

# TERRA

## Latinoamericana



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

Enero • Marzo de 2017 • Volumen 35 • Número 1 ISSN 2395-8030

# TERRA LATINOAMERICANA

ENERO – MARZO DE 2017 • VOLUMEN 35 • NÚMERO 1

<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 incluida en la lista de revistas de acceso libre, científicas y académicas del Directory of Open Access Journals (DOAJ)

**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

**Cristián Reyna**

---

### 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 Cabriaes  
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. Christopher Escalera de la Rosa**

### Cover Photograph

**Cristián Reyna**

---

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

## TERRA LATINOAMERICANA

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.  
Enero - Marzo de 2017 Volumen 35 · Número 1

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

## TERRA LATINOAMERICANA

Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science  
January - March, 2017 Volume 35 · Number 1

### 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

ENERO - MARZO DE 2017 • VOLUMEN 35 • NÚMERO 1  
JANUARY - MARCH, 2017 • VOLUME 35 • NUMBER 1

- 1** Semblanza del Dr. Reggie J. Laird Broom: pionero de la ciencia del suelo en México.  
Biographical sketch of Dr. Reggie J. Laird Broom: pioneer of soil science in Mexico.  
*David Espinosa Victoria*
- 7** Fraccionamiento químico del carbono en suelos con diferentes usos en el departamento de Magdalena, Colombia.  
Chemical carbon fractioning in different land uses in the Magdalena Department, Colombia.  
*José Rafael Vásquez Polo y Felipe Macías Vázquez*
- 19** Arsénico edáfico y su distribución en el distrito de riego 017: uso de métodos de interpolación.  
Edaphic arsenic and its distribution in irrigation district 017: using interpolation methods.  
*Norma E. Rodríguez Garrido, Miguel Ángel Segura Castruita, Jorge A. Orozco Vidal, Manuel Fortis Hernández, Pablo Preciado Rangel, Jesús Olague Ramírez y Pablo Yescas Coronado*
- 29** Producción de genotipos de frijol negro en condiciones de humedad residual y sequía terminal.  
Production of black bean genotypes under residual moisture and terminal drought conditions.  
*Oscar Hugo Tosquy Valle, Ernesto López Salinas, Rigoberto Zetina Lezama, Bernardo Villar Sánchez y José Raúl Rodríguez Rodríguez*
- 41** Evapotranspiración del cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en la costa de Hermosillo, Sonora, México.  
Evapotranspiration measurement in watermelon (*Citrullus lanatus*) on the Costa de Hermosillo, Sonora, Mexico.  
*Leonardo Román Román, Tomás Díaz Valdés, Jesús Enrique López Avendaño, Christopher Watts, Fidencio Cruz Bautista, Julio Rodríguez Casas y Julio Cesar Rodríguez*

# TERRA

## LATINOAMERICANA

- 51** Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación.  
Physical processes of soil in Pedregal de San Angel ecological reserve: attributes for conservation.  
*Iván Castellanos Vargas, Norma E. García Calderón y Zenón Cano Santana*
- 65** Biofertilización en híbridos de maíz androestériles y fértiles para los valles altos de México<sup>1</sup>.  
Use of a bio-fertilizer on male-sterile and fertile maize hybrids for the High Valleys of Mexico<sup>1</sup>.  
*Margarita Tadeo Robledo, J. Jesús García Zavala, Hugo Jesús Alcántar Lugo, Ricardo Lobato Ortiz, Noel O. Gómez Montiel, Mauro Sierra Macías, Martha Blanca Guadalupe Irizar Garza, Roberto Valdivia Bernal, Job Zaragoza Esparza, Beatriz Martínez Yáñez, Consuelo López López, Alejandro Espinosa Calderón y Antonio Turrent Fernández*
- 73** Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México.  
Estimation of carbon stored in fir and cypress forests in Texcoco, State of Mexico.  
*Yunuen Bolaños González, Martín A. Bolaños González, Fernando Paz Pellat y José Ignacio Ponce Pulido*

Revisores de este número  
Reviewers of this number

**87**



# Dr. Reggie J. Laird Broom: pionero de la ciencia del suelo en México

## *Dr. Reggie J. Laird Broom: pioneer of soil science in Mexico*

David Espinosa Victoria<sup>1‡</sup>

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados, Programa de Postgrado en Edafología. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (despinos@colpos.mx)

---

### RESUMEN

A casi tres años de su deceso, la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. rinde, a través de esta reseña, un homenaje póstumo a la memoria de uno de los pioneros de la Ciencia del Suelo en México. El trabajo realizado por el Dr. Reggie J. Laird Broom (Figura 1), a lo largo de 45 años, refleja de forma contundente su compromiso y pasión por ayudar a los pequeños productores de México, América Latina y el mundo.

### SUMMARY

Nearly three years after his death, the Mexican Society of Soil Science, A.C., through this review, pays posthumous tribute to the memory of one of the pioneers of Soil Science in Mexico. The work done by Dr. Reggie J. Laird Broom (Figure 1) over 45 years emphatically reflects his commitment to and passion for helping small farmers in Mexico, Latin America and the world.

**Figura 1. Dr. Reggie J. Laird Broom  
(1920-2014)**



Foto del archivo del Programa de Edafología

---

#### Cita recomendada:

Espinosa Victoria, D. 2017. Semblanza del Dr. Reggie J. Laird Broom: pionero de la ciencia del suelo en México. *Terra Latinoamericana* 35: 1-6.

Recibido: septiembre de 2016. Aceptado: noviembre de 2016.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 35: 1-6.

### **Origen y Formación Académica**

El Dr. Reggie J. Laird Broom nació el 11 de febrero de 1920 en Bassfield, Mississippi, USA. Creció en un Mississippi rural, durante la época de la gran depresión norteamericana (1929-1932). El Dr. Laird fue uno de nueve hijos de una familia campesina, dedicada a la pizca del algodón. Aunque su familia nunca pasó hambre, el exceso de alimento no fue común en ésta.

Después de graduarse en la escuela media superior a la edad de 16 años, ingresó a la Universidad Estatal de Mississippi para cursar la carrera de Ingeniería. No obstante, la nostalgia cambió su objetivo y optó por estudiar Fertilidad de Suelos, pensando que era su deber permanecer en la finca de la familia. Fue en 1940 cuando obtuvo su grado de Bachelor of Science.

Más tarde, el Dr. Laird ingresa a la Universidad de Wisconsin-Madison, para cursar su maestría y doctorado. Recibió el grado de Maestro en Ciencias en 1942, justo cuando los Estados Unidos ingresaron a la Segunda Guerra Mundial. Por esta razón, el Dr. Laird dejó sus estudios para servir al gobierno norteamericano en la Guerra del Pacífico (Pacific Theater). A su regreso a la Unión Americana, el Dr. Laird completa sus estudios doctorales en 1952 en la Universidad de California-Berkeley (Heidbrink, 2014).

En 1945, el Dr. Laird fue condecorado por la Armada de los Estados Unidos con la Estrella de Plata, por su notable gallardía e intrepidez en la acción contra el enemigo mientras sirvió en la División 33 de infantería durante la Segunda Guerra Mundial.

### **Su Llegada a México**

El Dr. Laird recibió a finales de 1951 una invitación de la Fundación Rockefeller para visitar México y conocer el programa de suelos de la Oficina de Estudios Especiales, dependiente de la Secretaría de Agricultura, creada en 1943 a través de un convenio entre el Gobierno Mexicano y la Fundación Rockefeller. El Dr. Laird visitó México por primera vez en 1952, prácticamente al término de sus estudios doctorales, para una entrevista de trabajo con dicha Fundación. La tarea era contribuir a la mejora de la productividad de los suelos agrícolas. Sin embargo, la pobreza que observó en el país fue tal que, se desanimó hasta el punto de rechazar la oferta de trabajo. Así, retornó a la universidad, pero su profesor asesor lo invitó a reflexionar y tomar una decisión más fundamentada.

Afortunadamente, el Dr. Laird cambió su decisión y regresó a México para realizar investigación en la Ciencia del Suelo. El Dr. Pitner, jefe del Departamento de Suelos de la Oficina de Estudios Especiales, le encargó la generación de recomendaciones sobre el uso de fertilizantes, principalmente en maíz, trigo, frijol y papa bajo condiciones de riego y temporal. Las estaciones experimentales estratégicas en las que llevó a cabo sus investigaciones fueron Ciudad Obregón en el noroeste, La Cal Grande en el Bajío, El Horno en el Altiplano y Cotaxlta en el Trópico Húmedo.

Sin duda, con su arduo trabajo, el Dr. Laird ayudó a alimentar al mundo. Su esposa, la Sra. Rosario Laird dijo en una entrevista: “Él se dio cuenta que eso es lo que quería hacer. Él quería hacer la diferencia y la hizo. Fue el mejor ser humano que jamás pude haber conocido” (Heidbrink, 2014).

En resumen, el Dr. Laird desarrolló tecnología para el uso eficiente de los fertilizantes con diferentes prácticas de producción tales como la densidad de población, fechas de siembra y uso del agua de riego, entre otras. El uso de esta tecnología formó parte de lo que se conoció como “El Milagro Mexicano” ocurrido en las décadas de 1950 y 1960. Sin lugar a dudas, como lo indica el Dr. Antonio Turrent: “Reggie J. Laird es el Padre de la Fertilidad de Suelos en México” (Jiménez *et al.*, 2014).

