. En contraparte tiene la ventaja de originar sistemas con mayor capacidad de conducción, lo que

incrementa la flexibilidad en el sistema de riego y mejora la velocidad de respuesta en el suministro de agua.

El estudio mostró la evaluación de costos de acuerdo a la SHCP (2012), cumpliendo para ambos métodos de diseño con los parámetros necesarios para ser métodos rentables, mediante un VPN mayor a cero y una TIR mayor al 12% (Cuadro 4). Por tanto, lo que definirá al método de diseño son las condiciones económicas, sociales y de operación del sistema.

En lo que se refiere a la operación del sistema, el método de Turnos presentó mayor costo comparado con el método de Clement, debido a un mayor consumo de energía eléctrica derivado de una mayor demanda de potencia (175 HP) en el equipo de bombeo para la operación del sistema, mientras que para el método de Clement se requieren 150 HP. En cuanto al mantenimiento y reparación del sistema, se observó que en el diseño utilizando el método de Clement los costos fueron mayores en comparación al diseño con el método de Turnos, debido a que con el método de Clement se requirió de diámetros de tubería más grandes. El método a emplear está relacionado con la disponibilidad de agua, las condiciones sociales y económicas, y las restricciones de distribución del sistema, como lo menciona Holzapfel *et al.* (2009).

Por lo anterior, el método de diseño por Clement se recomienda en sistemas de riego a hidrante parcelario con bombeo donde se disponga de apoyos económicos para la inversión inicial, tales como programas de tecnificación del riego, donde el gobierno o estado aporta un porcentaje del costo del sistema, y solo se consideren costos de operación, mantenimiento y reparaciones; en contraparte, el método de diseño por Turnos se recomienda en sistemas de riego a hidrante parcelario sin bombeo, cuando se tengan pocos usuarios y se consideren deban absorber todos los costos del sistema de riego; además de ser una alternativa factible gracias a la gestión automática aplicada a las redes

Cuadro 5. Evaluación de costos inversión, operación, mantenimiento y reparaciones de los métodos de Turnos y Clement.

Método	Con inversión inicial		Sin inversión inicial	
	VPC	CAE	VPC	CAE
	\$			
Turnos	10 855 729.15	1 347 669.92	5 447 441.47	676 265.31
Clement	12 277 653.57	1 524 192.82	5 355 782.07	664 886.38

de distribución que permite superar el problema de coordinación entre los hidrantes al momento de regar, tal y como lo señala Monserrat *et al.* (2012); confirmando que en cuanto más rigidez experimenta la demanda los diseños serán más económicos.

CONCLUSIONES

- El diseño hidráulico del sistema de riego, aplicando el método por Turnos genera mayores pérdidas de energía, por lo que requiere diámetros de tubería menores con respecto al diseño del sistema de riego usando el método de Clement, éste último origina sistemas con mayor capacidad de conducción, lo que incrementa la flexibilidad en el sistema de riego y mejora la velocidad de respuesta en el suministro de agua.

- Al considerar los costos de inversión inicial, operación, mantenimiento y reparaciones, el valor presente del costo total del proyecto y el costo anual equivalente fueron menores al usar el método de diseño por Turnos que los obtenidos en el método de Clement. Sin embargo, al considerar únicamente los costos de operación, mantenimiento y reparaciones, el valor presente del costo total del proyecto y costo anual equivalente fueron menores al usar el método de Clement; este último generó un costo de inversión inicial mayor al tener un sistema con más capacidad de conducción, pero, a mediano y largo plazo los costos de operación se reducen en forma significativa. Además, proporciona una mayor flexibilidad en el funcionamiento hidráulico, por lo que dicho método resulta ser más conveniente para el diseño de los sistemas de riego, especialmente para aquellos diseños donde los usuarios reciben apoyos económicos para su implementación, donde el método de Clement es la mejor opción.

LITERATURA CITADA

- Ángeles M., V. 2000. Diseño agronómico de sistemas de riego presurizado (aspersión, microaspersión y goteo). Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México.
- Catalán V., E. A. y M. M. Villa C. 2009. Sistema experto para el manejo eficiente del riego parcelario. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID RASPA). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Durango, México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2008. Estadísticas del agua en México. Edición 2008. SEMARNAT. México, D. F.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. Roma, Italia.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2010. CROPWAT 8 (freedownloadmanager.org.). Land and Water Development Division of FAO. Roma, Italia.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM. México, D. F.
- Herwin, E. C. 1981. The economics of irrigating field vegetables in the United Kingdom. *Acta Hort.* (ISHS) 119: 381-384.
- Holzapel, E. A., X. Pardo, V. P. Pardo, A. Rodríguez, X. Orrego y M. A. López. 2007. Análisis técnico-económico para selección de aspersores. *Rev. Brasil. Eng. Agric. Amb.* 11: 557-563.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2009. ERIC III. Extractor rápido de información climatológica, Versión 2.0. México.
- Lorite, I., E. A. Holzapel y A. Pannunzio. 2009. Sistemas de riego. pp: 13-26. *In:* A. Fernández, E. Holzapel, I. Del Callejo y M. Billib. (eds.). Proyecto KASWARM. Manejo sostenible del agua para riego en Sudamérica. Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-987-25074-1-1.
- Monserrat V., J., A. Alduán, L. Cost R. y J. Barragán F. 2012. ¿Turnos o demanda? en el proyecto de redes de distribución de riego a presión. Universidad de Lérida. Cataluña, España. <http://hdl.handle.net/10459.1/45935>. (Consulta: marzo 20, 2012).
- Pannunzio, A. 2009. Estudios de sustentabilidad de los sistemas de riego por goteo en arándanos en el norte de Buenos Aires. p. 95-118. *In:* A. Fernández Cirelli, E. Holzapel, I. del Callejo y M. Billibi (eds.). Manejo sostenible del agua para riego en Sudamérica. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Peña P., E. 2007. Tecnificación del riego presurizado. pp: 1-89. *In:* B. León Mojarro y B. D. Robles R. (eds.). Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México. ISBN 9689513044.
- Planells, P., F. J. Ortega, M. Valiente, J. Montero y J. M. Tarjuelo. 1999. Criterios para el diseño de redes colectivas de riego. *Ing. Agua* 6: 27-36.
- Rodríguez V., K., O. A. Fuentes M., M. R. Jiménez M. y F. Luna C. 2006. Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético multiobjetivo. VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de abastecimiento urbano de agua. João Pessoa, Brasil. [http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoD%20\(3\).pdf](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoD%20(3).pdf). (Consulta: marzo 24, 2012).
- SHCP (Secretaría de Hacienda y Crédito Público). 2012. Metodología para la evaluación de proyectos de construcción de infraestructura hidroagrícola. SHCP. México, D. F. www.hacienda.gob.mx. (Consulta: marzo 22, 2012).
- Tarjuelo, J. M., M. A. Moreno, P. Planells y J. F. Ortega. 2006. Presión y caudal necesarios en cabecera de redes de riego a la demanda según la calidad de servicio deseada. Taller: Políticas y estrategias para el uso del agua en la agricultura en Iberoamérica. http://ceer.isa.utl.pt/cyted/mexico2006/tema%203/20_JMTarjuelo_Espana.pdf (Consulta: marzo 24, 2012).

Tun-Dzul, J. de la C., G. Ramírez-Jaramillo, I. Sánchez-Cohen, C. T. Lomas-Barrié y A. de J. Cano-González. 2011. Diagnóstico y evaluación de sistemas de riego en el distrito 048 Ticul, Yucatán. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1: 5-18.

WCADI (Weizmann Computer Aided Design Irrigation). 2008. Software para diseño de sistemas de riego automático WCADI 2008. Zichron Ya'acov, Israel.

Propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo con biofertilización cultivado con manzano

Physical, chemical and biological soil properties with biofertilization in apple orchards

Alfonso Luis Orozco Corral^{1‡}, Martha Irene Valverde Flores², René Martínez Téllez³, Carlos Chávez Bustillos⁴ y Ramón Benavides Hernández⁴

¹ Departamento de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Grupo La Norteña. Km. 98.5 Carretera Chihuahua-Cuauhtémoc, Fracc. Real del Monte. 31552 Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

[‡] Autor responsable (alfonsoorozco@gpoln.com)

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Sierra de Chihuahua. 31500 Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

³ Departamento de Soporte Técnico, ⁴ Departamento de Biotecnología. Grupo La Norteña. Km. 98.5 Carretera Chihuahua-Cuauhtémoc. Fraccionamiento Real del Monte. 31552 Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

RESUMEN

La producción de manzana en Chihuahua, México, juega un papel fundamental en el sector primario, donde actualmente existen 30 000 ha plantadas y 2500 productores, es el cultivo más intensivo en la zona genera 3.5 millones de jornales anuales y representa el 71% de la producción nacional. La baja fertilidad de los suelos es un hecho que golpea a estas áreas, las cuales se han visto afectadas por el uso excesivo de fertilizantes químicos lo que ha ocasionado altos índices de contaminación, aumento de la compactación y la salinidad, disminución de la materia orgánica y el decremento de la microbiología de los suelos, impactando negativamente en el rendimiento, calidad de fruto y la rentabilidad. En busca de la sustentabilidad, se ha tratado de sustituir el uso de agroquímicos por productos orgánicos, pero en la producción de manzana no existe información para un manejo orgánico agroecológico propio de la región manzanera más importante de México. El objetivo del presente trabajo fue medir los efectos de la aplicación combinada de biofertilización y fertilización química, sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. El estudio se realizó en los ciclos 2012-13, 2013-14 y 2014-15 en una plantación de manzanos (*Malus domestica* Borkh) cv. Golden Supreme, en el municipio de Guerrero, Chihuahua. Se establecieron dos tratamientos: T-1 (biofertilización + fertilización química) donde se aplicó el 50% de biofertilizante y 50% de fertilizante químico; T-2 fertilización química, siendo el testigo y representando el manejo tradicional del productor. En cada ciclo, ambos tratamientos tuvieron aplicaciones de 6 Mg ha⁻¹ de

lombricomposta y 30 Mg ha⁻¹ de aserrín de pino como acolchado orgánico. Los resultados mostraron que en T-1, la combinación de biofertilización y fertilización química, lombricomposta y aserrín de pino como acolchado influyó positivamente sobre la capacidad de almacenamiento de agua en un 10.36%, la capacidad de intercambio catiónico (83.05%), la materia orgánica (24.41%) y la biomasa microbiana del suelo (113.99%), mientras que en T-2 los porcentajes fueron menores. El conjunto de beneficios aportados por el biofertilizante líquido, lombricomposta y aserrín de pino como acolchado, significó un aumento de la fertilidad del suelo.

Palabras clave: *microorganismos del suelo; materia orgánica del suelo; capacidad de intercambio catiónico.*

SUMMARY

Apple production in Chihuahua, Mexico, has a fundamental role in the primary sector. Today, apple orchards cover 30 000 hectares, and 2500 farmers are dedicated to apple-growing. It is the most intensive crop in the region; it accounts for 71% of domestic production and generates 3.5 million jobs annually. Low soil fertility is a fact that negatively impacts these areas affected by overuse of chemical fertilizers, which has resulted in high levels of pollution, increased compaction and salinity, decline in soil organic matter and decrease in soil microbiology, reducing yield, fruit quality and profitability. In search of sustainability, attempts have been made to replace agrochemicals with organic products. However, in apple production there

Cómo citar el artículo:

Orozco Corral, A. L., M. I. Valverde Flores, R. Martínez Téllez, C. Chávez Bustillos y R. Benavides Hernández. 2016. Propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo con manzano biofertilizado. *Terra Latinoamericana* 34: 441-456.

Recibido: noviembre de 2015. Aceptado: junio de 2016.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 34: 441-456.

is no information on proper organic agroecological management for the most important apple growing region of Mexico. This study was conducted during the production cycles 2012-13, 2013-14 and 2014-15 in apple orchards (*Malus domestica* Borkh) cv. Golden Supreme in the municipality of Guerrero, Chihuahua. Two treatments were established: T-1 (biofertilization + chemical fertilizer) where 50% biofertilizer and 50% chemical fertilizer was applied; T-2 (chemical fertilizer), the control treatment, representing traditional farmer management, was application of chemical fertilizer. In each cycle, both treatments had applications of 6 Mg ha⁻¹ vermicompost and 30 Mg ha⁻¹ pine sawdust as organic mulch. The objective of this study was to measure the effects of the combined application of biofertilizer and chemical fertilization on the physical, chemical and biological soil properties. Results showed that T-1, the combination of biofertilization and chemical fertilization, vermicompost and pine sawdust as mulch, had a positive effect on water storage capacity (10.36%), cation exchange capacity (83.05%), soil organic matter (24.41%) and soil microbial biomass (113.99%), relative to T-2. The range of benefits provided by the liquid bio-fertilizer, vermicompost and pine sawdust as mulch resulted in increased soil fertility.

Index words: *soil microorganisms; soil organic matter; cation exchange capacity.*

INTRODUCCIÓN

La fruticultura en la región manzanera de Chihuahua, que comprende los municipios de Cuauhtémoc, Guerrero, Cusihuirachi, Carichi, Namiquipa, Bachíniva y Casas Grandes, juega un papel fundamental en el sector primario al ser el cultivo más intensivo y que más empleo genera en el estado, contribuyendo al desarrollo socioeconómico, la seguridad y soberanía alimentaria de México. Sin embargo, en la última década el rendimiento, la calidad de fruto y la rentabilidad se han visto afectadas por el uso excesivo de los fertilizantes de síntesis (Monge *et al.*, 2006), lo que ha ocasionado altos índices de contaminación, aumento de la compactación, incremento de las sales, disminución de la materia orgánica y el decremento de la biodiversidad de los suelos (Harris y Bezdicek, 1994).

Debido a que el uso de fertilizantes químicos a largo plazo ha demostrado tener efectos perjudiciales sobre la estructura del suelo y su salud, lo que con lleva a la erosión y rendimientos bajos. El uso excesivo de los fertilizantes altera el equilibrio natural del suelo y puede quemar químicamente las raíces de las plantas (Hawes *et al.*, 2003).

El nitrógeno es considerado el nutriente mas limitante para el crecimiento de las plantas en su ambiente natural (Baca *et al.*, 2000). El nitrógeno presente en la atmosfera es la reserva más grande en la naturaleza, sin embargo, no es utilizado por las plantas directamente, su asimilación necesita de un proceso de reducción que es realizado solamente por microorganismos, los cuáles son capaces de realizar la fijación en el ciclo del nitrógeno (Baca *et al.*, 2000).

De forma natural existen dos maneras de fijar nitrógeno, mediante abundante energía lumínica para la formación de nitritos (NO₂) y nitratos (NO₃) los cuales son llevados al suelo. Esto contribuye con el 10% de la producción total anual de nitrógeno fijado (Fisher y Newton, 2002). La otra y la más importante se deriva de la actividad microbiana selecta del suelo, donde los microorganismos absorben el nitrógeno atmosférico y lo convierten en amonio (NH₄). Algunos microorganismos se encuentran libres en el suelo y se alimentan de materia orgánica, otros se encuentran creciendo en asociación con las raíces y otros establecen simbiosis con plantas, donde la planta le da energía para crecer mientras que la bacteria le provee nitrógeno. Estos procesos biológicos contribuyen con el 65% de la producción total anual de nitrógeno fijado (Fisher y Newton, 2002).

El uso indiscriminado de fertilizantes químicos ha causado pérdidas en la productividad de los suelos donde se realizan prácticas agrícolas incorrectas, las cuales ocasionan la degradación de propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo (Carvajal y Mera, 2010).

El exceso de fósforo puede interferir con la absorción de micronutrientes, como el zinc y hierro, así mismo, el exceso de potasio en forma de potasa aumenta el pH del suelo, lo que causa una mala absorción de nutrientes (Stevenson y Cole, 1999).

Los efectos negativos del uso de fertilizantes de síntesis en el medio ambiente son indiscutibles, los productos químicos que se encuentran en los fertilizantes, como nitratos y fosfatos, contaminan

acuíferos y cuerpos de agua superficiales (Orozco-Corral y Valverde-Flores, 2012).

La biofertilización es una tecnología en expansión que está vinculada con la inclusión de microorganismos al suelo, siendo de gran importancia para el desarrollo de cultivos obteniendo mayores rendimientos, inocuos, de mejor calidad fitosanitaria, a su vez aumentar el contenido de materia orgánica del suelo (Da Silva *et al.*, 1999).

El uso de biofertilizantes ha tomado cada vez más fuerza, ya que originan procesos rápidos, consumen poca energía, no contaminan el medio ambiente, incrementan la fertilidad del suelo y proporcionan protección frente a microorganismos fitopatógenos, al aportar microorganismos benéficos que ayudan a mantener un equilibrio ecológico por medio de la liberación de nutrientes inorgánicos aumentado la fertilidad de los suelos de cultivo (Carvajal y Mera, 2010).

El recurso suelo es complejo de estudiar y analizar, debido a su complejidad estructural y carencia de métodos eficientes para su evaluación, especialmente en lo que se refiere al ecosistema microbiológico. Actualmente, un elemento central del estudio de los suelos es la evaluación de su calidad, donde las propiedades microbiológicas han mostrado ser de gran relevancia, ya que influyen directamente con las diversas funciones del suelo, por lo que una alteración de éstas, puede desencadenar cambios drásticos en las propiedades físicas y químicas del suelo (Di Giovanni *et al.*, 1999; Stenberg, 1999; Widmer *et al.*, 2001).

En la última década se han incrementado los estudios de la microbiología de los suelos debido fundamentalmente, a que se ha reconocido su importancia en los ecosistemas microbiológicos edáficos, por lo que su análisis permitiría el monitoreo y predicción de los cambios en la calidad del suelo. Sin embargo, este análisis estructural no ha podido llevarse a cabo por la falta de información sobre la biodiversidad de estos ecosistemas (Torsvik *et al.*, 1980; Torsvik *et al.*, 1990).

Los estudios microbiológicos del suelo son a menudo subvalorados por su complejidad, dejándolos en desventaja respecto a los análisis de las propiedades físicas y químicas. Sin embargo, éstos últimos no han permitido explicar que las alteraciones en la calidad del suelo responden principalmente a sus cambios microbiológicos (Widmer *et al.*, 2001).

Los microorganismos presentes en el suelo son factores clave en los ciclos de la mayoría de los nutrientes, especialmente en el ciclo del carbono, nitrógeno, azufre y fósforo. En el caso del ciclo del carbono, son responsables de la descomposición de residuos orgánicos y de la degradación de compuestos orgánicos contaminantes presentes en el suelo, siendo muy frecuente la utilización de biofertilizantes como enmiendas orgánicas para su activación o repoblación (Ros *et al.*, 2010). La energía presente en el ecosistema del suelo deriva, entre otros compuestos, de esa descomposición de la materia orgánica por los microorganismos (Pepper y Gerba, 2005). Otra de las funciones importantes de las bacterias es la secreción de sustancias adherentes en forma de polisacáridos que ayudan en la formación de micro y macroagregados que proporcionan estabilidad a la estructura del suelo (Voroney, 2007).

Las bacterias presentan otras características importantes. Una de ellas es la capacidad de producir antibióticos. La finalidad de la producción de antibióticos presumiblemente es la de competir y señalar su presencia a patógenos (Davies, 2006). Los actinomicetos producen antibióticos como eritromicina, neomicina, tetraciclina, anfotericina y estreptomycin. Las bacterias del género *Bacillus* producen polimixina y bacitracina (Killham y Prosser, 2007).

Los biofertilizantes ejercen una acción fitosanitaria ya que producen una colonización de microorganismos benéficos que compiten contra patógenos que están en el suelo, por lo cual son útiles para control biológico de enfermedades (Bashan, 1986; DeLucca *et al.*, 1990; Linderman, 1993; Pérez *et al.*, 2000; Zago *et al.*, 2000).

La sustentabilidad de los sistemas agrícolas a largo plazo debe fomentar el uso y manejo efectivo de los recursos naturales de los agroecosistemas. En este sentido, los biofertilizantes son un componente vital de los sistemas sustentables, ya que constituyen un medio económicamente atractivo y ecológicamente aceptable de reducir el uso de los fertilizantes de síntesis y de mejorar la cantidad y calidad de los recursos naturales. Para ello, se hace imprescindible adoptar una estrategia de suministro de nutrientes a los cultivos mediante biofertilizantes líquidos, todo ello dentro del marco de la sustentabilidad, tendencia surgida en contraposición a la Revolución Verde, para reducir los daños causados al ambiente, a la salud del hombre y los animales por los métodos irracionales que se han empleado en las últimas décadas (Alins *et al.*, 2013).

Debido a lo anterior, la obtención de biofertilizantes, bioestimuladores del crecimiento y bioplaguicidas de origen microbiano y botánico, constituyen pilares básicos para un manejo sustentable, productivo y económicamente viable de la fruticultura en México (Dibut Alvarez y Martínez Viera, 2013).

Por lo que el objetivo en este trabajo fue medir efectos de la aplicación combinada de biofertilización y fertilización química, sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se evaluó la aplicación de biofertilizantes por fertirriego en plantaciones de manzano. El estudio se realizó en los ciclos 2012-13, 2013-14 y 2014-2015 en una plantación de manzanos (*Malus domestica* Borkh) cv. Golden Supreme sobre portainjerto Malling 7 (M-7), con 27 562 árboles, establecida en 2002, con un marco de plantación de 2 x 4.75 m (1052 árboles ha⁻¹), bajo un sistema de riego por microaspersión, ubicada en el municipio de Guerrero, Chihuahua, México, 28° 28' 18.44" N, 107° 12' 8.52" O, con una superficie total de 26.2 ha.

Se establecieron dos tratamientos, el tratamiento 1 (T-1) donde se aplicó biofertilizante y 50% de fertilizantes químicos en una superficie de 15.8 ha. El tratamiento 2 (T-2) fue el testigo, representando el manejo tradicional del productor, donde se aplicó solamente la fertilización química en una superficie de 10.4 ha (Figura 1).

El biofertilizante utilizado fue un consorcio de microorganismos benéficos (*Azotobacter vinelandii*, *Clostridium pasteurianum*, *Rhizobium etli*,



Figura 1. Mapa de la zona de estudio donde se muestran los tratamientos y las zonas de muestreo.

Pseudomona fluorescens, *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*, *Azospirillum brasilense*, *Actinomyces* spp. y *Lactobacillus* spp.), aminoácidos, enzimas, ácidos húmicos y fúlvicos, con aporte de macro y micro elementos minerales (Cuadro 1).

Los fertilizantes químicos utilizados para los tratamientos se muestran en el Cuadro 2.

El T-1 (Cuadro 3), consistió en la aplicación de fertilizantes de síntesis y biofertilizantes. La fertilización química se efectuó en una sola aplicación en postcosecha antes de entrar en dormancia en el mes de noviembre en cada ciclo (2012-13, 2013-14 y

Cuadro 1. Insumos para la elaboración de 10 000 litros de biofertilizante en biorreactores y su costo por litro.

Insumos	Cantidad	Precio unitario	Costo
		----- \$ -----	
Inoculos bacterianos	20 L	200.00	0.4000
Melaza	400 L	2.50	0.1000
Suero de leche	50 L	2.00	0.0100
Algas marinas	20 L	100.00	0.2000
Harina de trigo	10 kg	7.30	0.0073
Hidrolizado de pescado	20 L	50.00	0.1000
Silicio	30 kg	22.70	0.0681
Tierras diatomeas	10 kg	4.50	0.0045
Roca basáltica	20 kg	1.90	0.0038
Roca fosfórica	10 kg	3.50	0.0035
Leonardita	20 kg	5.50	0.0110
Hidróxido de potasio	100 kg	20.50	0.2050
Salvado de trigo	100 kg	3.87	0.0387
Levadura	9 kg	78.00	0.0702
Lombricomposta	200 kg	2.00	0.0400
Lixiviado de lombriz	1000 L	1.00	0.1000
Cenizas	25 kg	1.00	0.0025
Vinagre	1000 L	1.00	0.1000
Harina de jaiba	20 kg	13.50	0.0270
Aminoácidos	20 L	200.00	0.4000
Sulfato de magnesio	10 kg	3.50	0.0035
Sulfato de manganeso	10 kg	17.00	0.0170
Sulfato de cobre	10 kg	37.00	0.0370
Sulfato ferroso	10 kg	18.00	0.0180
Sulfato de zinc	10 kg	14.00	0.0140
Harina de sangre	10 kg	7.00	0.0070
Costo litro ⁻¹			\$1.99
Costo anual ha ⁻¹ (800 L)			\$1,592.00

Cuadro 2. Fertilizantes químicos y su costo.

Fertilizante químico	Precio unitario	Dosis kg ha ⁻¹	Costo FQ	
			Otoño	Primavera
Sulfato de amonio	\$4.22	53	\$223.66	\$223.66
Fosfato diamónico	\$7.95	50	\$397.50	\$397.50
Sulfato de potasio	\$11.70	50	\$585.00	\$585.00
Micro mix II Ca-Mg	\$80.00	25	\$2000.00	\$2000.00
Azufre	\$6.32	25	\$158.00	\$158.00
Costo aplicación ha ⁻¹		203	\$3364.16	\$3364.16

2014-2015), su aplicación fue en círculo a un metro del tronco del árbol para ello se mezclaron previo a su aplicación, 53 kg de sulfato de amonio [(NH₄)₂SO₄], 50 kg de fosfato diamónico [(NH₄)₂HPO₄], 50 kg de sulfato de potasio (K₂SO₄), 25 kg de azufre granulado y

Cuadro 3. Dosificación y fechas de aplicación de los tratamientos establecidos.

Fechas de aplicación	T-1 (BF + FQ)		T-2 (FQ)
	Fertilización química kg ha ⁻¹	Biofertilización L ha ⁻¹	Fertilización química kg ha ⁻¹
Nov-2012	203	100	203
Enero-2013	-	100	-
Abril-2013	-	100 / 100	203
Mayo-2013	-	100	-
Junio-2013	-	100	-
Julio-2013	-	100 / 100	-
Nov-2013	203	100	203
Enero-2014	-	100	-
Abril-2014	-	100 / 100	203
Mayo-2014	-	100	-
Junio-2014	-	100	-
Julio-2014	-	100 / 100	-
Nov-2014	203	100	203
Enero-2015	-	100	-
Abril-2015	-	100 / 100	203
Mayo-2015	-	100	-
Junio-2015	-	100	-
Julio-2015	-	100 / 100	-
Total	609	2400	1218

25 kg de micro mix II Ca-Mg®, para una dosificación de 203 kg ha⁻¹ (193 g árbol⁻¹). Para la biofertilización se realizaron ocho aplicaciones por fertirriego en cada ciclo, a una dosis de 100 L ha⁻¹, dichas biofertilizaciones se programaron de la siguiente manera: una antes de la dormancia (noviembre), una durante la dormancia (enero), dos en floración (abril), una en plena floración (mayo), una en postfloración (junio) y dos en desarrollo de fruto (julio).

El T-2 (Cuadro 2), consistió solamente en fertilización química, efectuándose en dos ocasiones en cada ciclo (2012-13, 2013-14 y 2014-2015), una en postcosecha antes de entrar en dormancia en noviembre y otra en abril durante la brotación, su aplicación fue en círculo a un metro del tronco del árbol. Se aplicaron 53 kg de sulfato de amonio [(NH₄)₂SO₄], 50 kg de fosfato diamónico [(NH₄)₂HPO₄], 50 kg de sulfato de potasio (K₂SO₄), 25 kg de azufre granulado y 25 kg de micro mix II Ca-Mg® (complejo de microelementos); todos ellos fueron mezclados previamente, su dosificación fue de 203 kg ha⁻¹ (193 g árbol⁻¹).

En ambos tratamientos se aplicaron 6 Mg ha⁻¹ de lombricomposta en banda (Figura 2), en cada ciclo agrícola (2012-13, 2013-14 y 2014-2015) en el mes de enero (Cuadro 4).

En el mes de enero del ciclo agrícola 2014-15 se aplicaron, en ambos tratamientos, 30 Mg ha⁻¹ de aserrín de pino como acolchado orgánico (Cuadro 4), con un espesor de 30 cm y un metro de ancho a cada lado del centro de la línea de árboles, cubriendo la lombricomposta (Figura 3).

Para el análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo se tomaron cuatro muestras antes del inicio, durante y después de los tratamientos en el mes de septiembre de 2012, 2013, 2014 y 2015, dos



Figura 2. Aplicación de lombricomposta en banda.

Cuadro 4. Aplicación de lombricomposta y de acolchado de aserrín de pino en los tratamientos establecidos.

Fechas de aplicación	T-1 (BF + FQ)	T-2 (FQ)
	Lombricomposta	
	----- Mg ha ⁻¹ -----	
Enero 2013	6	6
Enero 2014	6	6
Enero 2015	6	6
Total	18	18
	Aserrín	
Enero 2015	30	30

muestras de suelo sobre la línea de árboles y dos entre líneas, a una profundidad de 0-20, 20-40 y 40-60 cm, se mezclaron homogéneamente para formar una sola muestra para cada profundidad y se realizaron cuatro repeticiones. Se determinaron las propiedades físicas: punto de saturación (PS), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), humedad aprovechable (HA), densidad aparente (Da) por el método de cilindro, porosidad (Po), velocidad de infiltración (Vi) por el método de anillo infiltrómetro y la clase textural por el método del densímetro de Bouyoucos.

Mediante análisis de laboratorio se determinaron las propiedades químicas: porcentaje de materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black, la conductividad eléctrica (CE) por el método conductivimétrico en extracto de saturación expresado en dS m⁻¹, el pH en H₂O y en cloruro de potasio (KCl) mediante los métodos AS-02 y AS-04, siguiendo

la NOM-21-RECNAT-2000, el porcentaje de cationes o bases intercambiables Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺ y Na⁺ y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) expresado en meq 100 g⁻¹ de suelo por el Método de Versanato.

Para la determinación de los macroelementos totales (K, Ca, Mg y Na) el método utilizado fue por absorción atómica previa extracción en una solución de acetato amónico 1N a pH 7 y son expresados en ppm. Del mismo modo, utilizando el método por absorción atómica previa extracción con DTPA, se determinó la disponibilidad en ppm de los microelementos Fe, Zn, Mn, Cu y B. El método del Sulfato de Brucina se utilizó para la determinación del nitrógeno como nitrato (N-NO₃) expresado en kg ha⁻¹. Para el P se utilizó el método Bray y Kurtz P-1, siendo expresados en mg kg⁻¹. El azufre como sulfato (S-SO₄) fue extraído mediante la solución de fosfato de calcio. El método turbidimétrico se utilizó para el S. El B fue determinado mediante el Método de la Curcumina. En ambos casos su absorbancia fue medida por colorimetría y su expresión es en mg kg⁻¹.

El biofertilizante se elaboró mediante un proceso de fermentación en biorreactores de 10 000 L (Figura 4), con oxigenación constante, utilizando cepas de microorganismos benéficos, productos orgánicos de origen animal y vegetal (Cuadro 1).

El biofertilizante fue sometido a análisis químico (Cuadro 5) y se determinó el contenido porcentual de los macronutrientes (N, P, K, Ca y Na), así como también el contenido de micronutrientes (Fe, Zn, Mn y Cu) expresados en mg L⁻¹ y las propiedades químicas de MO y pH expresados en porcentaje y la CE en dS m⁻¹, siguiendo la metodología establecida en la NOM-21-RECNAT-2000.



Figura 3. Aplicación de aserrín de pino como acolchado.



Figura 4. Biorreactores para la elaboración de biofertilizantes.

Cuadro 5. Análisis químico y nutricional del biofertilizante.

Macronutrientes					Micronutrientes					Propiedades químicas		
N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu	MO	CE	pH
----- % -----					----- mg L ⁻¹ -----					----- % -----		
0.325	0.010	0.172	0.216	0.004	0.032	7.75	12.10	56.90	11.80	1.86	4.10	5.45

MO = materia orgánica; CE = conductividad eléctrica.

El biofertilizante también fue analizado en su contenido microbiológico (Cuadro 6), para lo cual se utilizaron laboratorios especializados y medios de cultivo específicos. La evaluación de la densidad de poblaciones de bacterias fijadoras de N (BFN), solubilizadoras de P (BSP) y generadoras de antibiosis (BGA), se realizó con el método de conteo de células vivas por siembra en superficie (Madigan *et al.*, 2004). Se utilizaron diluciones seriadas con base en 10, se diluyeron 10 g del biofertilizante en 90 ml de agua estéril, hasta 1×10^{-6} . Se tomó 0.1 ml de cada dilución y se colocó en el centro de la caja de petri con medios de cultivos sólidos específicos, distribuyéndose con espátula trigalsqui. Las muestras se incubaron a temperatura de 27 °C durante 24-72 h. El procedimiento se realizó por triplicado. El conteo de células viables se realizó contando las UFC mL⁻¹ que crecieron en la superficie del medio de cultivo con contador de colonias Darkfield Quebec.

Para el análisis microbiológico del suelo, se colectaron cuatro muestras de suelo en cada horizonte de 0-20, 20-40 y 40-60 cm, antes del inicio, durante y después de los tratamientos en el mes de septiembre de 2012, 2013, 2014 y 2015, dos muestras de suelo sobre

la línea de árboles y dos entre líneas, se mezclaron las muestras de cada horizonte para formar una sola muestra homogénea para cada profundidad y se realizaron cuatro repeticiones. La evaluación de la densidad de poblaciones de BFN, BSP y BGA, se realizó con el método de conteo de UFC. Se utilizaron diluciones seriadas con base en 10, se diluyeron 10 g del suelo en 90 ml de agua estéril, hasta 1×10^{-6} . Se tomó 0.1 mL de cada dilución y se colocó en el centro de la caja de petri con medios de cultivos sólidos específicos. Las muestras se incubaron a temperatura de 27 °C durante 24-72 h. El procedimiento se realizó por triplicado. El conteo de células viables se efectuó contando las UFC ml⁻¹ que crecieron en la superficie del medio de cultivo con un contador de colonias Darkfield Quebec, luego se transformó a UFC g⁻¹ de suelo.

La cuenta en placa de los coliformes fecales se realizó con apego a la metodología propuesta en las Normas Oficiales Mexicanas NOM-112-SSA1-1994, NOM-113-SSA1-1994, NOM-114-SSA1-1994 y NOM-143-SSA1-1995.

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el programa SPSS versión 15.0. Los resultados de las propiedades físicas y químicas se analizaron mediante

Cuadro 6. Análisis microbiológico del biofertilizante.

Microorganismo	Función	UFC ml ⁻¹
<i>Azotobacter vinelandii</i>	Fijación de nitrógeno	1×10^9
<i>Azospirillum brasilense</i>	Fijación de nitrógeno	1×10^6
<i>Rhizobium etli</i>	Fijación de nitrógeno	1×10^4
<i>Pseudomona fluorescens</i>	Fijación de N y solubilización de P	1×10^3
<i>Bacillus megaterium</i>	Solubilización de fósforo	1×10^3
<i>Bacillus subtilis</i>	Solubilización de fósforo	1×10^3
<i>Clostridium pasteurianum</i>	Antibiosis	1×10^3
<i>Lactobacillus</i> spp.	Antibiosis	1×10^8
<i>Actinomyces</i> spp.	Antibiosis	2×10^7
Coliformes fecales	Indeseables	Nulo

un análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias (DMS) con un nivel de significancia $P < 0.05$. El análisis estadístico de las propiedades microbiológicas comenzó con la transformación logarítmica (LOG 10) de los valores de UFC g^{-1} de suelo. Se comprobó la distribución normal (Kolmogorov-Smirnov). Se realizaron los análisis de las medidas de dispersión. Se comprobó la homogeneidad de las varianzas (Levene) y se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias (Tukey) con un nivel de significancia $P < 0.05$. Las correlaciones fueron calculadas utilizando el coeficiente R de Pearson.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el tratamiento 1 (T-1) hubo un incremento estadísticamente significativo ($P > 0.05$) de los valores al final del estudio de las siguientes variables: punto de saturación (PS), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), humedad aprovechable (HA) y la porosidad (Po). En el tratamiento 2 (T-2) no se observaron diferencias con significancia estadística. La velocidad de infiltración básica no presentó diferencias en T-1 y T-2 (Cuadro 7).

Los biofertilizantes pueden actuar mediante la síntesis de reguladores de crecimiento, como auxinas y giberelinas, que producen un aumento en el desarrollo de pelos radicales y en la densidad misma de la raíz, manifestándose en el aumento de la capacidad de absorción de agua y captación de nutrientes, dando a

la planta mayor viabilidad, productividad y resistencia a condiciones adversas como sequía (Saharan y Nehra, 2001).

De acuerdo con Brady y Weil (1999), las enmiendas orgánicas, tal y como se aplicó en los dos tratamientos por tres años, ayudan en la estabilidad de agregados, reducen la plasticidad, cohesión y pegajosidad de la arcilla, haciendo que los suelos sean laborables, con lo cual aumenta la capacidad de retención de agua. Los ácidos húmicos también atacan los minerales del suelo y aceleran su descomposición, aumentando nutrientes esenciales como cationes intercambiables. Influyen además en la biología del suelo al proveer alimento a los organismos del suelo.

La HA es una de las variables más importantes del suelo, ya que representa la capacidad de retención y almacenamiento de agua. En T-1 hubo un aumento significativo del 10.36% con respecto al inicio del experimento y en T-2 no se observan cambios con significancia estadística.

La Da representa la relación entre sólidos y espacio poroso del suelo. En T-1 hubo un decremento significativo de la Da del 9.42%, mientras que en T-2 no hubo cambios con significancia estadística.

La reducción de la porosidad del suelo repercute desfavorablemente sobre las propiedades físicas debido a una menor aireación del suelo, menor capacidad de infiltración de agua y dificultad para la penetración de las raíces. En T-1 se observó un incremento importante de la porosidad al final del estudio (9.26%), debido

Cuadro 7. Propiedades físicas del suelo al inicio y final del experimento en T-1 y T-2.

Propiedades físicas	T-1 (BF + F Q)		T-2 (FQ)	
	Inicio Octubre 2012	Final Septiembre 2015	Inicio Octubre 2012	Final Septiembre 2015
PS (%)	25.00 a [†]	27.50 b	26.00 a	25.50 a
CC (%)	13.11 a	14.47 b	13.65 a	13.38 a
PMP (%)	7.80 a	8.61 b	8.12 a	7.96 a
HA (%)	5.31 a	5.86 b	5.53 a	5.42 a
Da (gr cc ⁻¹)	1.38 a	1.27 b	1.41 a	1.45 b
Po (%)	43.20 a	47.20 b	42.40 a	40.60 b
Vi básica (mm h ⁻¹)	6.0 a	6.0 a	5.0 a	5.0 a
Textura	FA	FA	FA	FA

PS = punto de saturación; CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; HA = humedad aprovechable; Da = densidad aparente; Po = porosidad; Vi = velocidad de infiltración; FA = franco arenosa. [†] Letras iguales sobre las hileras son estadísticamente similares a DMS ($P > 0.05$).

Cuadro 8. Coeficientes de correlación entre las propiedades físicas del suelo y la materia orgánica del mismo.

Correlaciones	Coeficiente de correlación (R ²) [†]	
	T-1 (BF + FQ)	T-2 (FQ)
Da - PS	0.988	0.804
Da - CC	0.993	0.741
Da - PMP	0.977	0.793
Da - HA	0.980	0.827
Da - Po	0.942	0.778
Da - MO	0.996	0.827

Da = densidad aparente; PS = punto de saturación; CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; HA = humedad aprovechable; Po = porosidad; MO = materia orgánica. [†] Coeficiente de correlación R de Pearson ($P > 0.05$).

posiblemente a la acción estimuladora del crecimiento radicular del biofertilizante líquido y lombricomposta aplicados. En T-2 hubo un descenso de -4.25% respecto al inicial.

Se muestran en el Cuadro 8 los coeficientes de correlación (R²) de Da con las propiedades físicas del suelo y MO, donde se puede apreciar que las correlaciones fueron significativamente mayores en T-1 que en T-2. La disminución de Da tuvo efecto sobre las propiedades físicas del suelo, favoreciendo la capacidad de almacenamiento de agua y la porosidad.

Lo anterior es corroborado por Castellanos (1980, 1982) quien observó que el contenido de humedad aumenta debido a prácticas de aplicación de abonos orgánicos sólidos, ya que disminuye la densidad aparente; se incrementa la porosidad y se modifica

la estructura al mejorar la formación de agregados, todo ello influye en un aumento en la retención de humedad.

Las características químicas del suelo cambiaron significativamente en los dos tratamientos comparándolo en el estado inicial (Cuadro 9). En el T-1 hubo un aumento en el contenido de MO del suelo, mientras que en T-2 se dio un ligero descenso. En T-1 se observaron cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo, destacando el aumento de MO, CIC y el descenso del Na⁺ y K⁺ intercambiable con respecto al estado inicial del suelo. En T-2 los cambios en MO, Ca⁺⁺ y CIC mostraron un descenso, mientras que el K⁺ se vio aumentado, lo que es un reflejo de la pérdida de fertilidad.

Los resultados de MO observados en el T-1 a la profundidad de 0 a 30 cm reflejan la capacidad de los biofertilizantes líquidos y sólidos para incrementar la MO en el suelo. La importancia del incremento de MO en el suelo se hace evidente en este estudio, ya que ésta resulta fundamental en la búsqueda de la sustentabilidad en la agricultura (Johnston *et al.*, 2009) y el contenido adecuado en el suelo mejora la capacidad de amortiguamiento, enriquece la CIC, mejora la estructura evitando la erosión y permite el desarrollo de la microbiología benéficas (Aslantas *et al.*, 2007). Los resultados encontrados en el presente estudio tienen similitud con lo publicado por Salazar-Sosa *et al.* (2003), quienes reportaron incrementos de MO utilizando lombricomposta. Castellanos (1982) menciona que el 50% del estiércol es biodegradado en el primer año, lo cual provee MO en el suelo en predios donde se han aplicado los tratamientos de estiércol por años consecutivos.

Cuadro 9. Propiedades químicas del suelo al inicio y final del experimento en T-1 y T-2.

Propiedades químicas	T-1 (BF + FQ)		T-2 (FQ)	
	Inicio	Final	Inicio	Final
	Octubre 2012	Septiembre 2015	Octubre 2012	Septiembre 2015
MO (%)	1.27 a [†]	1.58 b	1.10 a	1.08 a
CE (dS m ⁻¹)	0.25 a	0.53 b	1.03 a	1.19 b
pH	6.50 a	7.17 b	6.50 a	5.27 b
Ca ⁺⁺ (%)	33.07 a	59.99 b	59.49 a	40.61 b
Mg ⁺⁺ (%)	10.16 a	24.37 b	13.89 a	12.29 b
K ⁺ (%)	32.26 a	8.22 b	7.47 a	9.96 b
Na ⁺ (%)	11.10 a	3.60 b	6.70 a	6.70 a
CIC (meq 100 g ⁻¹)	14.93 a	27.33 b	13.39 a	12.56 a

MO = materia orgánica; CE = conductividad eléctrica; pH = potencial hidrógeno; Ca⁺⁺ = calcio; Mg⁺⁺ = magnesio; K⁺ = potasio; Na⁺ = sodio; CIC = capacidad de intercambio catiónico. [†] Letras iguales son estadísticamente similares a DMS ($P > 0.05$).

Los cambios encontrados en la densidad aparente, la porosidad y la biomasa microbiana, proporcionan evidencias de que los biofertilizantes y mejoradores aplicados durante tres años consecutivos impactaron positivamente sobre el suelo, lo que concuerda con lo publicado por Del Pino *et al.* (2008), quien encontró que las compostas tuvieron un efecto benéfico en las propiedades físicas (infiltración, la agregación y la densidad aparente) y biológicas del suelo. Salazar *et al.* (2007) encontró resultados desfavorables sobre las propiedades químicas del suelo tras la aplicación de compostas, asegurando que los efectos residuales de la aplicación de composta favorecen la acumulación de P, nitratos (NO₃) y un incremento de la CE después de cuatro años bajo producción de maíz (Salazar *et al.*, 2007), concordando con los resultados encontrados en el T-1, donde hubo un incremento de la CE, del N-NO₃ y del P (Cuadros 9 y 10).

En T-1 el incremento del contenido de MO se reflejó en el aumento de los cationes intercambiables Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺, mientras que el K⁺ y Na⁺ se vieron disminuidos. En T-2 los cationes intercambiables Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺ bajaron, el K⁺ aumentó y en Na⁺ no hubo cambios.

Cuadro 10. Contenido de nutrientes del suelo al inicio y final del experimento en T-1 y T-2.

Nutrientes totales	T-1 (BF + FQ)		T-2 (FQ)	
	Inicio	Final	Inicio	Final
	Oct-2012	Sep-2015	Oct-2012	Sep-2015
N-NO ₃ (kg ha ⁻¹)	20.0 a	29.2 b	19.5 a	18.0 b
P (ppm)	56.0 a	113.8 b	74.1 a	76.4 b
K (ppm)	1100 a	426 b	196 a	222 b
Ca (ppm)	561 a	839 b	801 a	829 b
Mg (ppm)	103.4 a	156 b	112.2 a	556 b
Na (ppm)	216 a	92 b	104 a	109 b
Fe (ppm)	66.7 a	32.0 b	151.7 a	85.0 b
Zn (ppm)	9.0 a	8.0 b	7.8 a	8.4 b
Mn (ppm)	64.8 a	85.1 b	48.7 a	54.3 b
Cu (ppm)	2.90 a	3.3 b	6.7 a	2.7 b
B (ppm)	0.6 a	0.9 b	0.3 a	0.7 b
S-SO ₄ (ppm)	108 a	71 b	77 a	77 a

N-NO₃ = nitrógeno como nitrato; P = fósforo; K = potasio; Ca = calcio; Mg = magnesio; Na = sodio; Fe = fierro; Zn = zinc; Mn = manganeso; Cu = cobre; B = boro; S-SO₄ = azufre como sulfato. † Letras iguales son estadísticamente similares a DMS ($P > 0.05$).

El efecto que tuvo el incremento del contenido de MO sobre las propiedades químicas en T-1, se reflejó en el aumento de la CIC (Cuadro 9) y del contenido de nutrientes totales (Cuadro 10), favoreciendo la absorción de los minerales y en T-2 se observó un descenso.

Para Restrepo (1996), los principales aportes de las compostas bovinas al suelo son: retener, filtrar y liberar los nutrientes N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu y B, según la cantidad, mejoran las características físicas del suelo como la porosidad, densidad aparente, capacidad de retención de agua disponible, incrementa el contenido de MO, beneficia la aireación, corrige la acidez del suelo, multiplica la actividad microbiológica. El contenido de nutrientes totales del suelo, en T-1 fueron significativamente diferentes respecto a los valores iniciales, destacando el incremento de N-NO₃, P, Ca, Mg y Mn, la estabilización de K y el descenso del Na (Cuadro 10).