### **Partícipe y Fundador de Instituciones Agrícolas en México**

Dada la naturaleza de la actividad agrícola, el Dr. Laird estuvo, desde su llegada a México, estrechamente relacionado con la Escuela Nacional de Agricultura (hoy Universidad Autónoma Chapingo) y su Colegio de Postgraduados, fundado en 1959.

El Dr. Laird participó en el Colegio de Postgraduados desde su creación en actividades de enseñanza e investigación. En 1959, el cuerpo de profesores de la Rama de Suelos estaba integrado por el MSc. Nicolás Aguilera Herrera en Pedología, el M.C. Mariano Villegas Soto en Física de Suelos, el Dr. Ramón Fernández González en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, el Dr. Enrique Ortega Torres en Química de Suelos y el Dr. Reggie J. Laird en Tecnología de Fertilizantes.

A partir de 1974, año en el cual la operación del Plan Puebla (ver más adelante) quedó bajo la responsabilidad del Colegio de Postgraduados,

el Dr. Laird pasó definitivamente a formar parte de su personal académico. En 1976 recibió el nombramiento de Profesor Investigador Titular en la otrora Rama de Suelos, hoy Programa de Postgrado en Edafología del Campus Montecillo.

Inicialmente, el Dr. Laird impartió el curso de “Tecnología de Fertilizantes” (EDA-633) y más tarde el de “Fertilidad de Suelos” (EDA-631). De 1983 a 1995, impartió el curso “Investigación Agronómica para el Desarrollo de la Agricultura Tradicional” (EDA-661), diseñado por el mismo, así como el texto empleado.

Participó como Profesor Consejero y Asesor de ocho y 37 estudiantes, respectivamente. Del primer grupo, uno fue de doctorado y los otros siete de maestría. De los estudiantes asesorados, nueve fueron de doctorado y 28 de maestría (Jiménez *et al.*, 2014).

Sus investigaciones sobre la fertilidad del suelo le permitieron conocer las principales regiones agrícolas de México, así como sus diversos sistemas agrícolas. Estos conocimientos lo habilitaron para llevar a cabo investigaciones en parcelas de agricultores en el Bajío, la Meseta Purépecha en Michoacán y otras regiones agrícolas del país.

Comprometido con el gremio de los estudiosos del suelo, Dr. Laird plasmó su nombre y firma en el Acta Constitutiva de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS) A.C., fundada el 19 de octubre de 1962 (Palacios, 2011).

En 1960, al crearse el Instituto de Investigaciones Agrícolas (IIA), ingresó como parte de su personal de investigación. De la misma forma, en 1966, participó como investigador fundador del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

En 1989, el Dr. Laird honró a la comunidad edafológica del Colegio de Postgraduados al plantar un ahuehuete (Figura 2) con motivo de la celebración del XXX aniversario de la Especialidad de Edafología.

### Su Participación en el Plan Puebla

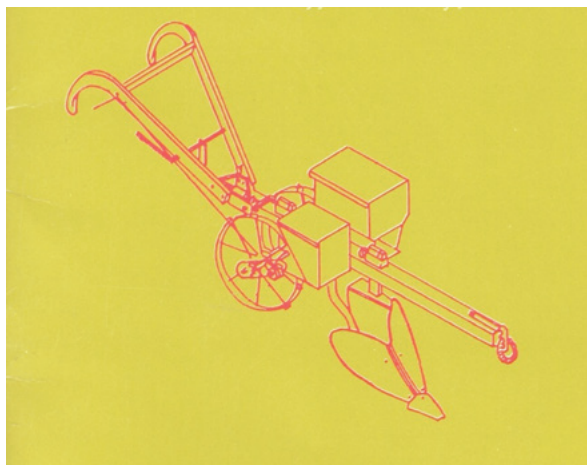
Como miembro del CIMMYT y del Colegio de Postgraduados, en 1967 participó en el diseño del Proyecto Puebla. Durante este período, el Dr. Laird llevó a cabo investigación científica en parcelas de los agricultores, con el objeto de generar tecnología apropiada para la producción de maíz a pequeña escala bajo condiciones de agricultura de temporal en el área del Proyecto Puebla, y más tarde en regiones agrícolas de ocho estados de la República Mexicana.

El Dr. Laird, conocedor profundo de las circunstancias de los pequeños agricultores, estimuló el trabajo de investigación para incrementar la productividad de la mano de obra familiar, mediante el desarrollo de nuevos implementos agrícolas de tracción animal, como la sembradora-fertilizadora línea Plan Puebla (Figura 3) (Jiménez *et al.*, 2014).



**Figura 2.** En 1989 se conmemoró el XXX Aniversario de la Especialidad de Edafología, el Dr. Reggie J. Laird Broom plantó un ahuehuete (foto del archivo del Programa de Edafología).





**Figura 3. Prototipo de sembradora-fertilizadora diseñado en el Plan Puebla (Mendoza *et al.*, 1994).**

Captaron su atención los diferentes sistemas de producción diseñados por los mismos productores, particularmente la asociación de árboles frutales con maíz y frijol (Jiménez *et al.*, 2014). De hecho, el sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) es resultado de las lecciones aprendidas en el Plan Puebla, en el que el Dr. Laird jugó un papel crucial.

La vida del Dr. Laird fue de intenso trabajo, tanto en el aula como en el campo. El Plan Puebla fue el marco idóneo para interactuar con un sinnúmero de investigadores, entre los que se encontraban algunos de

sus otrora estudiantes como Armando Puente Berumen, Antonio Turrent Fernández, Álvaro Ruiz Barbosa, Benjamín Peña Olvera, Claudio Esquivel Sánchez, Alfonso Macías Laylle, Nestor Estrella Chulín y José Isabel Cortés, entre otros (Colpos, 1999).

Con toda certeza, el Dr. Cortes apunta que “*mientras existan pequeños agricultores, sus enseñanzas de cómo investigar y enseñar sobre el desarrollo de tecnologías alternativas sustentables, serán siempre vigentes*” (Jiménez *et al.*, 2014). En la Figura 4, se muestra una panorámica de la última visita de campo que realizó el Dr. Laird en 2013 a los trabajos de investigación con la escuela del Plan Puebla en la Región Mixe, Oaxaca. Esta foto es muy significativa, porque además de ser la última visita al campo, muestra su cercanía con los pequeños productores y con sus colegas y colaboradores.

### Su Proyección de México al Mundo

Como resultado de las experiencias derivadas del Plan Puebla, a partir de 1980 desarrolló actividades de capacitación de personal técnico y asesoría en investigación sobre productividad de agrosistemas en países de África, Asia y América Latina, a través del convenio firmado entre el Colegio de Postgraduados y el Comité Internacional de Enlace de Programas para la Alimentación (CILCA).



**Figura 4. Última visita de campo que el Dr. Laird realizó en 2013 a los trabajos del Plan Puebla en la Región Mixe, Oaxaca. De izquierda a derecha: Heliodoro Díaz Cisneros, Magdalena Martínez Escobar, Rosario Shroeder de Laird (Chayito), Julia González de Jiménez, Filemón Jiménez Pacheco (productor del predio), Reggie J. Laird, José I. Cortes Flores, Antonio Turrent Fernández, Leobardo Jiménez Sánchez, Ángel Ramos Sánchez y Odilón Martínez Martínez (foto tomada de Jiménez *et al.*, 2014).**

### Reconocimientos

La solidez científica del Dr. Laird fue reconocida por el Sistema Nacional de Investigadores (SNI) desde 1984, año de su creación. En 1993 se le dio el nombramiento de Investigador Nacional Emérito, la máxima categoría otorgada por el SNI. Fue autor de más de 75 publicaciones nacionales e internacionales, y coadyuvó a la escritura de los informes de 25 años de investigación, operación y evaluación del Plan Puebla.

En 1999, por acuerdo del Consejo Técnico, el Colegio de Postgraduados otorgó al Dr. Laird el Doctorado *Honoris causa* (Figura 5) por el arduo trabajo realizado en favor de los que menos tienen, no solo de México, sino también de América Latina y África.

En el marco del Cincuentenario de la SMCS, AC, celebrado en el XXXVII Congreso Nacional en Zacatecas, Zac. en 2012, se le entregó la placa que lo reconoce como Miembro Fundador de la misma (Figura 6). Dado su estado de salud, el Dr. Laird no asistió a la ceremonia; no obstante, el reconocimiento le fue enviado a San Antonio, Texas, USA, gesto que su familia agradeció con una efusiva carta.



Figura 5. En 1999 el Colegio de Postgraduados otorgó al Dr. Laird Broom el Doctorado *Honoris causa*. En la foto aparece con el Dr. Roberto Núñez Escobar (foto del archivo del Programa de Edafología).



Figura 6. Reconocimiento otorgado en 2012 al Dr. Reggie J. Laird como miembro fundador de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., durante la celebración del Cincuentenario de la misma en el XXXVII Congreso Nacional en Zacatecas, Zac.