El incremento del contenido de MO en T-1, tuvo una alta correlación con el aumento de la CIC, macro y micronutrientes del suelo, mientras que en T-2 dicha correlación fue significativamente menor (Cuadro 11). los resultados coinciden con lo observado por López *et al.* (2001), quienes reportaron que el uso

Cuadro 11. Correlación entre la materia orgánica (MO) y el contenido de nutrientes del suelo.

Correlaciones	Coeficiente de correlación (R ²) [†]	
	T-1 (BF + FQ)	T-2 (FQ)
	MO - CIC	0.982
MO - N (NO ₃)	0.949	0.822
MO - P	0.985	0.485
MO - K	0.949	0.357
MO - Ca	0.996	0.497
MO - Mg	0.953	0.596
MO - Na	0.972	0.458
MO - Fe	0.921	0.343
MO - Zn	0.948	0.538
MO - Mn	0.939	0.721
MO - Cu	0.948	0.504
MO - B	0.976	0.667
MO - S (SO ₄)	0.966	0.333

MO = materia orgánica; N (NO₃) = nitrógeno como nitrato; P = fósforo; K = potasio; Ca = calcio; Mg = magnesio; Na = sodio; Fe = fierro; Zn = zinc; Mn = manganeso; Cu = cobre; B = boro; S (SO₄) = azufre como sulfato. † Coeficiente de correlación R de Pearson ($P > 0.05$).

de estiércoles incrementa el contenido de MO en un 15%. Salazar-Sosa *et al.* (2010), publicaron que el valor total de las compostas se debe a la aportación de nutrimentos y al incremento de MO del suelo, y Castellanos (1986) encontró resultados similares, ambos señalan que la adición de abonos orgánicos al suelo afecta positivamente la concentración de MO y otros elementos, igualmente Eghball *et al.* (2004), observaron un incremento de 3.5% de MO en suelos con N residual proveniente de compostas. Estos resultados evidencian que el incremento de MO obtenido en el T-1 (Cuadro 9), pudiera ser por el uso continuo y conjunto de lombricomposta, biofertilizante líquido y a la acción de los microorganismos sobre el acolchado orgánico de aserrín de pino, los cuales aceleraron su descomposición.

Los resultados anteriores también muestran que los abonos orgánicos son una alternativa para sustituir la fertilización inorgánica. Esto se debe a que los abonos orgánicos abastecen al suelo de nutrimentos como el N y los demás elementos esenciales que contiene la composta. Esto coincide con lo señalado por Castellanos *et al.* (1996) y Barber *et al.* (1992), quienes reportaron que los estiércoles se mineralizan un 70% a partir del primer año de aplicación y tienen un efecto residual en el suelo hasta por dos años y el resto se transforma en humus, que se incorpora al suelo y produce un efecto benéfico en la estructura del suelo durante el primer año.

Al inicio del ciclo 2012-13 y final del ciclo 2014-15, se pudo apreciar que en el T-1 hubo un aumento significativo en las bacterias benéficas (Cuadro 12). En el T-2 se observó que no hubo cambios significativos, solamente descendieron las UFC gr⁻¹ suelo de *Rhizobium etli* y *Pseudomona fluorescens*. Los coliformes fecales totales se mantuvieron sin presencia por encima de los límites permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994.

La distribución de las UFC gr⁻¹ suelo de cada microorganismo en T-1 (Figuras 5, 6 y 7) mostraron una respuesta exponencial a las aplicaciones de biofertilizante en tres horizontes del suelo (0-20, 20-40 y 40-60 cm) y una marcada disminución a mayor profundidad con respecto a los horizontes más superficiales.

Cole (1993), menciona que una alta calidad del suelo se da cuando los componentes minerales y orgánicos son organizados dentro de las partículas de los poros. Los agregados afectan la porosidad del suelo, movimiento de agua y gases dentro del suelo, retención de agua, actividades microbianas y crecimiento de plantas. El incremento de la biomasa y actividad biológica mostró efectos significativos en los valores de las propiedades físicas y químicas del suelo, Da, Po, HA, MO, CE y CIC principalmente (Cuadro 13), observándose altas correlaciones en T-1, mientras que en T-2 fueron bajas, concordando con lo dicho por Wallace *et al.* (2009).

Cuadro 12. Análisis microbiológico del suelo al inicio y final del experimento en T-1 y T-2.

Microorganismo	T-1 (BF + FQ)		T-2 (FQ)	
	Inicio	Final	Inicio	Final
	----- UFC gr ⁻¹ de suelo -----			
<i>Azotobacter vinelandii</i>	0.18 × 10 ⁶ a [†]	2.40 × 10 ⁷ b	0.18 × 10 ⁶ a	0.18 × 10 ⁶ a
<i>Rhizobium etli</i>	0.50 × 10 ⁶ a	1.60 × 10 ⁷ b	0.50 × 10 ⁶ a	0.35 × 10 ⁶ a
<i>Clostridium pasteurianum</i>	0.20 × 10 ⁶ a	1.50 × 10 ⁷ b	0.20 × 10 ⁶ a	0.18 × 10 ⁶ a
<i>Azospirillum brasilense</i>	0.11 × 10 ⁶ a	2.00 × 10 ⁷ b	0.10 × 10 ⁶ a	0.10 × 10 ⁶ a
<i>Pseudomona fluorescens</i>	0.10 × 10 ⁶ a	1.20 × 10 ⁷ b	0.11 × 10 ⁶ a	0.07 × 10 ⁶ a
<i>Bacillus megaterium</i>	0.11 × 10 ⁶ a	1.40 × 10 ⁷ b	0.11 × 10 ⁶ a	0.09 × 10 ⁶ a
<i>Bacillus subtilis</i>	0.98 × 10 ⁶ a	1.16 × 10 ⁷ b	0.89 × 10 ⁶ a	0.88 × 10 ⁶ a
<i>Lactobacillus</i> spp.	0.59 × 10 ⁶ a	1.80 × 10 ⁷ b	0.59 × 10 ⁶ a	0.60 × 10 ⁶ a
<i>Actinomycetos</i> spp.	0.13 × 10 ⁶ a	1.23 × 10 ⁷ b	0.14 × 10 ⁶ a	0.14 × 10 ⁶ a

[†] Letras iguales son estadísticamente similares a Tukey (P > 0.05).

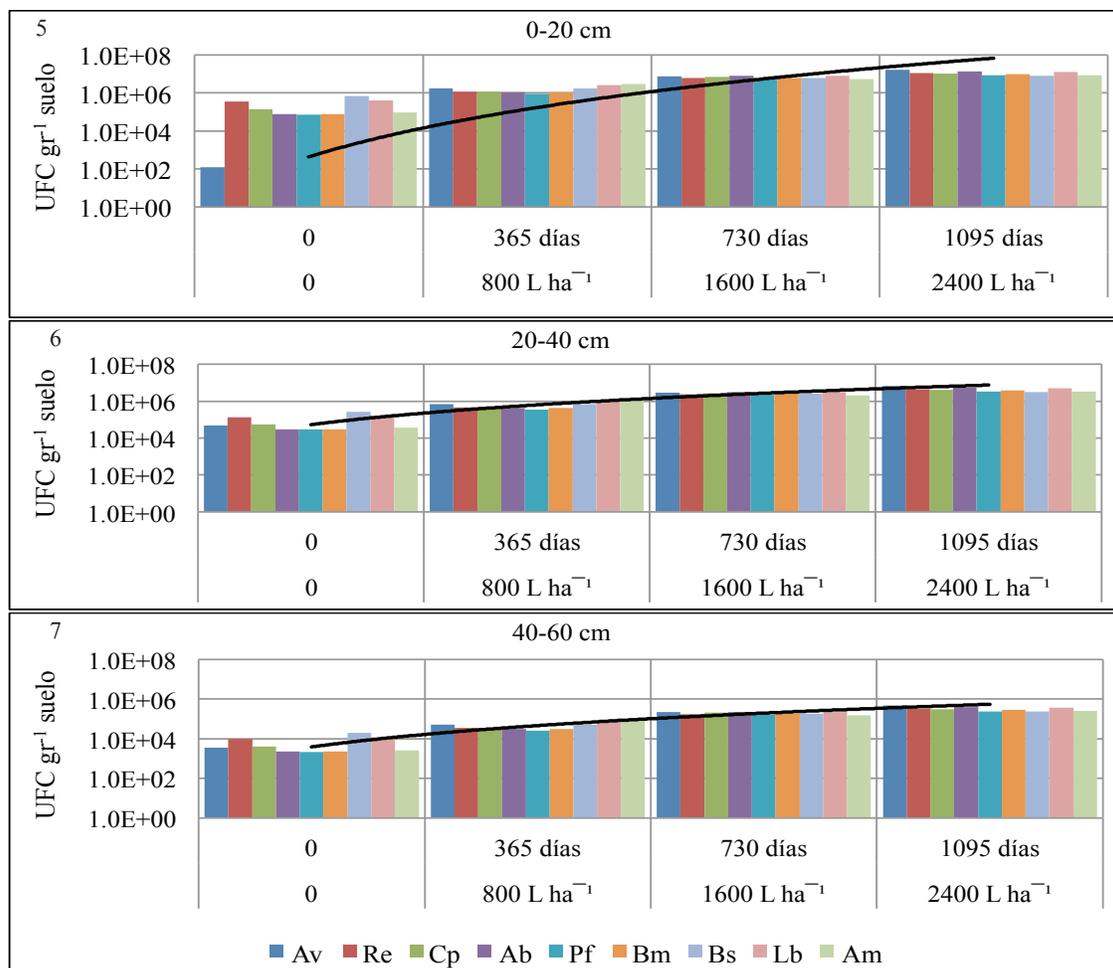


Figura 5, 6, 7. Respuesta de los microorganismos a la aplicación de biofertilizante en tres horizontes del suelo (0-20, 20-40 y 40-60 cm). Av = *Azotobacter vinelandii*; Re = *Rhizobium etli*; Cp = *Clostridium pasteurianum*; Ab = *Azospirillum brasilense*; Pf = *Pseudomonas fluorescens*; Bm = *Bacillus megaterium*; Bs = *Bacillus subtilis*; Lb = *Lactobacillus* spp.; Am = *Actinomycetos* spp.

Saharan y Nehra (2001), encontraron que la aplicación continua de microorganismos mejoran las características estructurales del suelo, mediante la formación de agregados estables, resultado del crecimiento microbiano implicados en los ciclos biogeoquímicos de algunos nutrientes, de manera que actúan como biofertilizantes, aportando nutrientes al suelo e incrementando el contenido de MO del suelo, concordando con los resultados obtenidos en T-1, donde se pueden apreciar las altas correlaciones entre el incremento de la biomasa microbiana con las propiedades físicas y químicas del suelo (Cuadro 13).

Se realizó un sumatoria de la densidad de poblaciones de BFN (*Azotobacter vinelandii*, *Rhizobium etli* y *Azospirillum brasilense*) BSP (*Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium* y

Bacillus subtilis) y BGA (*Clostridium pasteurianum*, *Lactobacillus* spp. y *Actinomycetos* spp.) al inicio y al final del estudio de ambos tratamientos. En T-1 el incremento de la biomasa microbiana al término del estudio fue de alta significancia y en T-2 no hubo cambios significativos (Figura 8).

Respecto a la sumatoria de la densidad de poblaciones de BFN, BSP y BGA al final del estudio de ambos tratamientos en los horizontes muestreados (0-20, 20-40 y 40-60 cm), se pueden observar que en T-1 se incrementó la biomasa microbiana en el horizonte más superficial siendo significativamente mayor, mostrando una tendencia exponencial a disminuir en los horizontes más profundos. En T-2 la población microbiana total mostró una diferencia significativa con respecto a T-1 (Figura 9)

Cuadro 13. Correlación entre la biomasa microbiana con las propiedades físicas y químicas del suelo.

Correlaciones	Coeficiente de correlación (R ²) [†]	
	T-1 (BF + FQ)	T-2 (FQ)
Biomasa microbiana - Punto de saturación (PS)	0.937	0.078
Biomasa microbiana - Capacidad de campo (CC)	0.920	0.228
Biomasa microbiana - Punto de marchitez permanente (PMP)	0.929	0.172
Biomasa microbiana - Humedad aprovechable (HA)	0.922	0.065
Biomasa microbiana - Densidad aparente (DA)	0.916	0.094
Biomasa microbiana - Porosidad (Po)	0.998	0.039
Biomasa microbiana - Materia orgánica (MO)	0.846	0.156
Biomasa microbiana - Conductividad eléctrica (CE)	0.930	0.163
Biomasa microbiana - Potencial de hidrógeno (pH)	0.986	0.085
Biomasa microbiana - Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	0.927	0.176
Biomasa microbiana - Nitrógeno como nitrato (N (NO ₃))	0.969	0.117
Biomasa microbiana - Fósforo (P)	0.891	0.210
Biomasa microbiana - Potasio (K)	0.956	0.286
Biomasa microbiana - Calcio (Ca)	0.880	0.234
Biomasa microbiana - Magnesio (Mg)	0.960	0.055
Biomasa microbiana - Sodio (Na)	0.944	0.136
Biomasa microbiana - Hierro (Fe)	0.984	0.298
Biomasa microbiana - Zinc (Zn)	0.938	0.240
Biomasa microbiana - Manganeseo (Mn)	0.975	0.065
Biomasa microbiana - Cobre (Cu)	0.968	0.291
Biomasa microbiana - Boro (B)	0.939	0.250
Biomasa microbiana - Azufre como sulfato (S (SO ₄))	0.954	0.500

[†] Coeficiente de correlación R de Pearson (*P* > 0.05).

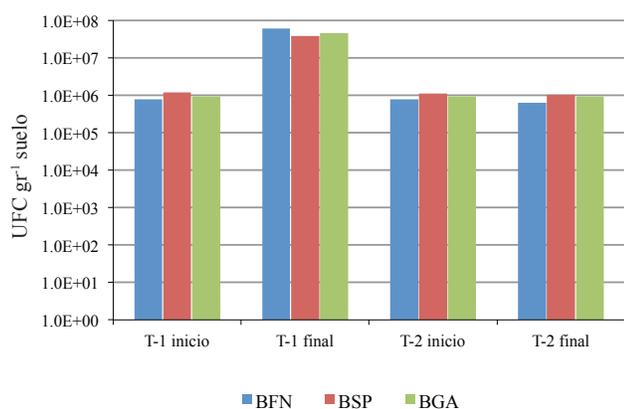


Figura 8. Biomasa microbiana al inicio y final en T-1 y T-2. BFN = bacterias fijadoras de nitrógeno; BSP = bacterias solubilizadoras de fósforo; BGA = bacterias generadoras de antibiosis

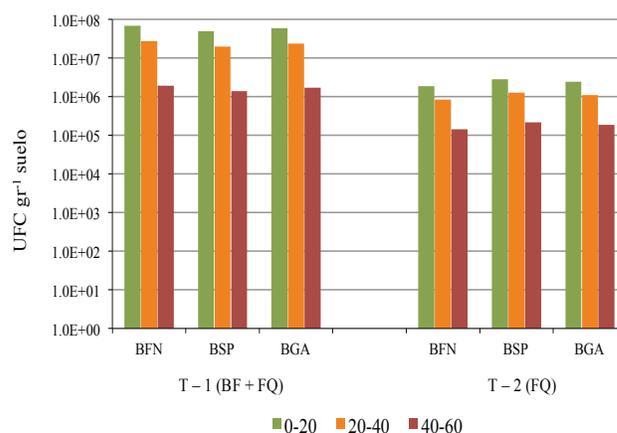


Figura 9. Biomasa microbiana al final del estudio en tres horizontes del suelo (0-20, 20-40 y 40-60 cm). BFN = bacterias fijadoras de nitrógeno; BSP = bacterias solubilizadoras de fósforo; BGA = bacterias generadoras de antibiosis.

Debe tenerse en cuenta que la calidad de los suelos es un concepto holístico que no se puede definir por una sola propiedad, por lo tanto para evaluar el estado y salud de un suelo deberán relacionarse entre sí los parámetros físicos, químicos y biológicos. En T-1 hubo cambios significativos en los indicadores de calidad del suelo que señalan un aumento de fertilidad (Cuadro 14).

En T-1, la biofertilización combinada con fertilizantes químicos, la adición de 6 Mg ha⁻¹ anuales de lombricomposta por tres ciclos consecutivos (2012-13, 2013-14 y 2014-15) y la aplicación de aserrín de pino como acolchado orgánico en el último ciclo de este estudio (2014-15), aumentó la estabilidad de agregados, el contenido de N total, posiblemente por la descomposición que realizan los microorganismos del aserrín y la materia orgánica contenida en la lombricomposta.

En el primer año no hubo significancia estadística respecto a los rendimientos, pero en el segundo y tercer año los rendimientos del T-1, en el cual se aplicaron 800 L ha⁻¹ de biofertilizante en cada ciclo, fueron significativamente mayores que al inicio del experimento (Cuadro 15).

Se presentó diferencia de los rendimientos por hectárea entre T-1 y T-2 así como en los beneficios económicos (Cuadro 16), observándose un incremento en el T-1 del 2.5% (400 kg ha⁻¹) con un beneficio

Cuadro 14. Porcentajes de cambio de los principales indicadores de fertilidad del suelo en T-1 y T-2, al inicio del experimento.

Indicadores de fertilidad	Porcentajes de cambio	
	T-1 (BF + FQ)	T-2 (FQ)
HA	10.36	-1.99
Da	-7.97	2.83
Po	9.26	-4.25
MO	24.41	-1.82
CIC	83.05	-6.20
Na+	-67.57	25.00
K+	-74.52	0.00
N-NO ₃	46.00	-7.69
P	103.21	3.10
Ca	49.55	3.50
Mn	31.33	11.50
Biomasa microbiana	113.99	-1.50

HA = humedad aprovechable; Da = densidad aparente; Po = porosidad; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; Na+ = sodio intercambiable; K+ = potasio intercambiable; N-NO₃ = nitrógeno como nitrato; P = fósforo; Ca = Calcio; Mn = Manganeseo.

económico de \$2880.00 ha⁻¹ para el ciclo 2012-13; para el 2013-14 el aumento en el rendimiento en T-1 fue mayor que en T-2, siendo 15% (6100 kg ha⁻¹), reflejando un beneficio de \$43 676.00 ha⁻¹. En 2014-15, en T-1 hubo un mayor rendimiento del 19.8 % (4200 kg ha⁻¹) y el beneficio fue de \$30 282.00 ha⁻¹. Las respuestas en rendimiento concuerdan también con Castellanos (1980), quien mencionó que el estiércol incrementó la producción de sorgo para grano.

El costo del T-1 (FQ) por ciclo fue de \$6728.32 ha⁻¹ y para los tres ciclos (2012-13, 2013-14 y 2014-15) fue de \$20 184.96, mientras que para el T-2 (BF + FQ) el costo por ciclo fue de \$4956.16 ha⁻¹ y para los tres ciclos fue de \$14 868.48 (Cuadro 17). Esto representa un ahorro del 26.34% (\$5316.48 ha⁻¹) del T-1 con respecto al T-2.

Cuadro 15. Rendimientos obtenidos durante los ciclos 2012-13, 2013-14 y 2014-15 en T-1 y T-2.

Ciclo agrícola	2012 - 13		2013 - 14		2014 - 15	
	T-1 (BF+FQ)	T-2 (FQ)	T-1 (BF+FQ)	T-2 (FQ)	T-1 (BF+FQ)	T-2 (FQ)
Toneladas	254.90	162.80	638.40	357.20	334.40	177.10
kg árbol ⁻¹	15.33a	14.88a	38.40a	32.65b	20.11a	16.18b
Mg ha ⁻¹	16.10a	15.70a	40.40a	34.30b	21.20.a	17.00b

† Letras iguales son estadísticamente similares a Tukey ($P > 0.05$)

Cuadro 16. Relación de los rendimientos con los beneficios obtenidos durante los ciclos 2012-13, 2013-14 y 2014-15 en T-1 y T-2.

	Rendimiento		Diferencia	Precio medio rural	Beneficio
	T-1 (BF+FQ)	T-2 (FQ)			
	- - - - - Mg ha ⁻¹ - - - - -				Pesos ha ⁻¹
2012-13	16.1	15.7	0.4	\$7.20	\$2880.00
2013-14	40.4	34.3	6.1	\$7.16	\$43676.00
2014-15	21.2	17.0	4.2	\$7.21	\$30 282.00
Acumulado	77.7	67.0	10.7		\$76 838.00

Cuadro 17. Costos por hectárea de T-1 y T-2.

Tratamiento	BF	FQ	Costo	Ahorro	Porcentaje de ahorro
	- - Pesos ha ⁻¹ - - -				
T-1 (BF + FQ)	\$1592.00	\$3364.16	\$4956.16	\$1772.16	26.34%
T-2 (FQ)	-	\$6728.32	\$6728.32	-	-

CONCLUSIONES

- La aplicación combinada de biofertilizantes y fertilizantes químicos, aunado a la incorporación de lombricomposta durante tres años consecutivos y la aplicación de aserrín de pino como acolchado, influyeron positivamente sobre el incremento de la materia orgánica (MO) del suelo, la capacidad del suelo de almacenar agua (HA), la disponibilidad, retención y aprovechamiento de los nutrientes del suelo (CIC) debido posiblemente al incremento de la biomasa y actividad microbiana.

- Existió una alta correlación entre las UFC ml⁻¹ y dosificación del biofertilizante aplicado con el incremento de la CIC ($R^2 = 0.927$) y MO ($R^2 = 0.846$).

- Debido a la combinación de biofertilizantes, fertilizantes químicos, así como a la incorporación de lombricomposta el nitrógeno disponible en el suelo se incrementó en 46%, el fósforo soluble en 103.21%, el calcio en 49.55% y el manganeso en 31.33% con respecto a la situación inicial del experimento.

- El uso de biofertilizante tuvo efecto significativo en el descenso del sodio (67.57%) intercambiable, disminuyendo el riesgo de sodicidad.

- La aplicación de biofertilizantes como la lombricomposta y el aserrín en los suelos agrícolas es la forma más económica de incrementar la MO del suelo. Además puede facilitar la recuperación de los suelos y mejorar su calidad en la región de Cuauhtémoc, Chihuahua, los cuales son muy pobres en MO (menor de 1%) y tienden a una pérdida de nutrientes por erosión eólica.