### Su Partida del Colegio de Postgraduados y del Mundo

El Dr. Laird pasó 45 años de vida científica y docente en México. De estos, 38 años los dedicó como profesor investigador en el Colegio de Postgraduados. El Dr. Laird se retiró oficialmente del Colegio de Postgraduados el 1 de abril de 1997 (Colpos, 1999).

Su descenso ocurrió el 27 de febrero de 2014, a los 94 años de edad, en San Antonio, Texas, USA. Le sobreviven su esposa Rosario Laird, sus tres hijos Richard, David y Martha, así como 8 nietos. Finalmente, sus familiares y amigos le dedicaron el Servicio Memorial póstumo del 8 de marzo de 2014, en la Iglesia Presbiteriana de Álamo Heights de San Antonio, Texas, USA (Heidbrink, 2014).

### AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento al Dr. José I. Cortés Flores y al Dr. Antonio Turrent Fernández por la valiosa información y por sus atinados comentarios.

**LITERATURA CITADA**

- COLPOS. 1999. Colegio de Postgraduados. Semblanza sobre el Dr. Reggie J. Laird Broom. Doctorado *Honoris causa*. [www.colpos.mx/honoris/rjlb.htm](http://www.colpos.mx/honoris/rjlb.htm). (Consulta: septiembre 16, 2016).
- Heidbrink, M. M. 2014. Laird's work with soil helped feed world. San Antonio Express-News. Friday, March 7.
- Jiménez, S. L., J. I. Cortes F. y A. Turrent F. 2014. Reggie J. Laird 1920-2013. *In Memoriam*. 8. Fundación COLPOS.
- Mendoza R., R., J. I. Cortés F., A. Turrent F., J. J. Castellón G. y J. Díaz A. 1994. Desarrollo de la multibarra portaimplementos de tracción animal línea Plan Puebla. Montecillo, Colegio de Postgraduados. ISBN: 9688391379.
- Palacios R., M. I. 2011. Apuntes para la historia de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. pp. 47-94. *In*: M. I. Palacios rangel y J. A. Leos Rodríguez (eds.). La Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Una historia de identidad compartida. Vol. 1. Universidad Autónoma Chapingo. ISBN: 978-607-12-0225-3



# Arsénico edáfico y su distribución en el distrito de riego 017: uso de métodos de interpolación

## *Edaphic arsenic and its distribution in irrigation district 017: using interpolation methods*

Norma E. Rodríguez Garrido<sup>1</sup>, Miguel Ángel Segura Castruita<sup>2‡</sup>,  
Jorge A. Orozco Vidal<sup>2</sup>, Manuel Fortis Hernández<sup>2</sup>, Pablo Preciado Rangel<sup>2</sup>,  
Jesús Olague Ramírez<sup>2</sup> y Pablo Yescas Coronado<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Torreón, Estudiante de Maestría, <sup>2</sup> Profesor Investigador DEPI. Carretera Torreón-San Pedro Km 7.5, Ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México.

‡ Autor responsable (dmilys5@hotmail.com)

### RESUMEN

Los constituyentes del suelo (arcillas, carbonatos, materia orgánica y óxidos e hidróxidos), intervienen en la movilidad del arsénico (As) y determinan su variación espacial; por lo cual, su cartografía puede contribuir al entendimiento de la presencia de este metaloide en el suelo. Los objetivos de esta investigación fueron determinar la concentración de As en los suelos del Distrito de Riego 017 (DR017) de México y establecer su distribución espacial, utilizando dos métodos de interpolación. Cuatro etapas fueron realizadas; la primera consistió en trabajo de gabinete y campo, en la que 33 sitios de muestreo fueron localizados en un polígono del DR017, posteriormente en cada sitio, muestras simples de suelo (0-30 cm de profundidad) fueron colectadas. La segunda y tercera se llevaron a cabo en laboratorio, en las cuales, a cada muestra se determinó la concentración de As disponible, contenidos de arcilla, carbonatos de calcio y fósforo disponible y su regresión. La cuarta etapa tuvo dos partes, la elaboración de dos mapas con dos métodos de interpolación (Interpolador Ponderación Inversa de la Distancia, IDW en sus siglas en inglés y Kriging ordinario, KO), así como la verificación de la precisión de cada mapa. Los resultados mostraron que, la distribución del As en el DR017 no es uniforme y está asociada con el contenido de arcilla y CaCO<sub>3</sub>. De tal manera que, las concentraciones de As fluctuaron de 0.07 a 1.89 mg kg<sup>-1</sup>, donde las mayores concentraciones de este metaloide (1.39-1.89 mg kg<sup>-1</sup>) se relacionaron positivamente (R<sup>2</sup> = 0.9058) con altos contenidos de arcilla (39.44 a 43.44%). El mapa de distribución espacial de As obtenido con KO, tuvo

la mayor precisión (75.7%), en el cual se muestra que la concentración aumenta en un sentido sur-norte, donde el área de mayor concentración está en la parte norte del distrito.

**Palabras clave:** arsenatos, kriging, IDW, geoestadístico.

### SUMMARY

Soil constituents (clays, carbonates, organic matter and oxides and hydroxides), involved in the mobility of arsenic (As), determine its spatial variation; thus, the mapping can contribute to the understanding of the presence of this metalloid on the soil. The objectives of this research were to determine the concentration of As in soils of Irrigation District 017 (DR017) of Mexico and establish its spatial distribution using two interpolation methods. Four stages were performed; the first consisted of desk work and field, in which 33 sampling sites were located in a polygon of DR017, then at each site, simple soil samples (0-30 cm depth) were collected. The second and third were carried out in laboratory, in which, in each sample the concentration of As available, clay content, carbonates of calcium and phosphorus available and their regression were determined. The fourth stage had two parts, the development of two maps with two interpolation methods (Interpolator Weighting Inverse Distance, IDW its acronym in English and ordinary Kriging, OK) and verification of the accuracy of each map. The results showed that the distribution of As in the DR017 is not uniform and is associated with CaCO<sub>3</sub> and clay content. So that, As concentrations ranged from 0.07 to 1.89 mg kg<sup>-1</sup>, where the highest concentrations of

#### Cita recomendada:

Rodríguez Garrido, N. E., M. Á. Segura Castruita, J. A. Orozco Vidal, M. Fortis Hernández, P. Preciado Rangel, J. Olague Ramírez y P. Yescas Coronado. 2017. Arsénico edáfico y su distribución en el distrito de riego 017: uso de métodos de interpolación. Terra Latinoamericana 35: 19-28.

Recibido: enero de 2016. Aceptado: septiembre de 2016.  
Publicado en Terra Latinoamericana 35: 19-28.

this metalloid (1.39-1.89 mg kg<sup>-1</sup>) were positively correlated ( $R^2 = 0.9058$ ) with high content of clay (39.44 to 43.44%). The map of spatial distribution of As obtained by KO, had the highest accuracy (75.7%), which shows that the concentration increases in a north-south direction, where the area of greatest concentration is in the northern part of the district.

**Index words:** *arsenates, soil, Kriging, IDW, geostatistical.*

## INTRODUCCIÓN

El suelo como cuerpo tridimensional, viviente y dinámico, es parte integral del ecosistema terrestre, varía gradualmente en el espacio geográfico y a través del tiempo, forma complejos patrones por la interrelación de múltiples factores ambientales y funciones naturales forzadas (Segura-Castruita, 2014). La planeación para el uso racional de este recurso, requiere del conocimiento de su variabilidad espacial y sus características físicas y químicas (Donghee *et al.*, 2012; Kolat *et al.*, 2012). La evaluación del estado actual del recurso edáfico en una región agrícola es de importancia para su uso, manejo y conservación (Flores *et al.*, 2002; Anguiano *et al.*, 2003).

El Distrito de Riego 017 (DR017) en la Región Lagunera, entre los estados de Coahuila y Durango, México, tiene problemas de arsenicismo (Castruita *et al.*, 2011); de tal manera que en algunos suelos (grupo de los Fluvisoles) de esta región hay concentraciones de arsénico (As) disponible que fluctúan de 0.648 a 1.23 cmol(+) kg<sup>-1</sup>, valores que no representan un problema de contaminación natural por arsenicismo para los suelos agrícolas de la región (Hernández *et al.*, 2013). Alam *et al.* (2007) indican que la presencia y acumulación de este elemento en el suelo es resultado de procesos geoquímicos y de actividades antropogénicas. El arsénico en el suelo puede permanecer en dos estados de oxidación, como arsenitos (AsO<sub>3</sub>) o como arsenatos (AsO<sub>4</sub>); siendo este último estado el más habitual en condiciones de campo y laboratorio, y el más susceptible de ser adsorbido por las partículas del suelo (Violante y Pigna, 2002). Los constituyentes del suelo (arcillas silicatadas, amorfas, carbonatos y óxidos e hidróxidos de hierro o aluminio), juegan un papel importante en la movilidad del arsénico dentro de éste (Bissen y Frimmel, 2003; Zhao *et al.*, 2009) y determinan la compleja variación espacial de la concentración del

As en el suelo (Lin, 2008). Otro factor que puede influir en la concentración de arsénico en el suelo, es la adición de fósforo en forma de fertilizante a través de la actividad agrícola (Fitz y Wenzel, 2002). En la Región Lagunera, Hernández *et al.* (2013) concluyeron que la adición de fósforo al suelo da como resultado el incremento de la concentración de As en la solución del suelo hasta en 662%; asimismo, destacan la necesidad de establecer la distribución espacial de este elemento, para un mejor entendimiento de la presencia de arsénico en los suelos de la región. La utilidad de la geoestadística y sistemas de información geográficos (SIG) en el establecimiento de la distribución espacial de contaminantes del suelo ha sido demostrada; de tal manera que, la cartografía de la distribución de As puede contribuir en el entendimiento de la presencia de As en el suelo y en aguas subterráneas (Reimann *et al.*, 2009). Esto hace suponer que al determinar una línea base de concentraciones iniciales de As disponible en los suelos de una región, así como su relación con los contenidos de arcilla, calcio y fósforo; además de la distribución espacial de este metaloide, se lograría una mejor comprensión del problema de arsenicismo, lo cual contribuiría en la formulación de estrategias de manejo agrícola y ambiental. En este sentido, las investigaciones enfocadas al conocimiento de la distribución espacial de este metaloide en la región Lagunera son escasas. Al respecto, los métodos de interpolación son procedimientos útiles para predecir valores desconocidos de cualquier dato (como elevaciones, precipitaciones, concentraciones químicas, niveles de ruido, etc.) de un punto geográfico. Los más utilizados son el método de ponderación de la distancia inversa (IDW por sus siglas en inglés) y el kriging ordinario (KO) (Li y Heap, 2011). El método IDW se considera como un método no-geoestadístico (Li y Heap, 2014) que emplea la Ley de Tobler (Tobler, 1970) para el cálculo de valores de sitios no muestreados con base en el promedio ponderado de los datos de sitios cercanos muestreados (Longley *et al.*, 2010; Panagopoulos *et al.*, 2006). La ponderación está dada por una función inversamente proporcional a la distancia entre el punto a ser estimado y el punto muestreado (De la Mora *et al.*, 2004). En cambio, KO cuantifica la estructura espacial de los datos mediante el uso de variogramas llamados algunas veces semivariogramas debido a su similitud en el cálculo, y los predice mediante la interpolación usando estadística (Villatoro *et al.*, 2008). Ambos modelos asumen que las predicciones son una

combinación lineal de los datos (Schloeder *et al.*, 2001). La efectividad de estos interpoladores ha sido comparada en la elaboración de mapas de distribución de diferentes características de los suelos, precipitación, y concentración de arsénico en aguas subterráneas, entre otros (Hernández y Ponce, 2006; Shi *et al.*, 2009; Gordon *et al.*, 2014). Sin embargo, la información relacionada con la comparación de mapas obtenidos a partir de KO e IDW en la distribución espacial de concentraciones de As edáfico en una región árida, es escasa. Los objetivos de este trabajo fueron determinar la concentración de As en la capa superficial (0-30 cm) de suelos del DR017, así como determinar su relación con el contenido de arcilla, fósforo y carbonatos de calcio de esos suelos y establecer su distribución espacial utilizando los métodos de interpolación KO e IDW.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

El área fue el Distrito de Riego 017 (DR017) ubicado en la Comarca Lagunera, en la parte suroeste del estado de Coahuila y el extremo noreste del estado de Durango en la zona norcentral de México, a 1100 m de altitud (Figura 1). El clima es un BW hw'' (e') correspondiente a muy seco o desértico, semicálido con invierno fresco (García, 1988). La vegetación es semidesértica de tipo matorral desértico rosetófilo, sin erosión apreciable. Su geología es de clase sedimentaria del tipo caliza. Los suelos se clasifican dentro de los grupos Calcisoles, Gypsisoles, Feozem, Fluvisoles y Vertisoles (INEGI, 2006). Por otra parte, los campesinos de la región con base en su conocimiento tradicional, identifican cinco clases de tierra que nombra Blanca (Bl), Blanca Arenosa (Ba), Arenales (A), Prietas (Pr) y Negras (N), por las características que observan en los suelos como el color, la textura y la consistencia, que las relacionan con los cultivos y los rendimientos que obtienen (Segura-Castruita *et al.*, 2012).

El trabajo se dividió en cinco etapas: 1) determinación de sitios de muestreo, 2) análisis de laboratorio, 3) generación de la cartografía de arsénico, 4) verificación de la precisión de mapas y 5) análisis de resultados.

**Determinación de los sitios de muestreo.** El número de sitios de muestreo o tamaño de muestra se obtuvo de

acuerdo con Shabenberger y Pierce (2001), mediante la siguiente Ecuación 1:

$$N = B\pi_i(1-\pi_i)/b_i^2 \quad (1)$$

donde:  $N$  es el número de sitios de muestreo;  $B$  es determinado por  $ji$  cuadrada con un grado de libertad y  $a - \alpha / c$ ;  $c$  representa el número de categorías en la clasificación, para el estudio es el número de clases de tierra (cinco [Bl, Ba, Pr, N y A], más ninguna o algún otra clase de tierras diferente que indiquen los productores y no se tenga relacionada) como lo mencionan Segura-Castruita *et al.* (2012),  $\alpha$  es el nivel de confianza (95%);  $\pi_i$  es el más grande porcentaje para cada categoría o clase (50%) y  $b_i$  (30%) la probabilidad de que el resultado sea inferior al deseado. Por lo tanto, el número total de sitios o puntos de muestreo fue de 33. La ubicación de los sitios de muestreo se realizó sobre una escena del DR017 en formato digital, de manera aleatoria (Francois *et al.*, 2003), a través del módulo Hawth's Tools del software ArcGIS 10.1<sup>©</sup> (Segura-Castruita *et al.*, 2014) en la parte que corresponde al estado de Coahuila (Figura 1); aunque en la elección final de los sitios se tomó como criterio la accesibilidad

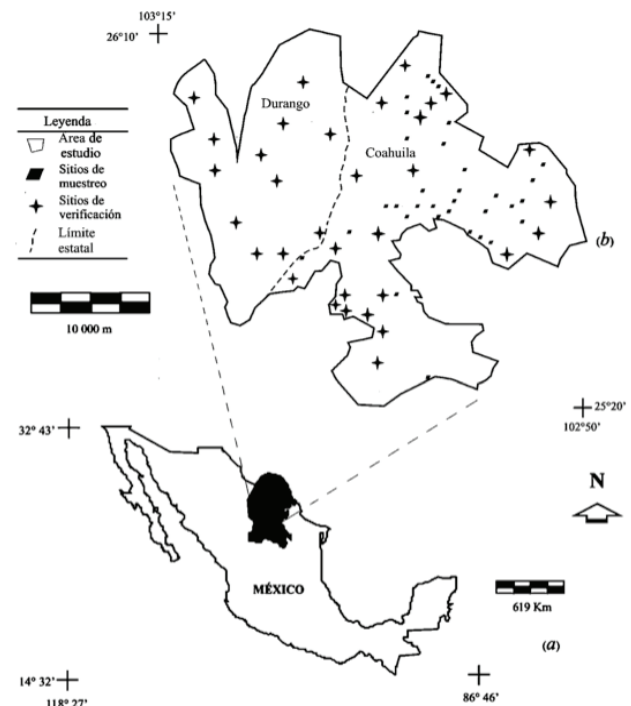


Figura 1. Localización del Distrito de Riego 017, área de estudio.

a los lugares (carreteras pavimentadas, terracerías y brechas) con el apoyo de cartas topográficas del INEGI (1988). En cada sitio, una muestra simple de suelo (2 kg, aproximadamente) de la capa superficial (0-30 cm de profundidad) fue colectada; es decir, un total de 33 muestras simples de suelo fueron obtenidas del área de estudio, que se trasladaron al laboratorio. Asimismo, cada sitio fue nuevamente georreferenciado con un GPS marca Garmin Etrex, ya que en algunos casos las coordenadas de los sitios no fueron exactas a las que originalmente se ubicaron en el área de estudio para el muestreo. Además, se realizó una entrevista a los productores dueños de las parcelas o lugares donde se encontraban los sitios de muestreo, con el fin de conocer la clase de tierra que correspondía, de acuerdo al manual para la cartografía de clases de tierras campesinas de Ortiz-Solorio *et al.* (1990), y relacionarlos a los resultados de contenidos de arsénico.

**Análisis de laboratorio.** Las determinaciones físicas y químicas que se realizaron a los suelos fueron: análisis mecánico de partículas (método de la pipeta) para conocer el porcentaje de partículas de tamaño arcilla ( $r$ ), carbonatos de calcio secundario (método de Horton y Newson), fósforo disponible (método de Olsen), y arsénico disponible (espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros) (Norma Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, SEMARNAT, 2002). Los análisis se realizaron por triplicado a cada uno de los suelos muestreados; donde cada suelo muestreado correspondió a un tratamiento y su determinación contó con tres repeticiones.

**Generación de la cartografía de arsénico.** La distribución espacial de las concentraciones de arsénico disponible en los suelos del DR017, se obtuvo al realizar la interpolación de los datos de contenidos de arsénico con respecto a su ubicación geográfica. Los métodos que se utilizaron fueron KO (Lin y Puls, 2008) e IDW, con un peso o poder en el clasificador de dos (Fortis *et al.*, 2010), mediante los softwares ArcGIS 10.1<sup>©</sup> y el IDRISI Kilimanjaro.