LITERATURA CITADA

- Alins, G., S. Alegre, L. Batllori, J. Carbó, L. Escudero-Colomar, I. Iglesias, J. Lordan y M. Vilajeliu. 2013. Manzanos en agricultura ecológica, una opción para diferenciarse. *Rev. Vida Rural* 371: 32-35.
- Aslantas, R., R. Cakmakci, and F. Sahin. 2007. Effect of plant growth promoting rhizobacteria on young apple tree growth and fruit yield under orchard conditions. *Sci. Hort.* 111: 371-377.
- Baca, B. E., L. Soto y M. P. Pardo. 2000. Fijación biológica de nitrógeno. *Elementos* 38: 43-49.
- Barber, K. L., L. D. Maddux, D. E. Kissel, G. M. Pierzynski, and B. R. Bock. 1992. Corn responses to ammonium and nitrate-nitrogen fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1166-1171.
- Bashan, Y. 1986. Enhancement of wheat root colonization and plant development by *Azospirillum brasilense* Cd. following temporary depression of the rhizosphere microflora. *Appl. Environ. Microbiol.* 51: 1067-1071.
- Brady, N. and R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. Prentice Hall. New Jersey, NJ, USA.
- Carvajal Muñoz, J. S. y A. C. Mera Benavides. 2010. Fertilización biológica: Técnicas de vanguardia para el desarrollo agrícola sostenible. *Produc. Limp.* 5: 77-96.
- Castellanos R., J. Z. 1980. El estiércol como fuente de nitrógeno. *Seminarios Técnicos* 5: 1-27. CIAN-INIA-SARH. Torreón, Coahuila, México.
- Castellanos R., J. Z. 1982. La importancia de las condiciones físicas del suelo y su mejoramiento mediante la aplicación de estiércoles. *Seminarios Técnicos* 7: 32. CIAN-INIA-SARH. Torreón, Coahuila, México.
- Castellanos R., J. Z. 1986. Evaluación del estiércol de bovino y gallinaza como fuente de fósforo en el cultivo de alfalfa. *Agric. Téc. Méx.* 12: 247-258.
- Castellanos R., J. Z., J. Etchevers, A. Aguilar y R. Salinas. 1996. Efecto de largo plazo de la aplicación de estiércol de ganado lechero sobre el rendimiento de forrajes y las propiedades de un suelo en una región irrigada del norte de México. *Terra* 14: 151-158.
- Cole, M. 1993. Soil quality as a component of environmental quality. pp. 223-237. *In:* C. R. Corthen and N. P. Ross (eds.). *Environmental statistic, assessment, and forecasting.* Lewis. Boca Raton, FL, USA.
- Da Silva, P. M., S. M. Tsai y R. Bonetti. 1999. Respuesta a la inoculación y a la fertilización nitrogenada para incrementar la producción y la fijación biológica de nitrógeno en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). pp. 137-144. *In:* J. J. Peña-Cabriales y F. Zapata (eds.). *Aumento de la fijación biológica del nitrógeno en el frijol común en América Latina.* Arreglos Regionales Cooperativos para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nuclear en América Latina y el Caribe.
- Davies, J. 2006. Are antibiotics naturally antibiotics? *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 33: 496-499.
- Del Pino, A., C. Repetto, C. Mori y C. Perdomo. 2008. Patrones de descomposición de estiércoles en el suelo. *Terra Latinoamericana* 26: 43-52.
- DeLucca, A. J., W. J. Connick Jr., D. R. Fravel, J. A. Lewis, and J. M. Bland. 1990. The use of bacterial alginates to prepare biocontrol formulations. *J. Ind. Microbiol.* 6: 129-134.
- Dibut Alvarez, B. y R. Martínez Viera. 2013. Obtención y manejo de biofertilizantes como insumos indispensables de la agricultura sostenible. *Rev. Claridades Agropec. Ed. Esp.* 239: 42-44.
- Di Giovanni, G. D., L. S. Watrud, R. J. Seidler, and F. Widmer. 1999. Comparison of parental and transgenic alfalfa rhizosphere bacterial communities using biolog GN metabolic fingerprinting and enterobacterial repetitive intergenic consensus sequence-PCR (ERIC-PCR). *Microbiol. Ecol.* 37: 129-139.
- Eghball, B., D. Ginting, and J. E. Gilley. 2004. Residual effects of manure and compost applications on corn production and soil properties. *Agron. J.* 96: 442-447.
- Fisher, K. and W. E. Newton. 2002. Nitrogen fixation - A general overview. pp. 1-34. *In:* G. J. Leigh (ed.). *Nitrogen fixation at the millennium.* Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Harris, R. F. and D. F. Bezdicsek. 1994. Descriptive aspects of soil quality/ health. pp. 23-35. *In:* J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicsek, and B. A. Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment.* SSSA Special Publication no. 35. Madison, WI, USA.

- Hawes, M. C., G. Bengough, G. Cassab, and G. Ponce. 2003. Root caps and rhizosphere. *J. Plant Growth Regul.* 21: 352-367.
- Johnston, A. E., P. R. Poulton, K. Coleman, and D. L. Sparks. 2009. Soil organic matter: Its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Adv. Agron.* 101: 1-57.
- Killham, K. and J. I. Prosser. 2007. The prokaryotes. pp. 119-144. *In: E. A. Paul (ed.). Soil microbiology, ecology, and biochemistry.* Academic Press. Burlington, MA, USA.
- Linderman, R. G. 1993. Effects of microbial interactions in the mycorrhizosphere on plant growth and health. pp. 138-152. *In: R. Ferrera-Cerrato and R. Quintero (eds.). Agroecología, sostenibilidad y educación.* Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Estado de México, México.
- López M., J. D., A. Díaz E., E. Martínez R. y R. D. Valdez C. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento de maíz. *Terra* 19: 293-299.
- Madigan, M. T., J. M. Martinko y J. Parker. 2004. *Brock. Biología de los microorganismos.* Pearson Educación. Madrid, España.
- Monge P., E., J. L. Espada, D. Risco y J. Val F. 2006. Respuesta del manzano a diferentes dosis de abono nitrogenado. Resultados preliminares de suelo, planta y calidad de fruto. pp. 137-142. *In: D. Valero y M. Serrano (eds.). Innovaciones fisiológicas y tecnológicas de la maduración y post-recolección de frutas y hortalizas.* Limencop. Elche, España.
- Orozco-Corral, A. L. y M. I. Valverde-Flores. 2012. Impacto ambiental del manejo del agua de riego con sondas de capacitancia sobre la contaminación de acuíferos por nitratos. *Rev. Tecnol. Cienc. Agua* 3: 23-35.
- Pepper, I. L. and C. P. Gerba. 2005. *Environmental microbiology: A laboratory manual.* Elsevier Academic Press. Burlington, MA, USA.
- Pérez, C., L. De La Fuente, A. Arias y N. Altier. 2000. Uso de *Pseudomonas* fluorescentes nativas para el control de enfermedades de implantación en *Lotus corniculatus* L. *Agrociencia* 4: 41-47.
- Restrepo, J. 1996. Abonos orgánicos fermentados. Experiencias de agricultores en Centro América y Brasil. CEDECO-OIT. San José de Costa Rica.
- Ros, M., I. Rodríguez, C. García, and T. Hernández. 2010. Microbial communities involved in the bioremediation of an aged recalcitrant hydrocarbon polluted soil by using organic amendments. *Bioresour. Technol.* 101: 6916-6923.
- Saharan, B. S and V. Nehra, 2001 Plant growth promoting rhizobacteria: A critical review. *Life Sci. Med. Res.* 2011: LSMR-21.
- Salazar-Sosa, E., A. Beltrán-Morales, M. Fortis-Hernández, J. A. Leos-Rodríguez, J. A. Cueto-Wong y C. Vázquez-Vázquez. 2003. Mineralización de nitrógeno y producción de avena forrajera con tres sistemas de labranza. *Terra* 21: 561-567.
- Salazar-Sosa, E., H. I. Trejo-Escareño, C. Vázquez-Vázquez y J. D. López-Martínez. 2007. Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino. *Phyton* 76: 169-185.
- Salazar-Sosa, E., H. I. Trejo-Escareño, J. D. López-Martínez, C. Vázquez-Vázquez, J. S. Serrato-Corona, I. Orona-Castillo y J. P. Flores-Márquez. 2010. Efecto residual de estiércol bovino sobre el rendimiento de maíz forrajero y propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana* 28: 381-390.
- Stenberg, B. 1999. Monitoring soil quality of arable land: Microbiological indicators. *Acta Agric. Scand., sect B., Soil Plants Sci.* 49: 1-24.
- Stevenson, F. J. and M. A. Cole. 1999. *Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients.* John Wiley and Sons. New York, NY, USA.
- Torsvik, V. L. 1980. Isolation of bacterial DNA from soil. *Soil Biol. Biochem.* 12: 15-21.
- Torsvik, V., J. Goksøyr, and F. L. Daae. 1990. High diversity in DNA soil bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 56: 782-787.
- Voroney, R. P. 2007. The soil habitat. pp. 25-49. *In: E. A. Paul (ed.). Soil microbiology, ecology, and biochemistry.* Elsevier. Oxford, UK.
- Wallace, B. M., M. Krzic, T. A. Forge, K. Broersma, and R. F. Newman. 2009. Biosolids increase soil aggregation and protection of soil carbon five years after application on a crested wheatgrass pasture. *J Environ. Qual.* 38: 291-298.
- Widmer, F., A. Flieábch, E. Laczko, J. Schulze-Aurich, and J. Zeyer. 2001. Assessing soil biological characteristics: A comparison of bulk soil community DNA, PLFA and BIOLOG analyses. *Soil Biol. Biochem.* 33: 1029-1036.
- Zago, V. C. P., H. De-Polli, and N. G. Rumjanek. 2000. *Pseudomonas* spp. Fluorescentes – Bactérias promotoras de crescimento de plantas e biocontroladoras de fitopatógenos em sistemas de produção agrícola. *Seropédica: Embrapa Agrobiologia.* Brasília, DF-Brasil.

Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión

Agricultural management of Vertisols in Mexico: a review

Carlos Alberto Torres Guerrero¹, Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena^{1‡},
Carlos Alberto Ortiz Solorio¹ y Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena²

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

[‡] Autora responsable (castor@colpos.mx)

² Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Francisco I. Madero s/n, Hacienda El Canada. 66050 Gral. Escobedo, N. L., México.

RESUMEN

Los Vertisoles ocupan el 8.3% del territorio nacional y se consideran los suelos más productivos del país. A pesar de ello, las investigaciones sobre su manejo agronómico han sido llevadas a cabo sólo en algunas localidades del país o en campos experimentales que impide la transferencia de tecnología. Varios esfuerzos se han realizado por generar información en este tipo de suelos desde 1985, sobre todo en el Altiplano Mexicano y en la zona costera del Golfo de México donde son dominantes y presentan serios problemas de degradación; sin embargo, también son comunes en otras regiones de México en las cuales se cuenta con escasa información. El objetivo de esta investigación fue realizar una revisión bibliográfica acerca del manejo agronómico de Vertisoles en México y las modificaciones que sufren sus propiedades físicas y químicas. El análisis de la información indica que los Vertisoles presentan problemas de manejo en cuatro aspectos principales: a) mecanización; b) compactación, c) drenaje y d) fertilización. No obstante su complejidad, las caracterizaciones de sus propiedades edáficas se han realizado sólo con algunas determinaciones físicas o químicas. El entendimiento de los procesos de formación puede ayudar a generar prácticas agronómicas adecuadas para cada zona agroclimática y disminuir los problemas de degradación física (compactación) y química (declinación de la fertilidad) que se están presentando en nuestro país.

Palabras clave: propiedades edáficas; fertilización; labranza; degradación química y física.

SUMMARY

Vertisols cover 8.3% of Mexico's territory and are considered the most productive soils. Nevertheless, agronomic management research has been carried out only in experimental fields or some parts of the country. In consequence, the transfer of technology, nationally and internationally, is limited. Much effort has been made to generate information on these soils since 1985, especially on the Mexican highlands and the Gulf coast region of Mexico where they are dominant and serious problems of degradation exist. However, they are also common in other parts of Mexico where the information is deficient. This paper is a review of the literature on agronomic management of Vertisols and changes in their physical and chemical properties. The analysis indicates that there are Vertisol management problems in four main areas: a) mechanization; b) compaction, c) drainage, d) fertilization. Despite their complexity, characterizations of their properties have only been performed with some physical or chemical determinations. Knowing soil formation processes can help generate agronomic practices suitable for Vertisoles in each agro-climatic zone and reduce the problems of physical (compaction) and chemical (fertility decline) degradation that occur in Mexico.

Index words: soil properties; fertilization; tillage; physical and chemical degradation.

Como citar la revisión:

Torres Guerrero, C. A., M. C. Gutiérrez Castorena, C. A. Ortiz Solorio y E. V. Gutiérrez Castorena. 2016. Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión. *Terra Latinoamericana* 34: 457-466.

Recibido: noviembre de 2015. Aceptado: agosto de 2016.
Publicado como revisión en *Terra Latinoamericana* 34: 457-466.

INTRODUCCIÓN

Los Vertisoles (del latín *verteré*; invertir) son suelos de más de 25 cm de profundidad, contienen más de 30% de arcillas, y se mezclan constantemente por procesos de expansión y contracción dando como resultado grietas profundas en la estación seca, caras de deslizamiento (*slickensides*) y agregados en forma de cuña (Soil Survey Staff, 2014). El microrelieve *gilgai* es peculiar en estos suelos, aunque no se encuentra comúnmente. Los Vertisoles se originan a partir de rocas ígneas o sedimentarias por meteorización o sedimentación donde se acumulan arcillas 2:1. Estos suelos se localizan principalmente en depresiones y áreas planas a onduladas, en climas tropicales, subtropicales, semiáridos a subhúmedos y húmedos, con una alternancia clara entre la estación seca y húmeda. La vegetación predominante es de sabana, bosque o pastizal (Coulombe *et al.*, 2000).

Las condiciones ambientales que conducen a la formación de un horizonte vértico o propiedades vérticas son aquellas donde ocurre precipitación suficiente para permitir el intemperismo de los materiales parentales, pero no tan alta como para producir lixiviación de bases; además de periodos secos, drenaje restringido y altas temperaturas (ISRIC, 2013).

A nivel mundial se considera que los Vertisoles cubren 335 millones de hectáreas y se presentan principalmente en los trópicos semiáridos, con una precipitación media anual de 500-1000 mm, pero también se encuentran en los trópicos húmedos. En México, ocupan 9.5 millones de ha, que representan 8.3% del territorio nacional (INEGI, 2014), y ocurren en diferentes zonas agroecológicas; de esa superficie 18% son de agricultura de temporal y 29.87% de riego (Ortiz y Gutiérrez, 1995, 1999). Estos suelos forman unidades puras con pocas asociaciones con otras clases de suelo, los cuales se concentran principalmente en el Altiplano Mexicano (Guanajuato y Querétaro) y en las planicies costeras del Golfo de México (Tamaulipas, Veracruz y Tabasco) (Sotelo *et al.*, 2006, 2008, 2013). Aunque también se encuentran en el Eje Neovolcánico Transmexicano en los estados de Michoacán, Morelos, Estado de México y Querétaro (Krasilnikov *et al.*, 2013) y en los distritos de riego de Sonora y Sinaloa (INEGI, 2014).

Los Vertisoles poseen un gran potencial productivo en granos (sorgo, trigo y maíz), caña de azúcar y

hortalizas (SIAP, 2015); sin embargo, presentan degradación física (66%) por compactación de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Colegio de Postgraduados (SEMARNAT-CP, 2002¹) o degradación química por declinación en su fertilidad (53%) (Moncada *et al.*, 2013). La contaminación con metales pesados (Siebe, 1994; Siebe y Cifuentes, 1995), residuos farmacéuticos y bacterias patógenas (Dalkmann *et al.*, 2012) son otros problemas que se presentan cuando son irrigados con aguas residuales.

Dada la relevancia de los Vertisoles en la producción de cultivos, en sus implicaciones en la población rural o urbana debido a su degradación y los posibles cambios que pueden sufrir por eventos climáticos, se consideró necesario realizar una revisión bibliográfica tanto de literatura gris (memorias de congresos o tesis) y de revistas científicas sobre su manejo agronómico, con particular énfasis en la modificación de sus propiedades físicas, químicas y su fertilidad.

ESBOZO HISTÓRICO DEL ESTUDIO DE VERTISOLES EN MÉXICO

Sin duda en México se han realizado esfuerzos para comprender a los suelos arcillosos. Dos han sido quizá los mayores intentos para reconocer, entender, clasificar y manejar esta clase de suelos. El primero se concretó en la Reunión Nacional sobre el Manejo de Suelos Arcillosos y su implicación en la agricultura realizada en Celaya, Guanajuato en 1985 (Ruíz *et al.*, 1985²). La Segunda Reunión Nacional se llevó a cabo diez años después en Mérida, Yucatán (Ruíz, 1995). En esta reunión se propuso la creación del Programa Nacional para el estudio de los suelos arcillosos de México. El objetivo era desarrollar una agricultura sustentable en cuanto al requerimiento nutricional de los cultivos, necesidades de fertilizantes y manejo agronómico, pero este programa nunca logró concretarse.

A pesar de la importancia agronómica de los Vertisoles en nuestro país, al ser de los suelos con mayor potencial productivo, no existe una revisión bibliográfica que permita un análisis de los avances que se han alcanzado en los últimos 26 años, específicamente sobre su manejo agronómico. La degradación física y química que presentan la mayoría de ellos en más de 66% (Moncada *et al.*, 2013), justifica la necesidad urgente de realizar un eficiente

¹ SEMARNAT-CP (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados). 2002. Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la República Mexicana, a escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México.

² Ruíz Figueroa, J. F., B. Ortiz Villanueva y C. A. Ortiz Solorio. 1985. Memorias de la Primera Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya, Guanajuato, México.

manejo agronómico que conduzca a su rehabilitación o conservación.

PROPIEDADES FÍSICAS Y MANEJO

Las investigaciones más importantes realizadas sobre el efecto del manejo agronómico acerca de la modificación de las propiedades físicas y químicas en Vertisoles de México se reportan en el Cuadro 1. La mayoría de ellas analizan propiedades como: densidad aparente, retención de humedad, textura y permeabilidad y pocas evalúan los agregados (formación, estabilidad y distribución) y porosidad del suelo.

De acuerdo con estas investigaciones, la primera modificación con el cambio de uso del suelo de un ecosistema natural, es la compactación e incremento en la densidad aparente. El paso de maquinaria pesada (Sánchez-Vera *et al.*, 2003) o el pisoteo del ganado, cuando los Vertisoles se usan como agostaderos (Geissen *et al.*, 2009), son los responsables de incrementar la densidad aparente (hasta 10%) degradando al suelo por compactación (SEMARNAT-CP, 2002¹), sobre todo en la zona costera del Golfo (Krasilnikov *et al.*, 2013). En ese sentido es importante generar prácticas agronómicas que disminuyan la densidad aparente (Dap) en términos de resistencia mecánica, retención de agua o porosidad, para ello es necesario llevar a cabo investigaciones más integrales de los Vertisoles.

Algunos investigadores proponen realizar subsoleos (Ribón *et al.*, 2003), o bien utilizar tractores multiradados, en suelos con pendientes menores de 1% y poca pedregosidad (Gutiérrez-Rodríguez *et al.*, 2004). Otros indican que el tránsito reiterado del sistema de rodaje de los diferentes tractores (pesado, medio y ligero), altera la resistencia a la penetración y aumenta la Dap (Gutiérrez-Rodríguez *et al.*, 2012).

La incorporación de residuos de cosechas anteriores es otra forma de mejorar las condiciones físicas del suelo en un sistema de trigo-maíz-algodón (Lee-Rodríguez y Núñez, 1985³) o en caña de azúcar (Sánchez-Hernández *et al.*, 2003). Castellanos (1985⁴) demostró que al agregar estiércol en diferentes concentraciones (hasta 120 kg ha⁻¹) en cultivos de alfalfa, disminuye la Dap, aumenta la retención de agua aprovechable, y mejora la estructura del suelo. Por su parte, Sánchez-Hernández *et al.* (2003, 2006) recomiendan aportar vermicomposta de cachaza y estiércol bovino (1:1) para disminuir la Dap en 13% (de

1.34 a 1.16 Mg m⁻³). La distribución de agregados y el diámetro medio ponderado (indicador de estabilidad de estructura del suelo) incrementaron con el aumento en la cantidad de material orgánico agregado. De hecho, la adición de material orgánico a los Vertisoles es crucial para la formación de macro-agregados resistentes al agua (>2 mm); mientras que los microagregados son más susceptibles a sufrir degradación física por los procesos de humedecimiento y secado (Bravo-Garza *et al.*, 2005, 2009, 2010).

Otro factor que determina la fertilidad física de los Vertisoles es el tipo de labranza, para ello se han realizado diversas investigaciones con el fin de analizar los cambios en las propiedades del suelo. Mora *et al.* (2001) compararon tres manejos agronómicos en rotaciones de maíz-trigo: labranza convencional con quema de residuos, labranza convencional con incorporación de residuos y labranza cero con residuos sobre la superficie. Los resultados indican que la Dap en la labranza cero fue mayor en comparación con la labranza convencional; mientras que el contenido de humedad en la capa superficial se incrementó de 2 a 5% en la labranza cero. Además, en labranza cero la incorporación de residuos orgánicos incrementó la porosidad, permeabilidad y se redujo la compactación (Covarrubias, 1985⁵). En contraste con la labranza convencional, la cual modifica la capacidad de retención de agua por la escasa magnitud de su porosidad (Oleschko *et al.*, 1993) y se puede formar un piso de arado (impidiendo la penetración de las raíces) cuando se emplea la siembra directa (Fuentes *et al.*, 2009).

La agricultura de conservación es una práctica agronómica que propone reducción del laboreo de las tierras (cero labranza), rotación de cultivos y adición de residuos de cosechas anteriores (Oleschko *et al.*, 1996; Fuentes *et al.*, 2009). No obstante, no siempre se obtienen resultados que mejoren la calidad física de los Vertisoles sobre todo en zonas áridas (Gutiérrez Castorena *et al.*, 2015).

El drenaje y las propiedades hídricas de los Vertisoles, también son factores importantes que dificultan su manejo agronómico. Los procesos de humedecimiento y secado pueden colapsar a la estructura del suelo y afectar seriamente a los cultivos rompiendo sus raíces (Ortega-Larrocea *et al.*, 2001). La aparición de grietas se debe a la pérdida de humedad por debajo de los 10 g g⁻¹, fenómeno que se observa

³ Lee-Rodríguez V. y R. Núñez Escobar. 1985. Efecto de la adición de residuos de cosecha sobre las propiedades físicas de un suelo arcilloso del Valle del Yaqui. En: J. F. Ruíz F., B. Ortiz V. y C. A. Ortiz S. (eds.). Memorias de la 1a. Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya, Gto., México.

⁴ Castellanos, J. 1985. El uso de la materia orgánica como mejorador de las características físicas de un suelo arcilloso. En: J. F. Ruíz F., B. Ortiz V. y C. A. Ortiz S. (eds.). Memorias de la 1a. Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya, Gto., México.

⁵ Covarrubias, J. M. 1985. Sistemas de labranza con maíz en suelos con permeabilidad deficiente. En: J. F. Ruíz F., B. Ortiz V. y C. A. Ortiz S. (eds.). Memorias de la 1a. Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya, Gto., México.

Cuadro 1. Principales investigaciones realizadas en Vertisoles, en México.