**Verificación de la precisión de mapas.** Los mapas de concentración de As (obtenidos con IDW y KO) fueron verificados en 33 puntos, distribuidos en forma aleatoria en cada mapa. El número de puntos o sitios fue el mismo que en el muestreo inicial, al considerar que ese fue el resultado del tamaño de muestra para el área de estudio. La distribución de estos se obtuvo nuevamente como se indicó en la sección de sitios de muestreo, con la salvedad que se realizó en toda el área

que corresponde al distrito (Figura 1), para asegurar que no se tuviera la misma ubicación que los del muestreo inicial. En cada punto, la concentración de As fue registrado en una base de datos; asimismo, sus coordenadas fueron grabadas en un GPS marca Garmin, para acudir posteriormente a campo y realizar de nuevo la colecta de una muestra simple de suelo en cada sitio. Las muestras fueron trasladadas a laboratorio, donde se obtuvo el contenido de arsénico, mismo que se comparó con las concentraciones que indicaban los mapas temáticos (Segura-Castruita *et al.*, 2014). Los resultados de la comparación sirvieron para elaborar una matriz de error con dos clases (acierto o error) para cada mapa (Segura-Castruita *et al.*, 2012) con el fin de obtener la precisión de los mismos.

**Análisis estadístico de los resultados.** Se realizó una prueba de medias de los resultados de las características físicas y químicas mediante la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Además, relaciones lineales fueron establecidas entre las concentraciones de arsénico (variable dependiente) y el porcentaje de arcilla y  $\text{CaCO}_3$ , así como con la concentración de fósforo, con el fin de determinar la influencia de estas características en la presencia de arsénico. Asimismo, un análisis de varianza ( $P \leq 0.05$ ) fue realizado a estas regresiones. Por último, se llevó a cabo una prueba de bondad de ajuste a la precisión de los mapas, mediante una prueba de *ji* cuadrada, con un grado de libertad y un nivel de significancia al 5% ( $X^2_{0.05}(1)$ ), lo que da como resultado un valor crítico  $X^2 = 3.84$ , con el fin de contrastar que la precisión de los mapas es diferente, mediante la siguiente Ecuación 2:

$$X^{2*} = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (2)$$

donde:  $X^{2*}$  es el valor estadístico *ji* cuadrada calculado,  $O_i$  frecuencias observadas en cada clase (acierto, error) para cada mapa,  $E_i$  frecuencias esperadas para cada clase (acierto, error) de cada mapa.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Arsénico en los Suelos del DR017 en la Comarca Lagunera

La concentración de arsénico (As) disponible en los suelos de los diferentes sitios (Cuadro 1) presentó



diferencias estadísticamente significativas ( $P \leq 0.05$ ). Lo anterior indica que la distribución de este metaloide en los suelos de la región no es uniforme; por lo que la concentración de este elemento podría estar relacionada con algunas características edáficas como el contenido de arcilla (r),  $\text{CaCO}_3$  y concentraciones de fósforo (P)

como indican Fixen y Grove (1990). Sin embargo, al relacionar el contenido de As con las características del suelo en estudio, se obtuvo una función lineal multivariada, que se presenta en la Ecuación 3:

$$As = 0.314 + 0.010r - 0.026 \text{ CaCO}_3 + 0.001P \quad (3)$$

**Cuadro 1. Concentraciones de arsénico y características edáficas de suelos del Distrito de Riego 017.**

Muestra	UTM		As mg kg <sup>-1</sup>	r - - - - - % - - - - -	CaCO <sub>3</sub>	P mg kg <sup>-1</sup>	Clase de tierra campesina
	X	Y					
1	686051	2874816	1.89 a†	43.44 defg	1.77 o	3.63 op	Prieta
2	687212	2872198	1.39 ab	39.44 ghi	3.40 lm	9.93 g	Negra
3	687259	2872365	1.49 ab	43.44 defg	2.19 o	8.96 hi	Prieta
4	686839	2873111	0.59 cd	32.16 jk	4.00 k	7.31 kl	Blanca arenosa
5	681076	2871083	0.48 cd	39.28 ghi	6.41 i	7.12 klm	Blanca arenosa
6	696338	2852715	0.20 d	16.24 op	3.40 lm	6.64 m	Arenal
7	673694	2850376	0.35 cd	29.12 kl	3.70 kl	7.02 klm	Negra
8	700855	2851202	0.20 d	40.00 fghi	9.43 e	7.55 jk	Prieta
9	684620	2847670	0.49 cd	39.28 ghi	4.60 j	7.02 klm	Prieta
10	687674	2852029	0.07 d	41.28 efgh	4.00 k	5.86 n	Prieta
11	688921	2853733	0.13 d	44.72 cdef	6.41 i	6.64 m	Prieta
12	676174	2850402	0.07 d	23.28 mn	4.60 j	4.21 o	Blanca
13	677721	2850456	0.48 cd	40.72 fghi	4.00 k	6.73 lm	Prieta
14	694216	2849585	0.21 d	35.84 ij	2.70 n	9.55 gh	Negra
15	685195	2832691	0.20 d	46.00 cde	4.90 j	6.83 lm	Prieta
16	700030	2848494	0.34 cd	19.28 no	8.82 f	13.14 e	Arenal
17	690303	2843282	0.35 cd	26.00 lm	12.02 c	9.06 hi	Blanca arenosa
18	693812	2842386	0.35 cd	8.00 q	3.10 mn	7.51 jk	Arenal
19	681246	2853077	0.20 d	43.28 defg	4.00 k	5.96 n	Prieta
20	683474	2850527	0.48 cd	55.02 b	6.41 i	8.77 i	Prieta
21	699187	2850281	1.04 bc	36.20 hij	2.19 o	7.99 j	Negra
22	677938	2849842	0.50 cd	17.92 op	9.60 e	3.23 p	Arenal
23	677938	2868252	0.25 d	29.20 kl	14.50 b	9.26 hi	Blanca
24	685137	2863144	0.75 cd	33.20 jk	8.20 g	55.46 a	Blanca
25	689460	2858712	1.00 bc	43.92 cdefg	10.30 d	9.38 ghi	Prieta
26	704550	2859215	1.00 bc	59.20 b	9.60 e	7.28 kl	Prieta
27	702502	2856505	0.50 cd	67.20 a	6.80 i	30.45 b	Prieta
28	667101	2845457	0.50 cd	49.02 c	12.40 c	10.74 f	Prieta
29	692305	2842062	0.10 d	13.20 p	7.50 h	21.46 c	Arenal
30	684802	2849892	0.25 d	40.20 fghi	12.40 c	17.88 d	Prieta
31	681140	2851171	0.50 cd	46.64 cd	9.60 e	5.44 n	Prieta
32	691197	2862134	0.25 d	46.64 cd	6.80 i	10.86 f	Prieta
33	689989	2816649	0.50 cd	48.64 c	20.79 a	13.33 e	Prieta

† Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). r = contenido de arcilla; P = fósforo.

Los parámetros de esta ecuación tienen diferente significado, la ordenada al origen señala que, al no existir arcilla, carbonatos de calcio ni fósforo en el suelo, la concentración de arsénico disponible sería igual a  $0.314 \text{ mg kg}^{-1}$ . Por otra parte, los coeficientes de regresión tienen diferentes tendencias (positivas y negativas) para cada variable independiente; es decir, cuando se incrementa en una unidad el porcentaje de arcilla o el contenido de fósforo en el suelo, la concentración de arsénico aumentará  $0.010$  y  $0.001 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. Diferentes investigaciones han demostrado que el contenido de arcilla tiene influencia en la retención de arsenatos en el suelo (Manning y Goldberg, 2007) como se encontró en este estudio. Por otra parte, la escasa relación entre el arsénico y el fósforo se debe principalmente al equilibrio que estos dos elementos guardan en la naturaleza (Liu *et al.*, 2001), que se modifica al agregar fósforo como fertilizante (Hernández *et al.*, 2013). En cambio, cuando el porcentaje de carbonato de calcio se incrementa en una unidad, el As disminuye  $0.026 \text{ mg kg}^{-1}$ . Este comportamiento se puede explicar porque el ión  $\text{Ca}^{2+}$  promueve la adsorción de arsenatos y carbonatos en el suelo; también, puede alterar la retención/movilización de As en el suelo (Stachowicz *et al.*, 2008). Sin embargo, la ecuación tiene una  $R^2$  igual que  $0.115$ , lo que significa que sólo explica el  $11.5\%$  del fenómeno. Es decir, las características edáficas seleccionadas en combinación, no ayudan a esclarecer el comportamiento de la concentración de arsénico en los suelos del DR017.

No obstante, el análisis de varianza de la regresión (Cuadro 2) indica que el modelo estimado es significativo ( $P \leq 0.05$ ) ya que la probabilidad de rechazo fue igual

a  $0.009$ ; además, la probabilidad de rechazo ( $P$ ) y la  $F$  calculada de las variables independientes es diferente, así como el error estandarizado de los coeficientes (EEC), lo cual indica que considerar en la regresión únicamente a la  $r$  y a los  $\text{CaCO}_3$ , por separado sería más apropiado para tratar de explicar el comportamiento del arsénico en estos suelos.

Al analizar la agrupación de medias de los valores más altos de arsénico (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) en los suelos del área de estudio, cuatro sitios presentaron la mayor concentración (Cuadro 1); estos sitios se ubicaron al norte del DR017 y correspondieron a las clases de tierra prieta y negra. Al establecer nuevamente la relación entre la concentración de As y el contenido de arcilla, de acuerdo con lo mencionado anteriormente, así como de un sitio más (blanca arenosa) que se encontraba próximo a los tres anteriores, con el fin de captar la variabilidad en esa área, se tuvo el modelo que se muestra en la Figura 2. Este modelo es estadísticamente significativo ( $P \leq 0.05$ ) de tal manera que la ecuación de regresión puede explicar  $85.87\%$  ( $R^2$  ajustada) de la variación del As en el rango de contenidos de arcilla que fluctúan de  $32.16$  a  $43.44\%$ . En este sentido, la ecuación podría utilizarse para predecir contenidos de As, en el rango antes mencionado.

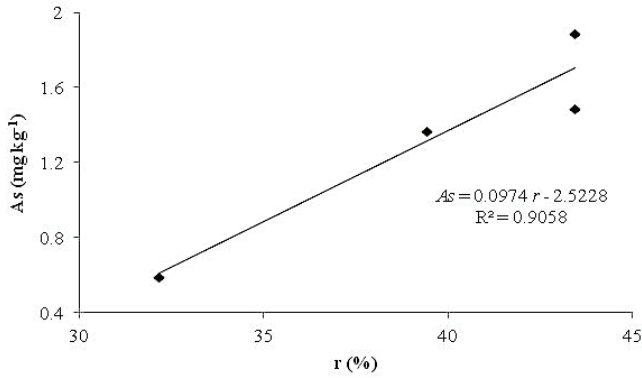
Este comportamiento se ha reportado en suelos de California, donde se explica que los suelos con mayor contenido de arcilla tienen una mayor capacidad para retener arsénico (Manning y Goldberg, 2007); sin embargo, no se establece el tipo de arcilla que está influyendo en este fenómeno. Por otra parte, en la presente investigación se constató que los cultivos que se encuentran en suelos del área norte del DR017, son irrigados con agua que se extrae del subsuelo.

**Cuadro 2. Análisis de varianza de la regresión multivariada entre la concentración de arsénico y el contenido de arcilla, carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y fósforo (P).**

Parámetro	GL <sup>†</sup>	SC ajustado	CR	EEC	T	Valor F	P
Regresión	3	2.42				4.05	0.009
Constante			0.314		2.07		0.041
r	1	1.59	0.01	1.287	2.83	7.98	0.006
$\text{CaCO}_3$	1	1.13	-0.026	1.097	-2.38	5.67	0.015
P	1	0.32	0.002	0.032	0.4	0.16	0.72
Error	95	18.92					
Total	98	21.34					

<sup>†</sup>GL = grados de libertad; SC = suma de cuadrados; CR = coeficiente de regresión; EEC = error estandarizado de los coeficientes; T = t de tablas; F = estadística de probabilidad; P = probabilidad de rechazo menor o igual a 0.05.

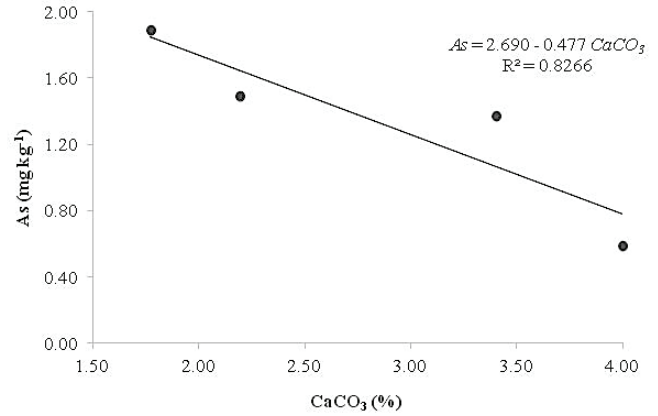




**Figura 2.** Relación de arsénico con respecto en el contenido de arcilla en suelos del norte del Distrito de Riego 017.

Aguilar-Muñiz *et al.* (2012) indican que, las aguas de los mantos acuíferos de esta zona tienen contenidos de  $As > 0.25 \text{ mg L}^{-1}$ . Lo anterior sugiere que la presencia y tipo de arcilla, así como la calidad del agua que se utiliza en su manejo, influyen en la distribución y disponibilidad del arsénico en estos suelos.

En cambio, el modelo de la presencia de As con el contenido de  $\text{CaCO}_3$ , no es estadísticamente significativo ( $P \leq 0.05$ ). No obstante, este modelo muestra una tendencia negativa (Figura 3); es decir, la concentración de arsénico disminuye  $0.4770 \text{ mg kg}^{-1}$  cuando el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  se incrementa una unidad. De acuerdo con Yokoyama *et al.* (2012), el pH alcalino propicia la unión del metaloide a los  $\text{CaCO}_3$ . Los pH de los suelos del área de estudio son de neutros a alcalinos, lo que ayuda a explicar el comportamiento del As respecto al  $\text{CaCO}_3$ .

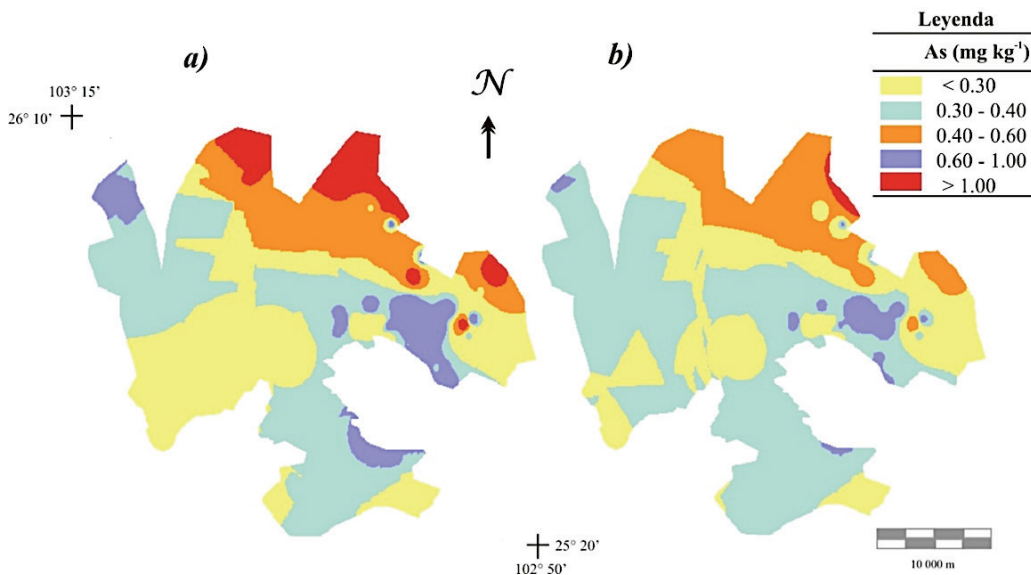


**Figura 3.** Relación de  $\text{CaCO}_3$  con respecto al contenido de As en el suelo del norte del Distrito de Riego 017.

Lo anterior permite deducir la presencia de arsenato de calcio o de un mineral con As (en combinación con el carbonato de calcio) en los suelos de este estudio. En otras palabras, procesos pedogenéticos que involucran As y  $\text{CaCO}_3$  de manera natural, permiten que el As en la solución del suelo tenga baja disponibilidad en presencia de  $\text{CaCO}_3$ ; pero en este estudio no se realizaron pruebas al respecto.

**Precisión de los Mapas de Concentración de Arsénico**

Los mapas de concentración de arsénico (Figura 4) muestran cinco clases de contenido de arsénico disponible. En los mapas se puede observar que



**Figura 4.** Mapas de distribución espacial de arsénico en el Distrito de Riego 017 (a) Método KO; (b) Método IDW.

la mayor concentración de arsénico se encuentra al norte del DR017, lo que está relacionado con las mayores concentraciones de As y los altos contenidos de arcilla, como se explicó anteriormente.

El mapa obtenido con el método KO (Figura 4a) muestra una superficie de 21 387.83 ha (Cuadro 3) con altos contenidos de As ( $> 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ ), mayor que la del mapa elaborado con IDW (Figura 4b); mientras que, con el IDW la más grande superficie (154 924.01 ha) fue la que presenta contenidos de  $0.30$  a  $0.40 \text{ mg kg}^{-1}$ , que cubre un 51.26% del área total del distrito (302 206.51 ha). En cambio, cuando el mapa se obtuvo con KO, los contenidos  $< 0.30 \text{ mg kg}^{-1}$  ocuparon un área de 107 510.48 ha, que corresponde a 35.57% del área total del DR017.