Autor	Año	Lugar	Cultivo	Fertilización	Manejo agronómico	Propiedades edáficas modificadas/rendimientos
Castellanos ⁴	1985	Matamoros, Coahuila	Alfalfa	60 Kg N ha ⁻¹ solo al testigo	Incorporación de estiércol de bovino	Retención de humedad, infiltración, Dap, MO
Covarrubias ⁵	1985	La Marina, Tamaulipas	Maíz	No especificado	Labranza tradicional y de conservación	Porosidad, permeabilidad y salinidad.
Lee-Rodríguez y Núñez ³	1985	Cd. Obregón, Sonora	Rotación trigo-maíz- algodón.	0-120 kg ha ⁻¹ barbecho 0-40 kg ha ⁻¹	Adición, quema y extracción de residuos de cosecha.	Estabilidad de agregados, humedad aprovechable, infiltración, Dap y resistencia a la penetración
Laird <i>et al.</i> ⁶	1985	Guanajuato	Maíz y sorgo temporal	0-80 kg ha ⁻¹ de Nitrógeno	Diferentes dosis de fertilización nitrogenada.	Aumento de rendimiento de cultivos
Rosales y Figueroa	1985	Mexicali, Baja California Norte	Pasto ryegrass	Estiércol bovino	Diferentes prácticas de labranza y aplicación de estiércol bovino.	MO, N y P en el suelo.
Oleschko <i>et al.</i>	1996	Guanajuato	Alfalfa, maíz, sorgo, trigo, brócoli, cebolla, zanahoria y chayote	No especificado	Diferentes manejos agronómicos combinando cultivos con labranza tradicional y de conservación.	Dap, N total y MO.
Salgado <i>et al.</i>	2000	Tabasco	Caña de azúcar	0-0-0 y hasta 200-80-80 NPK	Diferentes dosis de fertilización NPK.	Aumento de rendimiento de cultivo
Mora <i>et al.</i>	2001	Guanajuato	Trigo	No especificado	Diferentes sistemas de labranza (Convencional y de conservación) y quema de residuos.	Dap, resistencia a la penetración
Salinas-García <i>et al.</i>	2001	Michoacán	Maíz	La recomendada para cada región de Michoacán	Labranza cero, convencional y mínima.	COS, biomasa microbiana, N y P.
Espinosa <i>et al.</i>	2002	Chontalpa, Tabasco	Sorgo	120-80-60 NPK	Evaluación de la eficiencia en utilización de fertilizantes nitrogenados aplicados en diferentes etapas de cultivo.	Eficiencia en el uso de N en el cultivo.
Salinas-García <i>et al.</i>	2002	Michoacán	Maíz	La recomendada para cada región de Michoacán	Labranza cero y convencional con incorporación de residuos.	Dap, N, biomasa microbiana, COS, P extractable.
Ribón <i>et al.</i>	2003	Santa Rosalía, Tabasco	Caña de azúcar	120-60-60	Cultivo de caña de azúcar durante 5-30 años.	MO y N total del suelo.
Salgado <i>et al.</i>	2003	Tabasco	Caña de azúcar	0-0-0 y hasta 160-35-67 NPK	Diferentes dosis de fertilización NPK y dinámica de invertasas.	Aumento del rendimiento y contenido de N en el suelo.
Sánchez Hernández <i>et al.</i>	2003	Chontalpa, Tabasco	Caña de azúcar	No especificado	Adición de rastrojos de cosecha de caña de azúcar.	Contenido de humedad residual, pH, N total y P-Olsen

⁶ Laird, R. J., G. Rodríguez, H. y B. A. Ruíz. 1985. Respuesta del maíz de temporal a la fertilización en los Vertisoles de El Bajío, México. En: J. F. Ruíz F., B. Ortiz V. y C. A. Ortiz S. (eds.). Memorias de la 1a. Reunión sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Celaya, Gto., México.

Cuadro 1 (continuación). Principales investigaciones realizadas en Vertisoles, en México.

Autor	Año	Lugar	Cultivo	Fertilización	Manejo agronómico	Propiedades edáficas modificadas/rendimientos
Sánchez-Vera <i>et al.</i>	2003	Cárdenas-Coatzacoalcos, Tabasco	Caña de azúcar	No especificado	Efecto de manejo (maquinaria) en tres agroecosistemas diferentes.	Dap
Bravo-Garza <i>et al.</i>	2005	Nuevo León	Maíz	No especificado	No especificado.	N, COS, estabilidad de agregados
Follett <i>et al.</i>	2005	Celaya, Guanajuato	Trigo, maíz, frijol y sorgo	250 Kg ha ⁻¹ N	Labranza cero, convencional, rotación de cultivos y adición de residuos orgánicos.	Dinámica y secuestro de C
García Silva <i>et al.</i>	2005	Valle de Santiago, Gto.	Maíz y cebada	No especificado	Siembra directa con residuos. Siembra convencional quema de residuos. Siembra directa sin residuos.	COS, MO y huminas.
García Silva <i>et al.</i>	2006	Valle de Santiago, Gto.	Maíz-sorgo Cebada-trigo	180-60-0 NPK	Siembra directa y convencional con manejo de residuos de cosecha.	Dap, COS y MO.
Ramírez-Barrientos <i>et al.</i>	2006	Valle de Santiago, Guanajuato	Trigo	No especificado	Labranza cero.	Dap, MO, pH, N total, P y CIC.
Sánchez- Hernández <i>et al.</i>	2006	Chontalpa, Tabasco	No especificado	No especificado	Aplicación de Vermicomposta de cachaza.	Dap, agregados, C total y MO.
Vidal-Martínez <i>et al.</i>	2006	Montecillo, Edo. de México	Brócoli	0-140 partes de K	Manejo convencional y fertirrigación en invernadero.	Aumento en rendimientos y contenido de K.
Bolio-López <i>et al.</i>	2008	Santa Rosalía, Tabasco	Caña de azúcar	No especificado	Dinámica de potasio en cultivos de caña de diferentes edades.	Contenido de K y aumento del rendimiento.
Fregoso Tirado.	2008	Valle de Santiago, Guanajuato	Maíz, trigo y cebada	250-100-0 280-150-90 NPK	Labranza de conservación.	Mejor fertilidad química con labranza conservación. acidificación en todos los tratamientos
Rivera Hernández <i>et al.</i>	2009	Campeche	Maíz	80-100 kg ha ⁻¹ P	Diferentes concentraciones de fertilización con fósforo.	pH, humedad del suelo y cantidad de P
Bravo-Garza <i>et al.</i>	2009	Linares, Nuevo León	Maíz	No especificado	Labranza tradicional	Contenido de humedad y distribución de agregados.
Bravo-Garza <i>et al.</i>	2010	Noreste de México	Maíz	No especificado	No especificado.	Agregados estables en agua y MOP
Rivera Hernández <i>et al.</i>	2010	Campeche	Maíz	80-100 kg ha ⁻¹ P	Diferentes concentraciones de fertilización con fósforo y contenidos de humedad.	Humedad del suelo y fertilización con Fosfato
Gutiérrez-Rodríguez <i>et al.</i>	2012	Valle Toluca, Edo. México	Trigo	No especificado	Efecto de rodaje de tres tipos de tractores agrícolas.	Aumento de la resistencia a la penetración.

Dap = densidad aparente; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; MOP = materia orgánica particulada; COS = carbono orgánico del suelo; N = nitrógeno; P = fósforo.

en zonas de cultivo y no así en zonas con cobertura vegetal (Navar *et al.*, 2002). Esto provoca que en la temporada de lluvias las grietas se llenen de sedimento para posteriormente colapsarse y formar escorrentías en las que se puede presentar pérdida o erosión del suelo. Geissen *et al.* (2008) proponen resolver este fenómeno con la instalación de barreras vivas para evitar la formación de cárcavas. Sin embargo, es necesario conocer el origen de formación y los materiales parentales de los Vertisoles para ofrecer un manejo adecuado debido a la variabilidad de materiales (ígneo y sedimentario) y condiciones climáticas necesarias para la formación de estos suelos (Geissen *et al.*, 2007; Krasilnikov *et al.*, 2013).

PROPIEDADES QUÍMICAS Y MANEJO

La fertilidad química de los Vertisoles ha sido estudiada en cambios de uso del suelo y en diversos manejos agronómicos; aunque la mayor parte de estas investigaciones han sido realizadas comparando diferentes sistemas de labranza y sólo contemplando algunas propiedades como materia orgánica (MO) y pH.

Con el cambio de uso de suelo, por ejemplo, de una selva a un cultivo de caña de azúcar o para realizar prácticas de agostadero se ha reportado una disminución drástica en el contenido de MO y pérdida de la estructura (Rosales y Figueroa, 1985⁷). Medinilla *et al.* (2014) encontraron una reducción en el contenido de MO de 3% y degradación de agregados de origen biológico en tan solo un año. Estos cambios son atribuidos a la naturaleza, volumen y grado de humificación de la materia orgánica (Oleschko *et al.*, 1996).

García-Silva *et al.* (2006) mencionan que los decrementos en el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) se deben al escaso desarrollo de la estructura de los Vertisoles, en donde el C al ser liberado de los agregados queda fácilmente disponible para los microorganismos del suelo. Estudios posteriores en este mismo sitio, indican que el contenido de ácidos húmicos (AH) y fúlvicos (AF), así como su relación (AH/AF) disminuye en Vertisoles con labranza convencional en comparación con los sometidos a manejo agronómico donde se gestionan los residuos de cosechas o se emplea la siembra directa. El proceso responsable es la lixiviación y afecta no sólo al C

sino también a elementos móviles como el nitrógeno (García-Silva *et al.*, 2005; 2006). En el caso del pH, P, K y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se ha mencionado que no sufren modificaciones a través de los años con los sistemas de labranza (Ribón *et al.*, 2003).

Las prácticas agronómicas recomendadas para restablecer la fertilidad química en la mayoría de los suelos agrícolas con problemas de compactación como los Vertisoles son el subsoleo e incorporación de diferentes fuentes de MO (Coulombe *et al.*, 2000). El subsoleo es utilizado para evitar la acumulación de MO sólo en la superficie y optimizar la fertilización con N en el caso de un pastizal y el cultivo de caña (Sánchez-Vera *et al.*, 2003). Otros autores recomiendan la mínima alteración del suelo (agricultura de conservación), para que la biomasa microbiana y nutrientes como el N inorgánico y P extractable se puedan concentrar en la superficie del suelo (0-10 cm), y de esa manera promover mejores condiciones para la captura de carbono (Salinas-García *et al.*, 2001, 2002).

Varias investigaciones han demostrado que, con la reducción de la labranza, la actividad biológica mejora la estructura del suelo y se presenta mayor tasa de recambio de nutrientes, lo que hace al sistema más dinámico, sobre todo después de 10 años con este manejo (Fregoso Tirado *et al.*, 2008). Asimismo, los procesos de salinización son detenidos o aminorados y la saturación del suelo se reduce (Covarrubias, 1985⁵). Ramírez-Barrientos *et al.* (2006) indican que aquellas características que presentan detrimento en labranza cero, como la porosidad y la retención de humedad, no afectan demasiado el desarrollo de los cultivos y los rendimientos son cercanos a los obtenidos con labranza convencional. De la misma manera, se indica que con la adición de estiércol bovino, practicando labranza mínima o cero (Castellanos, 1985⁴) o con la incorporación de residuos vegetales, se incrementan los contenidos de Nt, MO, P, Ca, Mg y CIC (Rosales y Figueroa, 1985⁷; Lee-Rodríguez y Núñez 1985³; Oleschko *et al.*, 1996; Sánchez-Hernández *et al.*, 2003, 2006; Ramírez-Barrientos *et al.*, 2006).

En algunas ocasiones no hay cambios en las variables químicas por la incorporación de MO, debido a la nula descomposición del rastrojo de cosecha que no permite cambios en las variables Nt, P-Olsen y pH (Sánchez-Hernández *et al.*, 2003). En ese sentido, es importante la incorporación de los residuos de cosecha,

⁷ Rosales, R. y J. M. Figueroa Vargas. 1985. Diferentes prácticas de labranza para rye grass en suelos arcillosos del Valle de Mexicali. Distrito de riego 014. SARH. Primera reunión nacional sobre manejo de suelos arcillosos y su implicación en la agricultura. Del 2 al 5 de octubre de 1985. Celaya, Gto. Memorias. UACh, Suelos. Chapingo, México.

irrigación o modificación en el régimen de humedad del suelo e investigación en la actividad biológica para determinar la tasa de captura de C (Gutiérrez Castorena *et al.*, 2015).

FERTILIZACIÓN Y MANEJO

Gran parte de la investigación acerca de la fertilización en Vertisoles se ha realizado en cultivos de caña de azúcar, gracias a los esfuerzos de un grupo de investigación multidisciplinario en el Campus Tabasco, del Colegio de Postgraduados. Salgado-García *et al.* (2000) propusieron una dosis óptima de fertilización para la caña de azúcar de 160-80-80 kg ha⁻¹ (N-P-K) que se aplica en bandas y después recomiendan enterrar el fertilizante para incrementar los rendimientos. Si se realiza esta última práctica, la eficiencia de recuperación del N es de 20%, superior a la obtenida mediante la aplicación superficial; además, es necesario que la fertilización se realice a los tres meses después de la siembra (Salgado-García *et al.*, 2001). Esta tendencia también fue observada en sorgo en donde se recomienda fraccionar las dosis de fertilizante para aumentar la eficiencia del N (Espinosa *et al.*, 2002). En otros trabajos, Salgado-García *et al.* (2003) demostraron que al agregar 160-35-67 kg ha⁻¹ (N-P-K), aplicado como una mezcla de sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄, superfosfato triple (10Ca (H₂PO₄)₂-H₂O-2HF) y KCl, enterrado tres meses después del rebrote, se producen los mayores incrementos en el rendimiento de la caña de azúcar en comparación con el testigo en los Vertisoles.

Palma-López *et al.* (2002) propusieron un sistema integrado de fertilización (N, P, y K) para el ingenio azucarero Azucarmex, Tabasco. Utilizaron un modelo conceptual fundamentado en el balance entre la demanda del nutrimento por el cultivo, el suministro que hace de éste el suelo y la eficiencia del fertilizante. Las dosis de fertilización obtenidas debieron ser ajustadas para generar una recomendación viable para la caña de azúcar en cada clase de suelo (Fluvisol, Vertisol, Cambisol, Luvisol y Leptosol), donde los Vertisoles son la unidad de suelo que ocupa mayor área (36.9% del total del ingenio). En este caso particular la dosis recomendada fue de 34, 0, 105 kg ha⁻¹ NPK, debido a que los Vertisoles tienen la capacidad para restablecer sus propiedades químicas; sin embargo, las propiedades físicas pueden ser modificadas impidiendo el enraizamiento de la caña de azúcar, pero este fenómeno puede ser revertido con el subsoleo.

Los autores indican que las dosis recomendadas por el modelo pueden lograr sus máximos rendimientos si el resto de las labores de cultivo (resiembra, drenaje y variedades empleadas) se realizan en tiempo.

La fertilización con N y la implementación de sistemas de cero labranza con rotación de cultivos tienen el potencial de incrementar el secuestro de SOC y mantener altos rendimientos de cultivos como sorgo, trigo, maíz y caña de azúcar en los Vertisoles irrigados del centro de México. También las cantidades de C incrementan sus concentraciones dependiendo de la cantidad de N agregado; este efecto se ve magnificado cuando se emplea la labranza de conservación y rotación de cultivos (Follett *et al.*, 2005). La fertilización con P en Vertisoles está relacionada con la humedad del suelo, al aumentar la tensión entre la matriz del suelo y las moléculas de agua. Ocurre después un déficit de P, y las plantas sufren estrés afectando algunos parámetros como altura, diámetro y peso de hojas (Rivera-Hernández *et al.*, 2009; 2010).

Existen, aunque en menor cantidad, algunos esfuerzos por investigar la dinámica de otros nutrientes en la fertilización de Vertisoles. El K⁺ ha sido quizá uno de los nutrientes más estudiados en estos suelos, debido a su alta capacidad amortiguadora que limita su disponibilidad (Bolio-López *et al.*, 2008). Este elemento abunda de manera natural en algunos suelos principalmente cuando se forman a partir de rocas ígneas; sin embargo, es necesario agregar fertilizantes potásicos para aumentar los rendimientos de cosecha tanto en manejo convencional (Zúñiga-Estrada *et al.*, 2010) como en fertirriego (Vidal-Martínez *et al.*, 2006), sobre todo en suelos derivados de otro tipo de materiales parentales (rocas sedimentarias o metamórficas). Lozano García *et al.* (2011) recomiendan utilizar labranza mínima como una forma de liberar más K⁺ a la solución del suelo en la capa arable.

CONSIDERACIONES FINALES ACERCA DEL MANEJO DE VERTISOLES

De acuerdo con la revisión de literatura se puede indicar que hay cuatro líneas o estrategias que se deben seguir en el manejo agronómico de los Vertisoles en México, las cuales son:

a) Mecanización: Los suelos deben ser preparados para la siembra en momentos específicos (según el contenido de humedad), para que el paso de la maquinaria o de la tracción animal no se vea

impedido y pueda prepararse el terreno de manera adecuada (Sánchez-Vera *et al.*, 2003). Algunas alternativas que se proponen son: uso de cultivos de cobertura para evitar la pérdida de humedad; mantener el contenido de humedad con riegos o calendarizar los riegos para el paso de la maquinaria; dejar una cubierta de rastrojo (aunque puede conllevar a fenómenos de compactación con el tiempo) y adicionar estiércol. También es necesario aumentar la investigación tanto de implementos y rodamientos necesarios para la mecanización de los Vertisoles.

b) Compactación. Este fenómeno está relacionado tanto con el paso de la maquinaria como con las técnicas agrícolas. En el primer caso, hay un creciente interés para utilizar diferentes sistemas arado-tractor que repercutan de manera reducida su paso a través del terreno, lo que implicará un ahorro sustancial en la preparación del terreno para la siembra. Además, se está recomendando la agricultura de conservación o la labranza convencional con incorporación de residuos; aunque es necesario puntualizar que se deben de considerar las condiciones ambientales y socioeconómicas para el éxito de estas prácticas.

c) Drenaje. Esta práctica debe ser prioritaria, ya que de esto depende en gran medida los cambios en las características físicas y químicas por lo que es necesario aumentar la investigación hidráulica tanto en los sistemas de temporal como los de riego.

d) Fertilización. La aplicación de macro y micronutrientes (mediante material orgánico o sintético) son importantes para obtener mayores rendimientos y hacer productivos los agro-ecosistemas. Sin embargo, hasta la fecha pocos han sido los intentos por generar información para los Vertisoles de México con un enfoque de sistemas y no con un modelo de "caja negra". En ese sentido, es prioritario optimizar las prácticas de fertilización con sistemas integrados que involucren el levantamiento de suelos para indicar cómo son y en dónde ocurren.

Es conveniente también considerar los factores de formación de los Vertisoles y sus procesos pedogenéticos, debido a la gran mega-diversidad de condiciones que ocurren en nuestro país. Aunque todos comparten el proceso de vertización, es necesario tomar en cuenta los procesos de alcalinización y salinización los cuales están relacionados con su degradación; mientras que los procesos de melanización o antropogenización indican que el manejo de los Vertisoles es el correcto. La caracterización de materiales parentales ha sido

realizada por Sotelo *et al.* (2013) en los estados de Veracruz y Tamaulipas y estudios geológicos por Geissen *et al.* (2007) en Campeche.

Finalmente, es importante resaltar que la mayoría de las investigaciones fueron realizadas en centros de investigación principalmente en Villa Diego, Valle de Santiago, Guanajuato; Chontalpa, Tabasco; Campeche y Linares, Nuevo León y pocos han sido realizados directamente con productores que posean parcelas con esta clase de suelo. Además, una gran cantidad de estudios no clasificaron el suelo dónde se realizó el experimento, lo que es una limitante para la transferencia de tecnología a nivel nacional e internacional.

CONCLUSIONES

- Aunque se han realizado algunas investigaciones para establecer el manejo de Vertisoles en México, estas se han generado principalmente en campos experimentales y contemplando sólo algunas de sus propiedades. La mayoría de las recomendaciones para mejorar su fertilidad química son muy generales se pueden aplicar a diversas clases de suelo, lo que significa una pobre comprensión de sus propiedades, además hay una escasa relación con la fertilidad física.
- La degradación de los Vertisoles por compactación y declinación de su fertilidad física se ha incrementado con los años en nuestro país. Una alternativa que se está promoviendo es la labranza de conservación, sin considerar que estos suelos se presentan en diversas regiones agroecológicas con diferentes factores y procesos pedogenéticos que requieren investigación puntual.
- Los Vertisoles son uno de los suelos más productivos de nuestro país, por lo que es indispensable que exista una o varias instituciones responsables de generar y aplicar conocimiento en diversas prácticas agronómicas y se considere a los diferentes actores sociales.

LITERATURA CITADA

- Bolio-López, G. I., S. Salgado-García, D. J. Palma-López, L. C. Lagunes-Espinoza, M. Castelán-Estrada y J. D. Etchevers B. 2008. Dinámica del potasio en Vertisoles y Fluvisoles cultivados con caña de azúcar *Terra Latinoamericana* 26: 253-263.
- Bravo-Garza, M. R. and R. B. Bryan. 2005. Soil properties along cultivation and fallow time sequences on Vertisols in Northeastern Mexico. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 473-481.

- Bravo-Garza, M. R., R. B., Bryan, and P. Voroney. 2009. Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. *Geoderma* 151: 150-156.
- Bravo-Garza, M. R., P. Voroney, and R. B. Bryan. 2010. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of ^{14}C labeled maize residues and wetting and drying cycles in Vertisols. *Soil Biol. Biochem.* 42: 953-959.
- Coulombe, C. E., L. P. Wilding, and J. B. Dixon. 2000. Vertisols. pp. 269-286. *In*: M. E. Sumner (ed.). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. New York, NY, USA.
- Espinosa F., J., E. Carrillo A., D. J. Palma L., J. J. Peña C. y S. Salgado G. 2002. Eficiencia de la fertilización nitrogenada en sorgo con la técnica isotópica ^{15}N , en un Vertisol con drenaje subsuperficial. *Terra* 20: 129-139.
- Follett, R. F., J. Z. Castellanos, and E. D. Buenger. 2005. Carbon dynamics and sequestration in an irrigated Vertisol in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 83: 148-158. doi. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.02.013>.
- Fregoso Tirado, L. F. 2008. Cambios en las características químicas y microbiológicas de un Vertisol inducidos por sistemas de labranza de conservación. *Terra Latinoamericana* 26: 161-170.
- Fuentes, M., B. Govaerts, F. de León-González, C. Hidalgo, L. Dendooven, K. D. Sayre, and J. D. Etchevers. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *Eur. J. Agron.* 30: 228-237.
- García Silva, R., D. Espinosa Victoria, B. Figueroa Sandoval, N. E. García Calderón, J. F. Gallardo Lancho y P. Paneque Rondón. 2005. Efecto de la siembra directa en las reservas orgánicas de un Vertisol de Guanajuato, México. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 14: 38-44.
- García Silva, R., D. Espinosa Victoria, B. Figueroa Sandoval, N. E. García Calderón y J. F. Gallardo Lancho. 2006. Reservas de carbono orgánico y de fracciones húmicas en un Vertisol sometido a siembra directa. *Terra Latinoamericana* 24: 241-251.
- Geissen, V., C. Kampichler, J. J. López-de Llergo-Juárez, and A. Galindo-Alcántara. 2007. Superficial and subterranean soil erosion in Tabasco, tropical Mexico: Development of a decision tree modeling approach. *Geoderma* 139: 277-287.
- Geissen, V., J. G. López de Llergo-Juárez, A. Galindo-Alcántara y R. Ramos-Reyes. 2008. Erosión superficial y carstificación en Macuspana, Tabasco, Sureste de México. *Agrociencia* 42: 605-614.
- Geissen, V., R. Sánchez-Hernández, C. Kampichler, R. Ramos-Reyes, A. Sepulveda-Lozada, S. Ochoa-Goana, B. H. J. de Jong, E. Huerta-Lwanga, and S. Hernández-Daumas. 2009. Effects of land use change on some properties of tropical soils- An example from Southeast Mexico. *Geoderma* 151: 87-97.
- Gutiérrez-Castorena, E. V., M. C. Gutiérrez-Castorena, and C. A. Ortiz-Solorio. 2015. Carbon capture and pedogenetic processes by change of moisture regime and conventional tillage in Aridisols. *Soil Tillage Res.* 150: 114-123. doi. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.02.001>.
- Gutiérrez-Rodríguez, F., A. González Huerta, R. Serrato Cuevas y T. H. Norman Mondragón. 2004. Evaluación tecnológico-explotativa del conjunto multirrado-tractor J. D. Modelo 4235, en la labor de preparación primaria de un suelo Vertisol. *Cienc. Ergo Sum* 11: 171-176.
- Gutiérrez-Rodríguez, F., A. González Huerta, D. J. Pérez-López, O. Franco-Mora, E. J. Morales-Rosales, P. Saldívar-Iglesias y C. G. Martínez-Rueda. 2012. Compactación inducida por el rodaje de tractores agrícolas en un Vertisol. *Terra Latinoamericana* 30: 1-7.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Conjunto de datos vectorial Edafológico escala 1: 250 000 Serie II (Continuo Nacional). Edición: 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- ISRIC (International Soil Reference and Information Centre). 2013. The Vertisols. Disponible en www.isric.org/isric/webdocs/docs/major_soils_of_the_world/set3/vr/vertisol.pdf. (Consulta: noviembre 15, 2013).
- Krasilnikov, P., M. C. Gutiérrez-Castorena, R. J. Ahrens, C. O. Cruz-Gaistardo, S. Sedov, and E. Solleiro-Rebolledo. 2013. The soils of Mexico. Springer Science+Business Media Dordrecht. Netherlands.
- Lozano-García, B., L. Parras-Alcántara y J. L. Muriel-Fernández. 2011. Soil tillage effects on monovalent cations (Na^+ and K^+) in vertisols soil solution. *Catena* 84: 61-69.
- Medinilla-Salinas, L., M. de la C. Vargas-Mendoza, S. López-Ortiz, C. Ávila-Reséndiz, W. Bruce-Campbell, and M. C. Gutiérrez-Catorena. 2014. Growth, productivity and quality of *Megathyrus maximus* under cover from *Gliricidia sepium*. *Agrofor. Syst.* 87: 891-899.
- Moncada de la Fuente, J., M. Anaya Garduño, C. Ortiz Solorio, P. Sánchez García y J. Chacón Rodríguez. 2013. Folleto técnico. Suelo: Protejamos el suelo que nos da vida. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.
- Mora, M., V. Ordaz, J. Z. Castellanos, A. Aguilar Santelises, F. Gavi y V. Volke H. 2001. Sistemas de labranza y sus efectos en algunas propiedades físicas en un Vertisol, después de cuatro años de manejo. *Terra* 19: 67-74.
- Navar, J., J. Mendez, R. B. Bryan, and N. J. Kuhn. 2002. The contribution of shrinkage cracks to bypass flow during simulated and natural rainfall experiments in northeastern Mexico. *Can. J. Soil Sci.* 82: 65-74.
- Oleschko, K., J. D. Etchevers B., and L. Osorio J. 1993. Pedological features as indicators of the tillage effectiveness in Vertisols. *Soil Tillage Res.* 26: 11-31.
- Oleschko, C., J. D. Etchevers, and A. Hernández. 1996. Structure and pedofeatures of Guanajuato (México) Vertisol under different cropping systems. *Soil Tillage Res.* 37: 15-36.
- Ortega-Larrocea, M. P., C. Siebe, G. Becárd, I. Méndez, and R. Webster. 2001. Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal spores in the soil of the Mezquital Valley of Mexico. *Appl. Soil Ecol.* 16: 149-157.
- Ortiz S., C. A. y M. C. Gutiérrez C. 1995. Clasificación de Vertisoles en la taxonomía de suelos versión 1992. pp. 231-236. *In*: J. F. Ruiz Figueroa (ed.). *Manejo de suelos arcillosos para una agricultura sustentable*. 2a Reunión Nacional sobre Suelos Arcillosos del 10 al 14 de Noviembre de 1994. Mérida, Yucatán, México.
- Ortiz S., C. A. y M. C. Gutiérrez Castorena. 1999. Fundamentos de pedología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Palma-López, D. J., S. Salgado G., J. J. Obrador O., A. Trujillo N., L. del C. Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruíz B. y M. A. Carrera M. 2002. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra* 20: 347-358.

- Ramírez-Barrientos, C. E., B. Figueroa-Sandoval, V. Ordaz-Chaparro y V. H. Volke-Haller. 2006. Efecto del sistema de labranza cero en un Vertisol Terra Latinoamericana 24: 109-118.
- Ribón C., M. A., S. Salgado García, D. J. Palma López y L. C. Lagunes Espinoza. 2003. Propiedades químicas y físicas de un Vertisol cultivado con caña de azúcar. *Interciencia* 28: 154-159.
- Rivera-Hernández, B., E. Carrillo-Ávila, J. J. Obrador-Olán, J. F. Juárez-López, L. A. Aceves Navarro, and E. García-López. 2009. Soil moisture tension and phosphate fertilization on yield components of A-7573 sweet corn (*Zea mays* L.) hybrid in Campeche, Mexico. *Agric. Water Manage.* 96: 1285-1292.
- Rivera-Hernández, B., E. Carrillo-Ávila, J. J. Obrador-Olán, J. F. Juárez-López, and L. A. Aceves-Navarro. 2010. Morphological quality of sweet corn (*Zea mays* L.) ears as response to soil moisture tension and phosphate fertilization in Campeche, Mexico. *Agric. Water Manage.* 97: 1365-1374. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04.001>.
- Ruíz Figueroa, J. F. 1995. Manejo de suelos arcillosos para una agricultura sustentable. Trabajos presentados en la segunda reunión nacional sobre manejo de suelos arcillosos, Mérida, Yucatán. Chapingo, México. ISBN: 9688843032 9789688843031
- Salgado G., S., E. R. Núñez, J. J. Peña, J. D. Etchevers, D. J. Palma y M. R. Soto H. 2000. Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* 34: 689-698.
- Salgado G., S., R. Núñez E., J. J. Peña C., J. D. Etchevers B., D. J. Palma L. y M. R. Soto H. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante en soca de caña de azúcar sometida a diferentes manejos de fertilización. *Terra* 19: 155-162.
- Salgado G., S., R. Núñez, J. J. Peña, J. D. Etchevers, D. J. Palma y M. R. Soto H. 2003. Manejo de la fertilización en el rendimiento, calidad del jugo y actividad de invertasas en caña de azúcar. *Interciencia* 28: 576-580.
- Salinas-García, J. R., J. de J. Velázquez-García, M. Gallardo-Valdez, P. Díaz-Mederos, F. Caballero-Hernández, L. M. Tapia-Vargas, and E. Rosales-Robles. 2002. Tillage effects on microbial biomass and nutrient distribution in soils under rain-fed corn production in central-western Mexico. *Soil Tillage Res.* 66: 143-152. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00022-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00022-3).
- Salinas-García, J. R., A. D. Báez-González, M. Tiscareño-López, and E. Rosales-Robles. 2001. Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 59: 67-79. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00187-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00187-2).
- Sánchez-Hernández, R., D. J. Palma López, J. J. Obrador Olán y U. López Noverola. 2003. Efecto de los rastrojos sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo Vertisol y rendimientos de caña de azúcar (*saccharum officinarum* L.) en Tabasco, México. *Interciencia (Venezuela)* 28: 404-407.
- Sánchez Hernández, R., D. J. Palma López, M. D. Hidalgo Moreno, V. Ordaz-Chaparro y G. S. Benedicto Valdés. 2006. Regeneración estructural de un suelo arcilloso por aportes de Vermicompost en la Chontalpa, Tabasco, México. *Univer. Cienc.* 22: 13-26.
- Sánchez-Vera, G., J. J. Obrador Olán, D. J. Palma López y S. Salgado García. 2003. Densidad aparente en un Vertisol con diferentes agrosistemas. *Interciencia* 28: 347-351.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2016. Cierre de la producción agrícola por estado. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>. (Consulta: enero 15, 2016).
- Siebe, C. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 10: 15-21.
- Siebe, C. and E. Cifuentes, 1995. Environmental impact of wastewater irrigation in central México: An overview. *Int. J. Environ. Health Res.* 5: 161-173.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. 12th ed. US Department of Agriculture; Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Sotelo R., E., M. C. Gutiérrez-Castorena, C. A. Ortiz-Solorio, G. Cruz-Bello y M. A. Segura-Castruita. 2006. Identificación de Vertisoles de origen sedimentario a través de su firma espectral. *Agric. Téc. Méx.* 32: 303-312.
- Sotelo-Ruíz, E. D., M. del C. Gutiérrez-Castorena, G. M. Cruz-Bello, and C. A. Ortiz Solorio 2013. Physical, chemical, and mineralogical characterization of Vertisols to determine their parent material. *Interciencia* 38: 488-495.
- Sotelo-Ruíz, E., Ma. del C. Gutiérrez-Castorena, C. A. Ortiz Solorio, G. Cruz Botello y M. A. Segura-Castruita. 2008. Historia y desarrollo de la clasificación de Vertisoles en el sistema FAO y taxonomía de suelos. *Terra Latinoamericana* 26: 325-332.
- Vidal-Martínez, J. L., R. Núñez E., I. Lazcano F., J. D. Echevers B. y R. Carrillo G. 2006. Nutrición potásica del brócoli (*Brassica oleracea*) con manejo convencional y fertirrigación en un Vertisol en invernadero. *Agrociencia* 40: 1-11.
- Zúñiga-Estrada, L., J. J. Martínez-Hernández, G. A. Baca-Castillo, A. Martínez-Garza, J. L. Tirado-Torres, J. Kohashi-Shibata y J. Cruz-Díaz. 2010. Efecto de la fertilización con potasio en un Vertisol sobre la relación cantidad/intensidad (Q/I). *Terra Latinoamericana* 28: 319-325.

Redescubriendo El Suelo: Su Importancia Ecológica y Agrícola

Noé Manuel Montaña^{1‡} y Rosalva García Sánchez²

¹ Departamento de Biología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Apdo. Postal 55-535. 09340 Ciudad de México, México.

[‡] Autor responsable (nmma@xanum.uam.mx)

² Laboratorio de Zonas Áridas, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. 09230 Ciudad de México, México.



Redescubriendo el suelo: su importancia ecológica y agrícola es un libro muy completo, actualizado y sin duda será de consulta obligada para quienes hacen investigación edafológica y como material elemental para los cursos de pre- y posgrado de suelo y materias afines, tanto en México como en América Latina.

El libro contiene 15 capítulos muy bien desarrollados, concretos y científicamente sustentados; escritos por cerca de 40 especialistas en el estudio del suelo y adscritos a distintas instituciones nacionales e internacionales. El libro cuenta con una presentación y una introducción que plantean el contexto del surgimiento del libro,

Como citar la reseña:

Montaña, N. M. y R. García Sánchez. 2016. Reseña del libro: Redescubriendo el suelo: su importancia ecológica y agrícola. Terra Latinoamericana 34: 467-469.

Recibido: septiembre de 2016. Aceptado: septiembre de 2016.
Terra Latinoamericana 34: 467-469.

así como sus alcances y contenido, en ambos queda claro que se trata de una obra resultado del primer Simposio Metropolitano de las Ciencias del Suelo que persigue promover la investigación, enseñanza y difusión de la importancia del suelo. En el primer capítulo se describen los conceptos y proyecciones de las futuras líneas de investigación edafológica, entre las que destacan: los estudios de génesis y evolución pedológica, la microbiología aplicada, la caracterización de sustancias húmicas y la biogeoquímica ambiental, todas enfocadas a comprender el funcionamiento de los ecosistemas y la producción agrícola. En el segundo y tercer capítulo se abordan dos aspectos cruciales, por un lado, la educación y enseñanza del suelo como una política pública para concientizar sobre la preservación del suelo y, por el otro, la necesidad de contar con una propuesta legislativa dirigida al manejo sustentable e impacto ambiental de los suelos agrícolas. Estos capítulos son propositivos y hacen un recuento histórico que fundamenta el creciente conocimiento de los suelos y la agricultura desde tiempos prehispánicos hasta la actualidad como una necesidad social. No obstante, el enfoque que abordan es el agronómico y no tanto el ecológico, el cual también pudo resultar interesante desarrollarlo en el libro.

Los capítulos cuatro al seis, presentan datos y discuten modelos sobre la formación del suelo, los cuales van desde estudios de caso sobre génesis de suelo y del relieve como factor principal en el desarrollo del suelo, hasta aspectos históricos que involucran la examinación de paleoambientes y evidencias geológicas. En los capítulos del siete al diez se reportan los resultados de estudios relacionados con dos tópicos en los que el suelo es esencial, la producción del alimento que sustenta la ganadería lechera y su papel en la captura de carbono. En el capítulo siete se caracteriza y clasifica a los suelos de dos unidades de producción lechera en Michoacán para evaluar los cambios en las propiedades edáficas en relación con el uso de la tierra, ofreciendo datos sobre su estado de conservación y uso como agostaderos que sustentan la producción de ganado lechero. Los capítulos ocho

al diez fueron enfocados a analizar la dinámica del mantillo, la materia orgánica, la biomasa microbiana, los ácidos húmicos y fúlvicos, así como la función de la composta como mejorador del suelo, dejando en claro el enlace entre estos elementos y los procesos que mantienen la fertilidad edáfica, así como con la captura y almacenamiento de carbono en el suelo resaltándolo como un sumidero importante de este elemento y de nutrimentos. En el capítulo 11 se estudia la mineralogía y geoquímica de dos suelos volcánicos en Puebla, dichos suelos tienen altos contenidos de minerales primarios (anfíboles, feldespatos y magnetita), aluminio y hierro, pero en particular la presencia de feldespatos en la fracción de arcilla y la ausencia de filosilicatos, sugieren que estos experimentan un débil pero único proceso de intemperización en condiciones ústicas. No obstante, por la información presentada en este capítulo, su ubicación hubiera sido mejor junto con los capítulos referentes a la génesis y desarrollo del suelo.

Los últimos cuatro capítulos tratan de estudios de caso con aspectos aplicados hacia algunas problemáticas ambientales, como es el caso de la acidificación del suelo y su relación con el porcentaje de saturación bases y la capacidad de intercambio catiónico (capítulo 12), los hongos micorrízicos arbusculares en suelos agrícolas y su potencial en la producción agrícola (capítulo 13), la contaminación con metales pesados (capítulo 14) y la aplicación de técnicas de bioingeniería para la recuperación de la vegetación y el control de la erosión (capítulo 15). Aunque estos capítulos brindan claros e importantes ejemplos del potencial de los suelos para resolver problemáticas ambientales y de producción de alimento, hubiera sido deseable ampliar su información con respecto a otros grupos microbianos del suelo (p. ej.: bacterias) y procesos biogeoquímicos que regulan la fertilidad; no obstante, una obra nunca está terminada del todo, sino que es un continuo de conocimiento creciente y sería una verdadera sorpresa poder contar con un segundo volumen que emerja de un segundo Simposio Metropolitano de las Ciencias del Suelo.

Todos los capítulos están sustentados por bibliografía actualizada, especializada y cuidadosamente seleccionada, además de estar acompañados por fotografías, cuadros, gráficos a color y modelos, todos muy ilustrativos y completos que atraen al lector y facilitan la comprensión del texto. Así, este libro es fundamental y oportuno para los estudiosos del suelo, ya que brinda, tanto a los investigadores como a los estudiantes, un contexto actualizado sobre el suelo como un recurso no renovable en continuo deterioro, pero que a la vez ofrece múltiples servicios ambientales. Los capítulos del libro muestran, en conjunto, que el conocimiento histórico y actual acerca de los suelos es fundamental para complementar los estudios agronómicos y ecológicos que se realizan

en México; ya que el país cuenta con uno de los territorios más diversos en suelos y con información edáfica posiblemente única en el mundo. Así, este libro es una clara evidencia de los esfuerzos que se están realizando en México para el estudio de los suelos, por lo que podría ser un referente para otros países de América Latina; en consecuencia, le damos con gusto la bienvenida y al mismo tiempo lo recomendamos y celebramos ampliamente.

LITERATURA CITADA

Cruz-Flores, G. y A. B. López-López. 2015. Redescubriendo el suelo: importancia ecológica y agrícola. FES-Zaragoza, UNAM y CONACYT. Ciudad de México, México.

Revisores de este número Reviewers of this number

Alonso Báez, Moisés	INIFAP, C.E. Rosario Izapa. Tuxtla Chico, Chiapas, México.
Balderas Plata, Miguel Ángel	Profesor Investigador de la Facultad de Geografía, UAEMEX. Toluca Edo. de México, México.
Benavides Mendoza, Adalberto	Depto. de Horticultura, UAAAN. Saltillo, Coahuila, México.
Benedicto Valdés, Sergio	Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México.
Carrasquero, Armando	Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Maracay, Aragua, Venezuela.
Castillo González, Ana María	Depto. de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México, México.
Covarrubias Ramírez, Juan Manuel	INIFAP, C.E. Saltillo. Saltillo, Coahuila, México.
Cristóbal Acevedo, David	Depto. de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México,
Delgado Martínez, Rafael	Fac. de Ingeniería y Ciencias, Centro Universitario Victoria. Cd. Victoria, Tamaulipas, México.
Espinosa Ramírez, Martín	INIFAP, C.E. Río Bravo. Río Bravo, Tamaulipas, México.
Gómez Guerrero, Armando	Postgrado Forestal, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México.
Khalil Gardezi, Abdul	Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México.
López Herrera, Maritza	Centro de Investigaciones Biológicas. UAEH. Pachuca, Hidalgo, México.
Martínez Rueda, Carlos G.	Fac. de Ciencias Agrícolas, UAEMex. Piedras Blancas, Toluca, México.
Orozco Corral, Alfonso L.	Investigación y Desarrollo Tecnológico Grupo La Norteña. Cuauhtémoc, Chih., México.
Prado Flores, Guadalupe	Depto. de Producción Agrícola y Animal. UAM-Xochimilco. Cd. de México, México.
Reyna Trujillo, Teresa de J.	Instituto de Geografía, UNAM. Investigación Científica. Ciudad de México, D. F.
Soria Ruíz, Jesús	INIFAP C. E. Toluca. Zinacantepec, Edo. de México, México.
Turrent Fernández, Antonio	INIFAP, C.E. Valle de México. Coatlinchán, Texcoco, Edo. de México, México.
Zamudio González, Benjamín	INIFAP C. E. Toluca. Zinacantepec, Edo. de México, México.
Zelaya, Daniela K.	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Exp. Balcarce Balcarce, Argentina.

ÍNDICE DE AUTORES VOLUMEN 34

AUTHORS INDEX VOLUME 34

- Acevedo Sandoval, O. A. 409
 Acosta Mireles, M. 357
 Aguilar Carpio, C. 419
 Aguilar Mariscal, I. 419
 Aldana Madrid, M. L. 385
 Alvarado Cárdenas, L. O. 83
 Argumedo Espinoza, J. A. 271, 289
 Ascencio Hernández, R. 431
 Ayala Carrillo, M. R. 139
 Ayala, F. 39
 Baca Castillo, G. A. J. 201
 Báez Pérez, A. 311, 357
 Battistus, A. G. 169
 Beltrán Hernández, R. I. 409
 Benavides Hernández, R. 441
 Benítez Riquelme, I. 393
 Bolaños González, M. 73, 271
 Briones, O. 39
 Bucio Villalobos, C. M. 229
 Bulegon, L. G. 169
 Bullock, S. H. 39
 Calderón Zavala, G. 177
 Camacho Rico, A. 61
 Campo Alves, J. 367
 Campo, J. 31
 Cano Salinas, L. 409
 Carrillo Anzures, F. 357
 Carrillo Flores, G. 431
 Chávez Bustillos, C. 441
 Chávez Vergara, B. 1
 Cloter, H. 125
 Conde Martínez, V. F. 419
 Covalada, S. 97, 321
 Cram, S. 1
 Cruz Cabrera, J. C. 271
 Cruz Gaistardo, C. O. 271, 289
 Cueva, A. 253
 de Jong, B. 289
 Delgadillo Martínez, J. 177
 Díaz Serrano, F. R. 229
 Díaz Solís, H. 73
 Escalante Estrada, J. A. S. 419
 Escalante Rebolledo, A. 367
 Espinosa Espinosa, B. 431
 Etchevers Barra, J. D. 83, 125, 289, 311, 321, 339, 357, 367
 Flores Magdaleno, H. 431
 Galicia, L. 1
 Gamboa Cáceres, A. M. 1
 Garatuza Payan, J. 253
 García Oliva, F. 31, 39
 García Sánchez, R. 39, 467
 Garrido, E. 311
 González Molina, L. 357
 González Ramírez, C. A. 409
 Grant, W. E. 73
 Guimarães, V. F. 169
 Gutiérrez Castorena, E. V. 457
 Gutiérrez Castorena, Ma. Del C. 457
 Gutiérrez Villalpando, V. 139
 Hengel, M. 385
 Herrera Silveira, Jorge A. 61
 Hidalgo, C. 311, 321, 367
 Inagaki, A. M. 169
 Kestring, D. 169
 Klein, J. 169
 Kothmann, M. M. 73
 Libert Amico, A. 113
 López Castañeda, C. 393
 López Collado, J. 367
 López Santos, A. 239
 Martínez Jaime, O. A. 229
 Martínez Téllez, R. 441
 Martínez, M. 125
 Matus, F. 311, 321
 Maya, Y. 39
 Medrano Ruedaflores, E. 187
 Mejía Contreras, J. A. 393, 419
 Merino, C. 311
 Mesta Fernández, M. E. 155
 Miranda Domínguez, L. E. 393
 Montaña, N. M. 39, 467
 Navarrete Segueda, A. 31
 Orozco Corral, A. L. 441
 Ortiz Solorio, C. A. 457
 Ortiz Texon, J. A. 177
 Parra Terraza, S. 219
 Paz Pellat, F. 73, 83, 97, 187, 271, 289, 311, 321, 339, 357
 Pech, E. 61

- Pech, M. 61
Peña Ramírez, V. 1
Pérez López, G. 367
Perroni, Y. 39
Pulido Madrigal, L. 207
Quintero Lizaola, R. 201
Quispe Limaylla, A. G. 201
Ramírez-Ramírez, J. 61
Rampim, L. 169
Ranero, A. 97
Robles Zazueta, C. A. 253
Rodríguez Laguna, R. 409
Rodríguez Mendoza, M. N. 177
Rodríguez Olibarría, G. 385
Romero Benítez, V. M. 271
Salazar López, N. J. 385
Saynes Santillán, V. 1, 83
Siebe, C. 1, 31, 39
Silveira Gramont, M. I. 385
Tapia Torres, Y. 39
Teague, W. R. 73
Teutli Hernández, C. 61
Torres Guerrero, C. A. 457
Torres Morales, J. J. 229
Trench, T. 113
Trinidad Santos, A. 419
Troyo, E. 39
Valdez Lazalde, J. R. 409
Valerio Luna, S. G. 201
Valtierra Pacheco, E. 367
Valverde Flores, M. I. 441
Yépez, E. 39, 253
Zapata Martelo, E. 139
Zuno Floriano, F. G. 385

TERRA LATINOAMERICANA

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.