En cuanto a la precisión de los mapas temáticos obtenidos con IDW y KO no fue similar (Cuadro 4). El mapa con mayor precisión (75.7%) fue el que se obtuvo con KO. Lo anterior se constató con el análisis de bondad de ajuste de las distribuciones de los resultados de la precisión de los mapas, donde el resultado fue menor ( $X^{2*} = 1.32$ ) que el valor crítico, por lo tanto, se acepta que los mapas tienen una precisión diferente. Al analizar el contraste de cada mapa se encontró que con KO se tuvo el mayor ajuste ( $X^{2*}_{KO} = 0.48$ ) menor que 0.86 de IDW y por ende KO es más eficiente en la predicción de la presencia de As en la región. Este resultado es acorde con lo reportado por otros investigadores, quienes mencionan que el interpolador más popular y rápido es Kriging (Isaaks y Srivastava, 1989; Xie *et al.*, 2011).

Las diferencias entre los interpoladores se deben a que el IDW considera relaciones de distancia simple (Li y Heap, 2014), dando como resultados valores entre el mínimo y máximo de los datos observados (Li y Heap, 2008), lo cual depende de la configuración

**Cuadro 3. Áreas de las clases de concentraciones de arsénico disponible edáfico del Distrito de Riego 017.**

As	KO	IDW
mg kg <sup>-1</sup>	----- ha -----	
< 0.30	107 510.48	88 721.56
0.30 – 0.40	103 572.91	154 924.01
0.40 – 0.60	45 030.31	47 668.10
0.60 – 1.00	24 704.98	9363.06
> 1.00	21 387.83	1529.79

**Cuadro 4. Matriz de precisión de mapas de concentración de arsénico edáfico del Distrito de Riego 017.**

Mapa	N	Acierto	Error	Precisión
				%
KO	33	25	8	75.7
IDW	33	20	10	60.6

N = tamaño de la muestra.

del interpolador o algoritmo clasificador; es decir, el exponente que determina el peso o poder asignado a cada una de las observaciones. Al respecto, Cruz *et al.* (2010) afirmaron que el mejor poder es ocho. En este estudio el peso o poder que se utilizó fue dos, lo que probablemente provocó que la precisión del interpolador disminuyera. En cambio, KO considera la cercanía de la vecindad de los diferentes puntos que lo rodean (Xie *et al.*, 2011), así como minimiza la varianza de los valores de los puntos observados, lo que le permite obtener resultados fuera del rango observado (Li y Heap, 2014) e incrementa su eficiencia (Villatoro *et al.*, 2008). No obstante, en este estudio el área de muestreo para la verificación del mapa al ser mayor que la explorada inicialmente en el estudio, pudo limitar la precisión del interpolador Kriging.

## CONCLUSIONES

- La capa superficial de los suelos (0-30 cm de profundidad) del Distrito de Riego 017 presentó concentraciones de arsénico (As) que fluctúan de  $0.07$  a  $1.89 \text{ mg kg}^{-1}$ . El arsénico disponible en estos suelos depende de los contenidos de arcilla y carbonatos de calcio, principalmente; mientras que el fósforo disponible en estos suelos no influye en la presencia de As, ya que se encuentran en equilibrio. Las mayores concentraciones de este metaloide ( $1.39$ - $1.89 \text{ mg kg}^{-1}$ ) están asociados a altos contenidos de arcilla de los suelos (39.44 a 43.44%), correspondientes a tierras que los campesinos clasifican como negras y prietas, que se encontraban en la parte norte del Distrito de Riego 017 de la región de Coahuila; la relación entre las concentraciones de As disponible y contenidos de arcilla fue alta ( $R^2 = 0.9058$ ) en los suelos de este lugar.
- La distribución espacial del arsénico disponible en el distrito de riego presentó concentraciones que se incrementa en un sentido de sur a norte. El mapa obtenido con el interpolador Kriging ordinario mostró

una precisión (75.7%) mayor que el derivado del método inverso de la distancia. Aun cuando este resultado es aceptable, es necesario considerar que la distancia entre el límite del área de estudio y los puntos de muestreo para la verificación, fue amplia, lo que probablemente limitó la precisión del interpolador. Por tanto, se requeriría incrementar el espacio de distribución de los sitios de muestreo, a fin de aumentar la precisión del interpolador Kriging en la región.

## AGRADECIMIENTOS

A el Tecnológico Nacional de México, antes Dirección General de Educación Superior Tecnológica, que financió este trabajo mediante el Proyecto con Clave 5168.13-P.

## LITERATURA CITADA

- Aguilar-Muñiz, A. U., F. Valdés P. y G. García V. 2012. Efectos estacionales en los niveles de arsénico de pozos urbanos de la Comarca Lagunera. IB: 12-47. *Ibersensor* 7: 132-133.
- Alam, M. G., M. Tokunaga, and S. Stagnitti. 2007. Removal of arsenic from contaminated soils using different salt extractants. *J. Environ. Sci. Heath A*. 42: 447-451.
- Anguiano C., J., J. J. Alcántar R., J. A. Ruiz C., I. J. González A., I. Vizcaíno V., J. R. Regalado R. y C. De la Mora O. 2003. Recursos edafoclimáticos para la planeación del sector productivo en el estado de Michoacán. Libro Técnico No. 1. INIFAP-CIRPAC. Uruapan, Michoacán, México.
- Bissen, M. and F. H. Frimmel. 2003. Arsenic – a review. Part II: oxidation of arsenic and its removal in water treatment. *Acta Hydroch. Hydrobiol.* 31: 97-107.
- Castruita Á., L., A. M. García L., J. E. Camporredondo S., C. F. Sifuentes B. y M. Garza G. 2011. Estudio cinético de la remoción de arsénico en un reactor electroquímico tipo filtro prensa. *Prospectiva* 9: 7-12.
- Cruz C., G., C. A. Ortiz S., E. Ojeda T., J. F. Martínez M., E. D. Sotelo R., and A. L. Licona V. 2010. Evaluation of four digital classifiers for automated cartography of local soil classes based on reflectance and elevation in Mexico. *Int. J. Remote Sens.* 31: 665-679.
- De la Mora O., C., J. G. Flores G., J. A. Ruiz C. y J. García V. 2004. Modelaje estocástico de la variabilidad espacial de la calidad de agua en un ecosistema lacustre. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 20: 99-108.
- Donghee, K., K. Kyu-Sun, K. Seongkwon, C. Youngmin, and L. Woojin. 2012. Assessment of geotechnical variability of Songdo silty clay. *Eng. Geol.* 133-134: 1-8.
- Fitz, W. J. and W. W. Wenzel. 2002. Arsenic transformations in the soil/rhizosphere/plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. *J. Biotechnol.* 99: 259-278.
- Fixen, P. E. and J. H. Grove. 1990. Testing soils for phosphorus. pp. 141-180. *In*: R. L. Westerman (ed.). *Soil testing and plant analysis*. SSSA Book Ser. 3. Madison, WI, USA.
- Flores L., H. E., K. F. Byerly M., J. J. Aceves R. y J. A. Ruiz C. 2002. Diagnóstico del sistema de producción de agave con énfasis en problemas fitosanitarios. pp. 63-95. *In*: H. E. Flores López (ed.). *Análisis agroecológico del Agave tequilana Weber var. Azul con énfasis en problemas fitosanitarios en Jalisco*. INIFAP-CIRPAC-C.E. Altos de Jalisco. Tepatitlán, Jalisco, México.
- Fortis H., M., A. Huerta G., M. A. Segura C., J. L. García H., J. A. Leos R., A. García S. y R. Valdez C. 2010. Validación de cuatro modelos de interpolación para cartografiar nitrato y amonio en suelo. *Terra Latinoamericana* 28: 371-379.
- Francois M., J., J. R. Díaz G. y A. Pérez V. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: Una revisión. *Investig. Geográf.* 51: 53-72.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Gordon, G., S. Mattevada, and S. E. O'Bryant. 2014. Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas. *Environ. Res.* 130: 59-69.
- Hernández S., J. L. and R. Ponce H. 2006. Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: Comparison of spatial interpolation methods. *Environ. Monit. Assess.* 117: 307-334.
- Hernández O., G., M. A. Segura C., L. C. Álvarez G., R. A. Aldaco N., M. Fortis H. y G. González C. 2013. Comportamiento del arsénico en suelos de la Región Lagunera de Coahuila, México. *Terra Latinoamericana* 31: 295-303.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1988. Atlas nacional del medio físico. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2006. Conjunto de datos edafológicos alfanuméricos escala 1:250 000 Serie I, Continuo Nacional. INEGI. Aguascalientes, México.
- Isaaks, E. H. and R. M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press Nueva York, NY, USA. ISBN: 9780195050134.
- Kolat, Ç., R. Ulusay, and M. Lütfi Süzen. 2012. Development of geotechnical microzonation model for Yenisehir (Bursa, Turkey) located at a seismically active region. *Eng. Geol.* 127: 36-53.
- Li, J. and A. D. Heap. 2008. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. *Geoscience Australia*. ISSN 1448-2177
- Li, J. and A. D. Heap. 2011. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecol. Informat.* 6: 228-241.
- Li, J. and A. D. Heap. 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environ. Modell. Soft.* 53: 173-189.
- Lin, Y. P. 2008. Simulating spatial distributions, variability and uncertainty of soil arsenic by geostatistical simulations in geographic information systems. *Open Environ. Sci.* 2: 26-33.
- Lin, Z. and R. W. Puls. 2008. Adsorption, desorption and oxidation of arsenic affected by clay minerals and aging processes. *Environ. Geol.* 39: 753-759.
- Liu, F., A. de Cristofaro, and A. Violante. 2001. Effect of pH, phosphate and oxalate on the adsorption/desorption of arsenate on/from goethite. *Soil Sci.* 166: 197-208.