NORMAS PARA PUBLICAR EN TERRA LATINOAMERICANA

ENVÍO DE MANUSCRITOS

Cada artículo deberá acompañarse de una carta dirigida al editor en donde se manifieste que los autores del documento están de acuerdo con el nivel de autoría y contenido del mismo. Así como también, proponer a tres posibles revisores expertos en el tema, que no pertenezcan a la institución de los autores.

La contribución debe enviarse en formato electrónico a través de Open Journal Systems:

<http://www.revistas-conacyt.unam.mx/terra/index.php/terra/author/submit>

Se enviará una carta de recepción si la contribución cumple con la temática y requerimientos de la revista.

No se aceptan trabajos publicados o en proceso de arbitraje en otras revistas. Si han sido presentados en congresos no deben tener ISBN.

El seguimiento de la edición se llevará a cabo por el sistema OJS, solamente con el autor responsable.

Una vez aceptada la contribución para su publicación, se solicitará un pago de edición, el cual no se devolverá si por alguna razón se rechaza la contribución durante el proceso de publicación.

TIPOS DE MANUSCRITOS PARA PUBLICACIÓN

La Revista TERRA LATINOAMERICANA acepta trabajos en español, portugués, francés e inglés, sobre temas relacionados con la ciencia

del suelo y el agua. Éstos pueden ser artículos científicos, notas de investigación, ensayos, cartas al editor y reseñas de libros.

Se entiende por **artículo científico** aquél basado en un trabajo de investigación en el cual se ha aplicado el método científico y se ha estudiado el efecto de diferentes tratamientos en la respuesta de un sistema, como metodología para comprobar o rechazar una hipótesis del trabajo.

Las **notas de investigación** son artículos basados en trabajos experimentales que presentan aspectos metodológicos novedosos o resultados que el autor desea publicar antes de finalizar su investigación.

Los **ensayos** son escritos basados en la revisión analítica de artículos científicos o informes de investigación, en los cuales el autor aporta su punto de vista sobre el tema y establece conclusiones respecto al estado actual del conocimiento del mismo.

En la sección **cartas al editor**, TERRA LATINOAMERICANA publicará aquellas que juzgue convenientes, las cuales deben presentar opiniones o comentarios de la comunidad científica sobre determinados temas. Esta parte tiene por objeto fomentar la discusión sobre temas publicados en las páginas de esta revista o de interés para la comunidad científica.

La **reseña de libros** es una sección destinada a dar a conocer las obras que sean de interés para los científicos del suelo.

Los trabajos que se envíen deberán ceñirse a estas normas y serán revisados por el Comité Editorial o por quien éste designe, antes de publicarse.

CONTENIDO Y FORMATO DEL MANUSCRITO

Los artículos científicos y las notas científicas que se presenten deberán constar de las siguientes partes:

1) Título, título en inglés; 2) Autor(es); 3) Institución(es) y dirección laboral de los autores; 4) Resumen; 5) Palabras clave; 6) Summary; 7) Index words; 8) Introducción; 9) Materiales y Métodos; 10) Resultados y Discusión; 11) Conclusiones y 12) Literatura Citada. El Comité Editorial podrá aceptar algunas modificaciones a esta estructura, cuando el tenor del texto así lo amerite.

Los ensayos deberán constar de las siguientes partes: 1) Título, título en inglés; 2) Autor(es); 3) Institución donde se desarrolló el trabajo y dirección laboral de los autores; 4) Resumen; 5) Palabras clave; 6) Summary; 7) Index words; 8) Introducción; 9) Desarrollo del tema, con los subtítulos que se estimen convenientes; 10) Discusión, cuando proceda; 11) Conclusiones y 12) Literatura Citada.

Las cartas al editor y las reseñas de libros no tienen un formato definido, pero no deberán exceder de dos cuartillas, a doble espacio, escritas con letra **Times New Roman 12**.

Todo trabajo a ser enviado para su posible publicación en esta revista deberá acompañarse de una carta de intensión dirigida al Editor, donde se incluya una breve descripción de los hallazgos más importantes y se indique institución, dirección, teléfono, fax y correo electrónico del autor responsable, con quien la revista mantendrá contacto (no más de una cuartilla a doble espacio, escrita en **Times New Roman 12**). El trabajo deberá enviarse en original, con datos del autor responsable (institución, dirección, teléfono, fax y correo electrónico), en papel tamaño carta a doble espacio, con márgenes de 2.5 cm en los cuatro costados y con las líneas numeradas. Las páginas, incluyendo las de los cuadros y las figuras, se numerarán progresivamente. El texto no deberá

exceder de 20 páginas, para un artículo científico, y de 8, para una nota científica, **incluidos cuadros y figuras**. En la primera versión, cada cuadro o figura deberá insertarse en el texto.

Los cuadros y las figuras sólo tendrán la información esencial y en ningún caso repetirán los datos que se presenten en otra forma. Se emplearán las unidades del Sistema Internacional de Unidades y Medidas (SI). **Por ejemplo, en lugar de ppm se usará mg kg^{-1} o mg L^{-1}** . Se deja un espacio entre el número y la unidad de medida (5 m, 42 °C). No se deja espacio entre el número y la unidad cuando se trata de porcentajes, ángulos y medidas de longitud o latitud (45°, 15%, 30° 15' 5'' N). Se usan espacios para dividir los números grandes en grupos de tres, tanto a la izquierda como a la derecha del punto decimal (143 570 y 21.345 678). Los números de cuatro dígitos se escriben sin espacio y sin coma. No se mezclan sustantivos con las unidades de medida (correcto: El contenido de agua es 23 mL kg^{-1} ; incorrecto: El contenido es 23 mL $\text{H}_2\text{O kg}^{-1}$).

El redondeo de cifras sigue tres reglas sencillas: 1) Si los primeros dos dígitos a descartarse son menores de 50, el dígito anterior no cambia. Ejemplo: 2.34489 se redondea 2.34. 2) Si los primeros dos dígitos a descartarse son mayores de 50, se suma 1 al número anterior. Ejemplo: 2.34617 se redondea 2.35. 3) Si los primeros dos dígitos a descartarse son 50, se suma 1 al número anterior si es impar y no se cambia si es par. Ejemplos: 3.3350 y 3.3450 se redondean 3.34.

Si solo hay una cifra y ésta es menor de 10, debe escribirse con palabras (cuatro ecotipos, seis regiones, nueve localidades); a diferencia de 16 árboles, 128 países. Sin embargo, si esa cifra está acompañada de alguna unidad del Sistema Internacional de Unidades y Medidas, debe expresarse con número (2 mL, 8 ng, 10 h).

Las figuras deberán estar en un formato que permita hacer modificaciones posteriores, respecto al tamaño de los números en los ejes, el grosor de las líneas en los mismos y el texto de las leyendas.

Todo el trabajo debe escribirse en letra **Times**

New Roman (incluyendo numeración en ejes, contenido y leyendas de figuras). El Título en español se escribirá en tamaño **14**; el Título en inglés, en tamaño **12**. El resto del texto se debe escribir en letra tamaño **12**, excepto la Literatura Citada, la cual va en tamaño **9**.

FORMATO PARA PUBLICACIÓN

En TERRA LATINOAMERICANA, los trabajos se publican con el formato que se describe enseguida; sin embargo, los manuscritos deben prepararse como se indicó en la sección anterior y tomando en cuenta, hasta donde sea posible, las instrucciones de este apartado. El personal editorial de la revista preparará la versión definitiva para su impresión en las páginas de la revista.

TÍTULO. El título se escribirá con minúsculas, excepto la primera letra de la palabra inicial, centrado, en negritas y tipo de letra **Times New Roman 14**; debajo del título en español, se colocará el título en inglés; éste se escribirá con minúsculas, excepto la primera letra de la palabra inicial, centrado, en negritas y tipo de letra **Times New Roman 12**. Para el encabezado de páginas se requiere un título corto, de 60 caracteres o menos.

Autores. Los nombres de los autores se redactarán de la siguiente manera: Primero se escribe el o los nombres del autor continuando con los apellidos. Los autores que tengan dos apellidos deberán incluirlos. Se omitirán títulos y grados. Las primeras letras de nombre(s) y apellido(s) se escribirán con mayúsculas. Los nombres de los autores se escribirán con letra **Times New Roman 12**, centrados en negritas, separados por comas, a un espacio después del título en inglés.

Institución(es) patrocinadora(s) y dirección de los autores. El objetivo de esta parte del artículo es dar el crédito respectivo a la institución que patrocinó el trabajo y que los lectores puedan contactar a los autores, en caso necesario; la dirección postal y electrónica del autor responsable deberán especificarse. Para los otros autores,

sólo incluir el nombre y su dirección laboral. Esta identificación se escribirá con minúsculas, excepto las siglas, debajo de los autores, centrada y con letra **Times New Roman 11**.

Notas al pie de página. Se podrán utilizar, cuando sea necesario para identificar información adicional; se numerarán progresivamente a través de todo el texto. **Deberán emplearse solo cuando sean imprescindibles.**

Forma de titular. Los títulos tienen diversos órdenes y señalan la posición de un apartado dentro del artículo.

Título de primer orden. Es el título principal del artículo (**Times New Roman 14**).

Título de segundo orden. A este tipo corresponden las diferentes partes del artículo; Resumen, Summary, Introducción, etc. Se escriben con mayúsculas, centrados, en negritas (**Times New Roman 12**).

Títulos de tercer orden. Se escriben al margen izquierdo, con minúsculas, excepto la primera letra de las palabras, en negritas, con espacios sencillos después del último texto escrito y antes del siguiente.

Títulos de cuarto orden. Se escriben al margen izquierdo, en negritas, con minúsculas (excepto la primera letra del título), con punto seguido de texto, sin numeración.

Títulos de quinto orden. Se escriben al margen izquierdo, sin negritas, con minúsculas (excepto la primera letra), con punto seguido de texto, sin numeración.

RESUMEN. Esta sección debe sintetizar, en un máximo de **300 palabras**, los aspectos más importantes del trabajo; esto es, justificación, importancia, método experimental (cuando corresponda) y conclusiones.

Palabras clave. Éstas **no deben incluir términos presentes en el título.** Se colocan a un espacio debajo del resumen, al margen izquierdo. El término "**Palabras clave**" se escribe con minúsculas, cursivas y en negritas; las palabras clave, con el mismo tipo de letra, cursivas, sin negritas. Se anotará un máximo de cinco palabras clave simples o compuestas. Ejemplo:

Palabras clave: *agroquímicos, toxicidad, ambiente.*

SUMMARY. Se siguen las mismas normas que para el Resumen en español.

Index words. Se seguirán las instrucciones dadas para **Palabras clave.**

INTRODUCCIÓN. En esta sección se indica el problema estudiado, su importancia y los objetivos del trabajo, los cuales llevan implícitas las hipótesis del mismo. Además, contiene los aspectos más relevantes del tema, tratados por otros autores e identificados en la revisión de literatura. La Introducción no debe exceder tres cuartillas, a doble espacio, con letra **Times New Roman 12.**

MATERIALES Y MÉTODOS. Esta sección debe describir las características relevantes de los materiales usados en el estudio y los métodos experimentales empleados. Se deben indicar modelos, marcas, empresas fabricantes y países de origen de los instrumentos utilizados. En caso de reactivos, se debe indicar la empresa fabricante (p. ej.: Pfizer, Roche, etc.). Se debe dar particular importancia a la descripción del método experimental utilizado para lograr los objetivos del trabajo. Debe mostrar concordancia plena con las hipótesis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN. Aquí se incluyen los resultados obtenidos en la investigación. Éstos se presentarán en forma de texto, cuadros o figuras y **no deberán duplicar la información presentada.** Además, deben presentar resultados que puedan ser fácilmente calculables. En la Discusión se resaltarán los principios más importantes y las relaciones causa-efecto derivadas del análisis de los resultados. Además, se deberá explicar, en función de las observaciones realizadas, el porqué de lo observado, sin especular. Los resultados obtenidos se compararán con los de otros investigadores y se señalarán las divergencias y las semejanzas.

CONCLUSIONES. Las primeras conclusiones que se presenten deben ser aquéllas correspondientes a los objetivos planteados.

Citas en el texto. Las citas en el texto se harán de acuerdo con la forma en que éstas participen en la oración.

Se seguirán las siguientes reglas: 1) se citará el apellido principal del(los) autor(es) y el año, cuando se trate de uno o dos autores, y el apellido principal del primer autor seguido de et al. y el año cuando se trate de tres o más autores; 2) las citas, cuando más de una, se colocarán en orden cronológico; 3) cuando el nombre del(los) autor(es) participe en la oración, se colocará el apellido principal, seguido del año entre paréntesis. Ejemplo: Martínez (1982) observó que..., Carrasco (1983) y Merino (1984) encontraron gran diferencia...; 4) cuando la cita se agrega al final de la oración, los nombres de los autores y el año se colocarán entre paréntesis, separados por una coma. Ejemplo: al final de la cosecha (Martínez, 1982) o (Carrasco, 1983; Merino, 1984) o (Bravo *et al.*, 1979); 5) cuando el autor tiene más de una publicación en un año se le adiciona a, b o c. Ejemplo: (Moreno, 1984a), (Moreno, 1984b) o (Moreno 1984a,b); 6) las referencias bibliográficas consultadas en internet se redactarán de acuerdo con lo enunciado previamente, además de incluir la dirección electrónica y la fecha en que se hizo la consulta.

Howell, A. T. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. <http://agron.scijournals.org/cgi/content/abstract/93/2/281> (Consulta: mayo 28, 2001).

LITERATURA CITADA. Para hacer la lista de referencias bibliográficas del material citado en el texto del artículo, se seguirán las normas que se detallan, con ejemplos, a continuación.

1. Artículos en revistas seriadas, ejemplo:

Contreras-Hinojosa, J. R., V. Volke-Haller, J. L. Oropeza-Mota, C. Rodríguez-Franco, T. Martínez-Saldaña y A. Martínez-Garza. 2003. Enclado y fertilización fosfatada en el cultivo de papa en un Andosol de la Sierra Veracruzana. *Terra* 21: 417-426.

La inicial del nombre propio se ha trasladado al final de los apellidos sólo en el caso del primer autor; se escriben completos los apellidos. Se mantiene el nombre propio en el lugar que

corresponde en el resto de los casos. Es común que los nombres ingleses se escriban con dos nombres personales y un apellido; ejemplo: L. J. Brown, el cual se redactará, en caso de ser primer autor, como Brown, L. J. y como L. J. Brown, si es coautor.

2. Artículos en una publicación colectiva no periódica, con o sin editor, ejemplo:

a) con editor

Turrent F., A. 1984. Los agrosistemas del trópico. pp. 315-328. In: E. Hernández X. (ed.). Los sistemas agrícolas de México. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

b) sin editor

Cortés F., J. I. 1984. El manejo de los frutales en zonas frías. pp. 181-192. In: La fruta y su perspectiva en México. CONAFRUT. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D. F.

3. Boletines técnicos u otras publicaciones seriadas no periódicas, ejemplo:

Hartemink, A. E. 2001. Publish or perish (6)-Soil science for pleasure. Bull. 100: 50-56. International Union of Soil Science. Viena, Austria.

4. Libros, ejemplo:

Martínez G., A. 1995. Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría. Trillas. México, D. F.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. London, UK.

Evite respaldar con citas aseveraciones que toda la audiencia conoce. Las citas son innecesarias en las siguientes oraciones: 1. El petróleo es fuente importante de contaminación ambiental (Pineda-Flores *et al.*, 2002; Rogel, 2003). 2. El maíz es uno de los tres cereales más consumidos en el mundo (FAO, 2005; SAGARPA, 2007).

Evite las citas de tesis, memorias de congresos y notas de clase. Cite principalmente artículos científicos.

La lista de citas se confeccionará en orden alfabético, con sangría francesa de 0.6 cm, con tipo de letra **Times New Roman 9** y sólo se incluirá en ella los trabajos citados en el texto.

DOI. Si el artículo que usted ha citado cuenta con DOI (Digital Object Identifier) anótelos después de los datos de la publicación física. Ejemplo:

Alvarez, J. V., L. M. Aguilar, B. P. Arraiza, and C. B. León. 2009. Biodegradation of paper waste under controlled composting conditions. *Waste Management* 29: 1514-1519. doi:10.1016/j.wasman.2008.11.025. (disponible en línea desde enero 9 de 2009).

Otros aspectos del manuscrito

Para referirse a plantas, animales u otros organismos, se señala su nombre común, así como su nombre científico. Éste con letras itálicas, considerando el Código Internacional de Nomenclatura Botánica, el Código Internacional de Nomenclatura Zoológica, el Código Internacional de Nomenclatura de Bacterias y el Código Internacional de Nomenclatura para Plantas Cultivadas.

A continuación se dan algunas indicaciones acerca de los cuidados y consideraciones que hay que tomar en cuenta para elaborar figuras, cuadros, mapas, etc.

Los cuadros deben numerarse en forma secuencial, con números arábigos y en el orden como aparecen en el texto. Los cuadros y las figuras se emplean para reemplazar al texto, y deben ser claros, simples y concisos. Para ello es necesario seleccionar los datos de modo que se presenten sólo aquéllos que se emplearán para hacer énfasis en algún aspecto o que expliquen otros. Los datos deben ordenarse de manera que sean fáciles de interpretar.

En el pie de cuadro se incluirán las llamadas que sean pertinentes. Los asteriscos se reservarán para indicar significancia estadística a 5% (*) y 1% (**), respectivamente; es recomendable incluir el error estándar promedio en las figuras. Otras notas se señalarán con los siguientes símbolos, en este orden: †, ‡, §, ¶, #, ††, ‡‡, ..., †††.

Los cuadros deben tener **tres líneas horizontales continuas**: al inicio del cuadro, y al inicio y final del campo del cuadro (no en el encabezado). El campo y el encabezado de las columnas se pueden dividir a conveniencia del autor. **Los cuadros no llevan líneas verticales.**

Los encabezados de columnas y líneas se escribirán con minúsculas, excepto la primera letra del encabezado. **Las unidades se colocan debajo de la segunda línea horizontal.** Se recomienda no utilizar paréntesis si se trata de un cuadro como el Cuadro 1; en otros casos, como ocurre en el Cuadro 2, su uso es conveniente. Se empleará sólo el número de cifras significativas necesarias para destacar el punto que se desee. Los cuadros no serán mayores de una página tamaño carta, considerando los márgenes antes señalados.

Queda a criterio de los autores la presentación de los cuadros, considerando que éstos sean explícitos. Se recomienda incluir, de ser el caso, el coeficiente de variación, la desviación estándar y, en el caso de separación de medias, la diferencia mínima significativa.

Los mapas y las figuras (incluyendo sus respectivos subtítulos), no deben exceder de una página tamaño carta, con los márgenes especificados. La leyenda se escribe con letras y números lo suficientemente grandes (con minúscula, excepto la primera letra), para que puedan leerse al reducirse en 30%, al igual que el grosor de los ejes y las líneas interiores. **En una**

Cuadro 1. Efectos principales e interacción del sistema de riego (SR) y la forma del mismo (FR) en variables de rendimiento en tomate.

Fuente de variación	Variables de rendimiento					
	NFP	PMF	RMS	PSV	EUA	IC
	g - - g planta ⁻¹ - - g L ⁻¹					
	Sistema de riego					
Gravedad	29 b [†]	81 b	164 a	151.1 a	1.55 b	0.45 b
Goteo	35 a	87 a	157 a	140.6 b	1.86 a	0.53 a
	Forma de riego					
Completo	31 a	88 a	159 a	176.1 a	1.32 a	0.45 b
Parcial	29 a	85 a	162 a	132.6 b	2.29 b	0.53 a
SR × FR	NS	NS	NS	NS	NS	NS

[†] Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). NS = no significativo, NFP = número de frutos por planta de tomate, PMF = peso medio del fruto, RMS = rendimiento de materia seca, PSV = peso seco vegetativo, EUA = eficiencia en el uso de agua, IC = índice de cosecha.

Cuadro 2. Conductancia estomática, transpiración y fotosíntesis de plantas de tomate en respuesta a los efectos principales e interacción del sistema de riego (SR) y la forma del mismo (FR).

DDS	Sistema de riego		Forma de riego		SR × FR
	Gravedad	Goteo	Completa	Parcial	
	Conductancia estomática (mol m ⁻² s ⁻¹)				
73	1.51 a [†]	1.52 a	1.71 a	1.32 b	NS
117	1.15 a	1.05 b	1.52 a	1.07 b	NS
141	1.48 a	1.52 a	1.65 a	1.16 b	NS
161	0.78 a	0.90 a	0.87 a	0.81 b	NS
	Transpiración (mmol m ⁻² s ⁻¹)				
73	10.2 b	0.98 a	13.2 a	9.9 b	NS
117	11.5 a	10.3 a	10.7 a	11.0 a	NS
141	16.0 a	15.0 a	16.8 a	14.2 b	NS
161	13.2 a	15.3 a	13.9 a	12.5 b	NS
	Fotosíntesis (μmol m ⁻² s ⁻¹)				
73	6.9 a	7.2 a	5.4 b	5.6 b	NS
117	5.4 b	8.0 a	6.0 b	6.4 b	NS
141	5.2 b	7.9 a	7.5 a	7.6 a	NS
161	8.2 a	8.9 a	9.5 a	7.7 a	NS

[†] Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). NS = no significativo. DDS = días después de la siembra.

figura lo que interesa destacar es el contenido y no los ejes. En consecuencia, el grosor de estos últimos tiene que ser menor que el de las líneas interiores. Los puntos experimentales deben marcarse visiblemente con símbolos que puedan diferenciarse entre sí, en blanco y negro (evitar otros colores de relleno y de marco), por ejemplo: □ ■ △ ▲. Para dividir los ejes se deben escoger intervalos constantes para cada uno.

Los mosaicos fotográficos deben entregarse montados en hojas de papel, totalmente terminados, con leyenda y numeración. El aumento de las microfotografías debe indicarse en la leyenda.

Para evitar la pérdida de calidad en las figuras, se sugiere que éstas queden ligadas al programa con que se elaboraron. Por ejemplo, la Figura 1 se transfirió a este documento utilizando pegado especial del comando de Edición de MS Word ("Gráfico de Microsoft Office Excel Objeto"), lo cual permite editarla. La Figura 2 se copió como

objeto o imagen (copiado y pegado normal) y no es posible enlazarla a su programa de origen. Por esta razón no se puede modificar el tamaño de los puntos o líneas de la figura. Se sugiere a los autores incluir un ejemplar adicional en el que las figuras sean del tipo de la Figura 2 (sin posibilidad de editarlas), con el fin de evitar cambios involuntarios respecto al contenido numérico. Otra opción es que se incluya una copia de su documento con formato de extensión pdf.

AGRADECIMIENTOS. Podrán incluirse al final del texto, después de las **Conclusiones** y antes de la **Literatura Citada**.

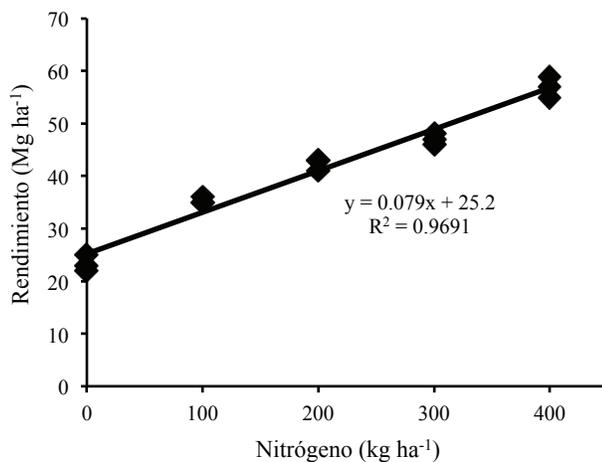


Figura 1. Rendimiento de frutos de tomate en plantas expuestas a dosis crecientes de nitrógeno bajo condiciones de cultivo en suelo, riego por goteo e invernadero.

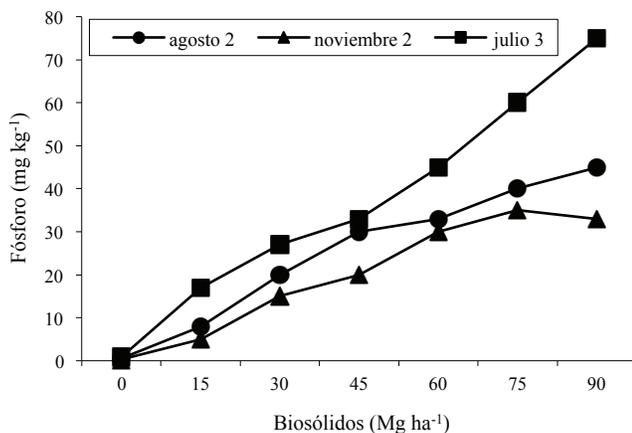


Figura 2. Concentración de fósforo del suelo a una profundidad de 0-20 cm con aplicaciones de biosólidos en pastizal semiárido (ciclos 2002 y 2003).

Métodos estadísticos

Con frecuencia, los procedimientos de separación de medias se utilizan mal. Esto puede resultar en conclusiones científicas incorrectas. Las comparaciones múltiples de medias (LSD) se deben usar sólo cuando los tratamientos no tienen una estructura bien definida (por ejemplo, estudios para comparar cultivares). Los autores deben estar conscientes de las limitaciones de las pruebas de comparaciones múltiples de medias cuando se tiene poca información de la estructura de los tratamientos (Petersen, 1977; Little, 1978; Chew, 1980; Nelson y Rawling, 1983; Carmer y Walker, 1985). Cuando los tratamientos presentan una estructura lógica, se usan los contrastes ortogonales entre ellos.

Información adicional

Para mayor información sobre la preparación de manuscritos se recomienda consultar los siguientes documentos:

- Alvarado L., J. 2009. Redacción y preparación del artículo científico. Tercera edición. Publicación Especial 11. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo y Colegio de Postgraduados, Agrociencia. Chapingo, México.
- ASA-CSSA-SSSA. 2004. Publication Handbook and Style Manual. Madison, WI, USA. <https://www.soils.org/publications/style/> (Consulta: mayo 6, 2007).
- Carmer, S. G. and W. M. Walker. 1985. Pairwise multiple comparisons of treatment means in agronomic research. *J. Agron. Educ.* 14: 19-26.
- Chew, V. 1980. Testing differences among means: correct interpretation and some alternatives. *HortScience* 15: 467-470.
- Little, T. M. 1978. If Galileo published in *HortScience*. *HortScience* 13: 504-506.
- Mari Mutt, J. A. 2004. Manual de redacción científica. Caribbean J. Sci. Publicación Especial 3. Mayagüez, Puerto Rico. <http://caribjsci.org/epub1/temario.htm> (Consulta: mayo 6, 2007).
- Nelson, L. A. and J. O. Rawling. 1983. Ten common misuses of statistics in agronomic research and reporting. *J. Agron. Educ.* 12: 100-105.
- Petersen, R. G. 1977. Use and misuse of multiple comparison procedures. *Agron. J.* 69: 205-208.
- Salisbury, F. B. 1998. Standardizing with SI units. *BioScience* 48: 827-835.

TERRA LATINOAMERICANA

Journal of the Mexican Society of Soil Science

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

SUBMISSION OF MANUSCRIPTS

When there is more than one author, the manuscript must be accompanied by a letter addressed to the editor in which the authors of the document manifest that they agree with the content and with their level of authorship as expressed in the manuscript. The letter should also include the names of three possible reviewers, experts in the field, who do not belong to the same institution as the authors.

Submission of electronic version for publication should be sent to Open Journal System:

<http://www.revistas-conacyt.unam.mx/terra/index.php/terra/author/submit>

A letter of receipt will be sent if the contribution complies with the subject and requirements magazine.

Work published or in process of review in other journals will not be accepted. If you have been presented at conferences should not have ISBN. Monitoring the edition will be held by the OJS system, only with the author responsible.

After the contribution has been accepted for publication, editing a payment request, which will not be returned if for some reason the contribution is rejected during the publishing process is required.

TYPES OF MANUSCRIPTS

The Journal Terra Latinoamericana welcomes papers in Spanish, Portuguese, French, and English, that present original research findings related to Soil Science, Water Management, and Environmental Sciences. The contributions may be Scientific Papers, Research Notes, and Critical Reviews. The Journal also publishes Letters to the Editor and Book Reviews.

Scientific Papers must be generated from original research in which the scientific method was implemented to accept or reject a given hypothesis.

Research Notes are based on experimental work that presents new methodological aspects or important results that the author wants to publish before the research project is completed.

Critical Reviews are articles in which the autor reports the State of the Art of a given topic of interest to the scientific community, based on the published literature, and establishing conclusions regarding the analysis of the published data.

In the **Letter to the Editor** section, Terra Latinoamericana will publish those that are considered of interest and present opinions or comments on a topic. This section's objective is to foment discussion on topics published in this journal or those of interest for the scientific community.

Book reviews is a section that aims to announce and preview books that may be of interest to soil scientists.

Manuscripts sent must take into account these instructions and will be reviewed by the editorial committee or by a peer reviewer they appoint.

MANUSCRIPT

The scientific articles and research notes must consist of the following sections:

1) Title, title in Spanish; 2) Author(s); 3) Institution(s) and affiliation address of the authors; 4) Summary; 5) Index words; 6) Summary in Spanish; 7) Palabras clave; 8) Introduction; 9) Materials and Methods; 10) Results and Discussion; 11) Conclusions; and 12) References. The Editorial Committee may accept some modifications to this structure if they are appropriate to the content of the article.

Critical reviews must contain the following sections: 1) Title, title in Spanish; 2) Author(s); 3) Institutions where the work was done and affiliation addresses of the authors; 4) Summary; 5) Index words; 6) Summary in Spanish; 7) Palabras clave; 8) Introduction; 9) Development of the subject, with the subtitles esteemed convenient; 10) Discussion if pertinent; 11) Conclusiones; and 12) References.

The letters to the Editor and book reviews do not need a defined format, but must not be more than two pages double spaced, letter Times New Roman 12.

The manuscripts should be provided with a title page, containing the title, author(s) name(s) and affiliation(s) and including a complete address for correspondence (e-mail); telephone and number of the corresponding author with whom the journal will maintain contact.

Manuscripts should be double spaced with at least 2.5 cm margins on all sides. The pages, including those with tables and figures, should be numbered progressively and may not exceed 20 typewritten

pages for a scientific article and 8 for a research note, **including tables and figures.**

In an article, the tables and figures must be inserted into the text.

The tables and figures should have only the essential information and should not repeat data presented in any other way. The International System of Units (SI) is required. Follow Chemical Abstracts and its indexes for chemical names. Give cation exchange capacity in $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Instead of ppm, use mg kg^{-1} or mg L^{-1} . Use kg ha^{-1} or Mg ha^{-1} . For time units use min, h, d, month abbreviate to three letters, i.e. Jan, Feb). A zero must always precede a decimal point, e.g. 0.24. All abbreviations must be explained at first mention in the text. The use of asterisks is reserved to indicate statistical significance $*(P < 0.05)$, $** (P < 0.01)$, and $*** (P < 0.001)$.

A space is left between the number and the unit (5 m, 42 °C). No space will be left between the number and the unit when it deals with percentages, angles and measures of longitude and latitude (45°, 15%, 30° 15' 5" N). Spaces will be used to divide long numbers in groups of three, at the left and at the right side of the decimal point (143 570 and 21.345 678). Numbers with four digits must be written without space and without comma. Nouns and measure units must not be mixed (correct: the water content is 23 mL kg^{-1} ; not correct: the content is 23 mL $\text{H}_2\text{O kg}^{-1}$).

Rounding figures follows three simple rules: 1) When the first two digits to be dismissed are less than 50, the previous digit does not change, e. g. 2.34489 will be rounded to 2.34. 2) When the first two digits to be dismissed are greater than 50, 1 is added to the number if it is odd and the number does not change when it is even, e. g. 3.3350 and 3.3450 must be rounded to 3.34. When there is only one number and it is less than 10, it must be written with words (e. g. four ecotypes, six regions, nine sites, but 16 trees, 128 countries). However, if this number is accompanied by an SI unit it must be expressed with a number (2 mL, 8 μg , 10 h). The manuscript, figures and tables must also be sent with an electronic version in

Word for Windows. Figures must be presented in a format that allows modifications in size of axis numbers, line thickness, and text of legends.

The manuscript must be written in **Times New Roman** (including numbers on the axes, content and figure legends).

Formatting for publication

TITLE. The title must be centered in boldface uppercase letters **Times New Roman 14**. Under the title in English write a title in Spanish; lowercase, except the first letter of each content word, centered, boldface, **Times New Roman 12**. For the headline (cornice) of the pages a short title of 60 letters or less must be provided.

Authors. The names of the authors should be written in bold lowercase letters, centered, separated by a comma, at one space after the title in Spanish, **Times New Roman 12**.

Institution(s) sponsors and authors' addresses. The objective of this section is to give credit to the institution that sponsored the work so that the readers may contact the authors; address and e-mail of the corresponding author must be specified. If there are coauthors, include only the name and work address. This identification is written in lowercase, except acronyms, below the authors' names and in **Times New Roman 11**.

Footnotes. These may be used when it is necessary to identify additional information; they will be numbered progressively through the text. **They should be used only when absolutely indispensable.**

HEADINGS. The headings show diverse orders and the position of a section within the paper.

First-order headings: Centered, boldface type and uppercase **Times New Roman 14** type. Reserved for the main title of the paper.

Second-order headings: Centered, boldface type and uppercase. **Times New Roman 11**. Used for the different parts of the manuscript i.e. Summary, Introduction, etc.

Third-order headings: Against left margin, bold face type and first letter of each content word in uppercase.

Fourth-order headings: In the paragraph. Lowercase except the first letter, boldface type; no numbering.

Fifth-order headings: In the paragraph. Lowercase except the first letter; no numbering.

Scientific Papers and Research Notes should be divided into the following sections:

SUMMARY in English and Spanish should not exceed **300 words** for scientific papers and 150 words for research notes. The summary must synthesize the most important aspects of the work: justification, importance, experimental method (when relevant) and conclusions. **Index words** must **not repeat words written in the title**. One space below the summary, left margin. The term "**Index words**" will be written in italics and bold type. The index words also in italics. Include up to five. Example:

Index words: *agrochemicals, toxicity, environment.*

RESUMEN. In Spanish. Follow the same rules as for the English Summary.

Palabras clave. In Spanish. Follow the same rules as those for Index words.

INTRODUCTION. This section should set the work in context, presenting essential background and including a concise statement of the objectives. Must not be more than three pages double spaced.

MATERIALS AND METHODS. Should indicate relevant details of the experimental methods and design, techniques, and statistical methods used in the study, so that the results can be judged for validity. Previous experiments may serve as a basis for the design of future experiments. In case of chemical substances, the name of manufacturer must be indicated (e. g. Pfizer, Roche, etc.). Special attention to the description of the experimental method used to reach the objectives should be given. It is highly recommended that the soil type and characteristics in which the experiment was conducted be described.

RESULTS AND DISCUSSION. Indicate numerical results in tables or figures, which **should not be repeated in the text.** All statements should be based on proof and not supposition, and should be supported by statistical analysis. The level of significance should be indicated in the text and tables. Discussion should briefly relate the author's results to other work on the subject and give the author's conclusion.

CONCLUSIONS. The first conclusions presented must correspond with the expressed objectives.

ACKNOWLEDGMENTS. May be included at the end of the text after Conclusions and before References.

REFERENCES. The list of references (**Times New Roman 9**) should be provided at the end of the text and typed in double space throughout (include only work cited in the text), listing in alphabetical order; surname of first author and initials, initials and surname of following authors, year of publication, title of the paper, abbreviated name of the journal, volume, and first and last page, e.g.:

Articles in serial journals:

Contreras-Hinojosa, J. R., V. Volke-Haller, J. L. Oropeza-Mota, C. Rodríguez-Franco, T. Martínez-Saldaña y A. Martínez-Garza. 2003. Encalado y fertilización fosfatada en el cultivo de papa en un Andosol de la Sierra Veracruzana. *Terra* 21: 417-426.

Articles in a collective non-periodical publication, with or without editor:

a) with editor

Turrent F., A. 1984. Los agrosistemas del trópico. pp. 315-328. In: E. Hernández X. (ed.). *Los sistemas agrícolas de México.* Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

b) without editor

Cortés F., J. I. 1984. El manejo de los frutales en zonas frías. pp. 181-192. In: *La fruta y su perspectiva en México.* CONAFRUT. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D. F.

Non-periodical serial technical bulletins or other publications:

Hartemink, A. E. 2001. Publish or perish (6) - Soil science for pleasure. *Bull.* 100: 50-56. International Union of Soil Science. Viena, Austria.

Books:

Martínez G., A. 1995. *Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría.* Trillas. México, D. F.

Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants.* Academic Press. London, UK.

Avoid using references to support statements that are common knowledge for the scientific community.

Avoid theses, proceedings of congresses, and lectura notes. Cite principally scientific articles and books.

DOI. If your article counts with DOI (Digital Object Identifier), write it after the complete reference. Here is an example:

Álvarez, J. V., L. M. Aguilar, B. P. Arraiza, and C. B. León. 2009. Biodegradation of paper waste under controlled composting conditions. *Waste Management* 29: 1514-1519. doi:10.1016/j.wasman.2008.11.025. (available online since January 9, 2009).

Other aspects of the manuscript

For plants, insects and pathogens give the Latin binomial name (in italics) at first mention and do not include them in the title, but in the summary, following the International Code of Botanical Nomenclature, International Code of Zoological Nomenclature, International Code of Nomenclature of Bacteria, International Code of Nomenclature for Cultivated Plants.

Concerning the care and considerations which must be taken into account in the elaboration of figures, tables, maps, etc., tables and figures are used to substitute text, and so must be clear, simple and concise. Therefore, it is necessary to select only the data that will be used to emphasize some aspect or explain others. The data must be ordered in such way that they can be interpreted easily.

Tables. These must be numbered consecutively with Arabic numerals, in the same order as they are mentioned in the text. Tables are always printed in small letter type (**Times New Roman 9**) and descriptive headings should be provided. All column headings should begin with an uppercase letter. Table notes should be referred to by superscript: †, ‡, §, ¶, #, ††, †††. The asterisks are reserved for indicating statistical significance: * Significant at the 0.05 probability

level; ** Significant at the 0.01 probability level; *** Significant at the 0.001 probability level. When preparing tables, consider that they could be printed in one column (85 mm) or two columns (180 mm). Tables must have three horizontal solid lines: one at the beginning of the table, the second at the beginning of the field and the last at the end of the table. **No vertical lines are allowed.**

Units must be placed under the second horizontal line. No parentheses are used, as shown in Table 1. In other cases, as in Table 2, their use is convenient. Use the word processors' table feature. Do not create tables by using the space bar or tab key.

The tables must not be more than one letter-size page. All tables must present statistical parameters for the appropriate comparisons.

It is recommended, if relevant, that the coefficient of variation, standard deviation and, in the case of mean separation, the minimum significant difference be included.

Figures and maps. These can be photographs, graphs, charts or diagrams and must not exceed one letter-size page with the specified margins (including the respective subtitles). They must be included in the text. Figures should not give information already given in tables. Originals provided of figures must be of good quality, clearly

drawn or printed in black on white. Numbering or lettering should not be on the originals but on the copies. Vertical axes should be labeled vertically. Keep in mind that the final reduced size is 9 point type for numbers on the axis scale, 10 to 11 points for the axis labels, and 7 to 8 points for inside legends. A typewritten, double-spaced list of legends of all figures must be supplied. Each legend should contain sufficient explanation to be meaningful without cross-referencing; provide a key to all the symbols on it. The preferred symbols are \circ \bullet \square \triangle \blacktriangle . Standard Errors of the means are strongly recommended to be included in the figures.

To avoid losing quality of the figures, it is required that these remain bound to the program used for their design. For example, Figure 1 was transferred to this document using special pasting of the MS Word edit command ("Graphic of Microsoft Office Excel Object"), so that the figure may be edited. Figure 2 was copied as object or image (copied and pasted in the usual way); it is

Table 1. Main effects and interaction of the irrigation system (IS) and its form (IF) in yield parameters of tomato.

Source of variation	Yield parameters					
	NFP	MFW	DMY	PDW	WUE	YI
	g	-	-	g plant ⁻¹	-	g L ⁻¹
	Irrigation system					
Gravity	29 b [†]	81 b	164 a	151.1 a	1.55 b	0.45 b
Drip	35 a	87 a	157 a	140.6 b	1.86 a	0.53 a
	Irrigation form					
Complete	31 a	88 a	159 a	176.1 a	1.32 a	0.45 b
Partial	29 a	85 a	162 a	132.6 b	2.29 b	0.53 a
IS × IF	NS	NS	NS	NS	NS	NS

[†] Distinct letters in the same column indicate significant differences (Tukey, $P \leq 0.05$). NS = non-significant, NFP = number of fruits per plant, MFW = medium fruit weight, DMY = dry matter yield, PDW = plant dry weight, WUE = water use efficiency, YI = yield index.

Table 2. Stomatic conductance, transpiration, and photosynthesis of tomato plants in response to the principal effects, interaction of the irrigation system (IS) and its form (IF).

DAS	Irrigation system		Irrigation form		IS × IF
	Gravity	Drip	Complete	Partial	
	Stomatic conductance (mol m ⁻² s ⁻¹)				
73	1.51 a [†]	1.52 a	1.71 a	1.32 b	NS
117	1.15 a	1.05 b	1.52 a	1.07 b	NS
141	1.48 a	1.52 a	1.65 a	1.16 b	NS
161	0.78 a	0.90 a	0.87 a	0.81 b	NS
	Transpiration (mmol m ⁻² s ⁻¹)				
73	10.2 b	0.98 a	13.2 a	9.9 b	NS
117	11.5 a	10.3 a	10.7 a	11.0 a	NS
141	16.0 a	15.0 a	16.8 a	14.2 b	NS
161	13.2 a	15.3 a	13.9 a	12.5 b	NS
	Photosynthesis (μmol m ⁻² s ⁻¹)				
73	6.9 a	7.2 a	5.4 b	5.6 b	NS
117	5.4 b	8.0 a	6.0 b	6.4 b	NS
141	5.2 b	7.9 a	7.5 a	7.6 a	NS
161	8.2 a	8.9 a	9.5 a	7.7 a	NS

[†] Distinct letters in the same column indicate significant differences (Tukey, $P \leq 0.05$). NS = non-significant, DAS = days after sowing.

not possible to link up to the program of its origin. It is suggested that authors include an additional example in which the figures will be of the Figure 2 type (without possibility of editing) to avoid involuntary changes in the numerical content. Another option is to include a pdf format copy of your document.

Statistical methods. Frequently, the procedure of mean separation is wrongly used. This may result in incorrect scientific conclusions. Comparisons of least significant differences (LSD) are used only when the treatments do not have a well defined

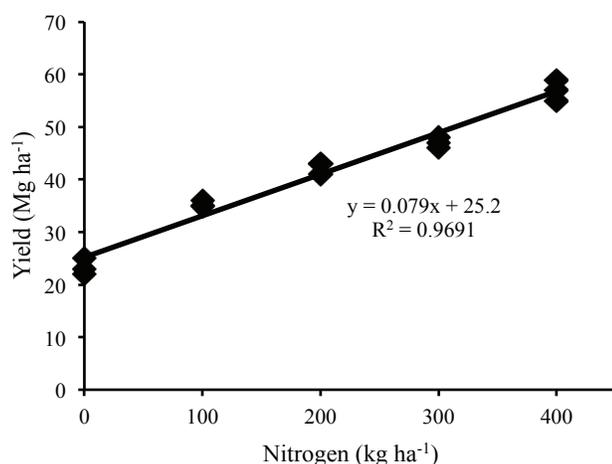


Figure 1. Yield of tomato fruit in plants exposed to increasing doses of nitrogen under cultivation in soil, drip fertigation, and greenhouse.

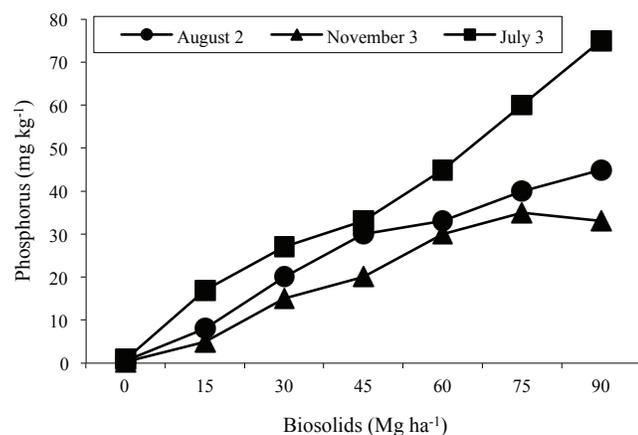


Figure 2. Concentration of phosphorus in soil at a depth of 0-20 cm with applications of biosolids in semiarid grassland (cycles 2002 and 2003).

structure (e.g. studies to compare cultivars). Authors must be aware of the limitations of the tests of multiple mean comparisons when they have little information on the structure of the treatments (Petersen, 1977; Little, 1978; Chew, 1980; Nelson and Rawling, 1983; Carmer and Walker, 1985). When the treatments have a logical structure, orthogonal contrasts are used.

Additional information

For more information on the preparation of the manuscripts consult the following documents:

- Alvarado L., J. 2009. Redacción y preparación del artículo científico. 2a ed. Publicación Especial 11. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo y Colegio de Postgraduados, Agrociencia. Chapingo, México.
- ASA-CSSA-SSSA. 2004. Publication Handbook and Style Manual. Madison, WI, USA. <https://www.soils.org/publications/style/> (Reviewed: May 6, 2007).
- Carmer, S. G. and W. M. Walker. 1985. Pairwise multiple comparisons of treatment means in agronomic research. *J. Agron. Educ.* 14: 19-26.
- Chew, V. 1980. Testing differences among means: correct interpretation and some alternatives. *HortScience* 15: 467-470.
- Little, T. M. 1978. If Galileo published in *HortScience*. *HortScience* 13: 504-506.
- Mari Mutt, J. A. 2004. Manual de redacción científica. *Caribbean J. Sci. Publicación Especial 3.* Mayagüez, Puerto Rico. <http://caribjsci.org/epub1/temario.htm> (Reviewed: May 6, 2007).
- Nelson, L. A. and J. O. Rawling. 1983. Ten common misuses of statistics in agronomic research and reporting. *J. Agron. Educ.* 12: 100-105.
- Petersen, R. G. 1977. Use and misuse of multiple comparison procedures. *Agron. J.* 69: 205-208.
- Salisbury, F. B. 1998. Standardizing with SI units. *BioScience* 48: 827-835.

PROOFS

The proofs will be sent to the authors to enable them to check correctness of the typesetting. They should be reviewed promptly and returned to the editorial office. No changes other than corrections should be made.

December 2016.