- Longley, P., M. Goodchild, D. Maguire, and D. Rhind. 2010. Geographic information systems and science. John Wiley and Sons. Hoboken, NJ, USA.
- Manning, B. and S. Goldberg. 2007. Arsenic (III) and arsenic (V) adsorption on three California soils. *Soil Sci.* 162: 886-895.
- Ortiz-Solorio, C. A., D. Pájaro-Huertas y V. M. Ordaz-Chaparro. 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.
- Panagopoulos, T., J. Jesus, M. D. C. Antunes, and J. Beltrao. 2006. Analysis of spatial interpolation for optimising management of a salinized field cultivated with lettuce. *Eur. J. Agron.* 24: 1-10.
- Reimann, C., J. Matschullat, M. Birke, and R. Salminen. 2009. Arsenic distribution in the environment: The effects of scale. *Appl. Geochem.* 24: 1147-1167.
- Schloeder, C. A., N. E. Zimmerman, and M. J. Jacobs. 2001. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 470-479.
- Segura-Castruita, M. A., L. Martínez C., E. García B., A. Huerta G., J. L. García H., M. Fortiz H., J. A. Orozco V., and P. Preciado R. 2012. Localization of local soil classes in an arid region of Mexico, using satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 33: 184-197.
- Segura-Castruita, M. A. 2014. Revisión: The soils of México. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 66: 223-224.
- Segura-Castruita, M. A., A. Huerta G., M. Fortis H., J. A. Montemayor T., L. Martínez C. y P. Yescas C. 2014. Cartografía de la probabilidad de ocurrencia de *Atriplex canescens* en una región árida de México. *Agrociencia* 48: 639-652.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma mexicana para análisis de laboratorio para clasificación de suelos. NOM-21-RECNAT-2000. México, D. F.
- Shabenderger, O. and F. J. Pierce. 2001. Contemporary statistical models for the plants and soil science. CRC Press LLC. Boca Raton, FL, USA.
- Shi, W., J. Liu, Z. Du, Y. Song, Ch. Chen, and T. Yue. 2009. Surface modelling of soil pH. *Geoderma* 150: 113-119.
- Stachowicz, M., T. Hiemstra, and W. H. van Riemsdijk. 2008. Multi-competitive interaction of As (III) and As(V) oxyanions with  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{PO}_{3-4}$ , and  $\text{CO}_{2-3}$  ions on goethite. *J. Coll. Interf. Sci.* 320: 400-414.
- Tobler, W. R. 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Econ. Geogr.* 46: 234-240.
- Villatoro, M., C. Henríquez y F. Sancho. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agron. Costarricense* 32: 95-105.
- Violante, A. and M. Pigna. 2002. Competitive sorption of arsenate and phosphate on different clay minerals and soils. *Soil Sci. Soc. Ame. J.* 66: 1788-1796.
- Xie, Y., T. Chen, M. Lei, J. Yang, Q. Guo, B. Song, and Z. Zhou. 2011. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. *Chemosphere* 82: 468-476.
- Yokoyama, Y., K. Tanaka, and Y. Takahashi. 2012. Differences in the immobilization of arsenite and arsenate by calcite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 91: 202-219.
- Zhao, F. J., J. F. Ma, A. A. Meharg, and S. P. McGrath. 2009. Arsenic uptake and metabolism in plants. *New Phytol.* 181: 777-794.



# Producción de genotipos de frijol negro en condiciones de humedad residual y sequía terminal

## *Production of black bean genotypes under residual moisture and terminal drought conditions*

Oscar Hugo Tosquy Valle<sup>1</sup>, Ernesto López Salinas<sup>1</sup>, Rigoberto Zetina Lezama<sup>1,‡</sup>,  
Bernardo Villar Sánchez<sup>2</sup> y José Raúl Rodríguez Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Campo Experimental Cotaxtla, CIRGOC, INIFAP, Km 34.5 Carretera Federal Veracruz-Córdoba. 94270 Medellín de Bravo, Veracruz, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (zetina.rigoberto@inifap.gob.mx)

<sup>2</sup> Campo Experimental Centro de Chiapas, CIRPAS, INIFAP, Km 3 Carretera Ocozocoautla-Cintalapa. 29140 Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas, México.

<sup>3</sup> Campo Experimental Ixtacuaco, CIRGOC, INIFAP, Km 34.5 Carretera Federal Martínez de la Torre-Tlapacoyan, Col. Rojo Gómez. 93600 Martínez de la Torre, Veracruz, México.

### RESUMEN

En Veracruz y Chiapas, el cultivo de frijol del ciclo otoño-invierno, sufre periodos de sequía durante la etapa reproductiva, lo que causa bajos rendimientos. El objetivo de esta investigación fue determinar el rendimiento de genotipos de frijol, evaluados bajo condiciones de humedad residual y de sequía terminal durante el ciclo otoño-invierno de 2013-2014, en las localidades de La Candelaria, Medellín, Veracruz, Campo Experimental Ixtacuaco (CEIXTA), municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, y Campo Experimental Centro de Chiapas (CECECH), municipio de Ocozocoautla, Chiapas. Se evaluaron 11 líneas avanzadas de frijol, comparadas con las variedades Negro Tacaná y Negro Jamapa, en diseño experimental bloques al azar con tres repeticiones. Las variables de respuesta fueron: días a floración media, días a madurez fisiológica, peso de 100 semillas y rendimiento de grano. En la Candelaria y el CECECH, ambas con ocurrencia de sequía terminal, se obtuvieron valores significativamente inferiores en las cuatro variables de respuesta, con respecto a los obtenidos en el CEIXTA, sin estrés por sequía. Las líneas SEN-56, SCN-2, SEN-70 y NCB-229 fueron las más precoces en alcanzar su floración media en las tres localidades de prueba, la cual en promedio ocurrió antes de 35 días después de la siembra. Las tres primeras líneas también mostraron menor tiempo a la madurez fisiológica, en promedio antes de los 71 días. La línea SCN-2 obtuvo en promedio el mayor peso de 100 semillas (27 g), el cual fue significativamente superior a los obtenidos por el resto de los genotipos, que registraron pesos menores a 25 g. Así mismo SEN-70, NGO-17-99 y Jamapa Plus,

junto con otras cuatro líneas obtuvieron un rendimiento promedio mayor a 1000 kg ha<sup>-1</sup>, significativamente superior al de las variedades Negro Jamapa y Negro Tacaná. SEN-70 fue la de mayor rendimiento con y sin sequía terminal.

**Palabras clave:** *mejoramiento genético, rendimiento, Phaseolus vulgaris.*

### SUMMARY

In Veracruz and Chiapas, autumn-winter growing cycle bean crops suffer periods of drought during the reproductive stage, causing low yields. The aim of this study was to determine the yield of bean genotypes evaluated under conditions of residual moisture and terminal drought during the autumn-winter 2013-2014 growing cycle, in the localities of La Candelaria, Medellín, Veracruz; Ixtacuaco Experiment Station (CEIXTA), municipality of Martínez de la Torre, Veracruz; and Centro de Chiapas Experiment Station (CECECH), municipality of Ocozocoautla, Chiapas. Eleven advanced bean lines were evaluated and compared with the control varieties Negro Tacaná and Negro Jamapa in a randomized block experimental design with three replications. The response variables were days to average flowering, days to physiological maturity, weight of 100 seeds and grain yield. In La Candelaria and the CECECH, both with terminal drought occurrence, the four response variables were significantly lower than those obtained in the CEIXTA, without drought stress. The SEN-56, SCN-2, SEN-70 and NCB-229 lines had significantly earlier average flowering in the three test locations, which on average

#### Cita recomendada:

Tosquy Valle, O. H., E. López Salinas, R. Zetina Lezama, B. Villar Sánchez y J. R. Rodríguez Rodríguez. 2017. Producción de genotipos de frijol negro en condiciones de humedad residual y sequía terminal. *Terra Latinoamericana* 35: 29-39.

Recibido: enero de 2016. Aceptado: octubre de 2016.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 35: 29-39.

occurred before 35 days after sowing. The first three lines also showed shorter time to physiological maturity, which on average was less than 71 days. The SCN-2 line produced the highest average weight of 100 seeds (27 g), which was significantly higher than those obtained with the other genotypes, which had weights below 25 g. In addition, SEN-70, NGO-17-99 and Jamapa Plus, along with four other lines obtained an average yield of more than 1000 kg ha<sup>-1</sup>, which was significantly higher than those of the varieties Negro Jamapa and Negro Tacaná. SEN-70 was the highest-yielding line with and without occurrence of terminal drought.

**Index words:** *genetic improvement, yield, Phaseolus vulgaris.*

## INTRODUCCIÓN

El frijol común *Phaseolus vulgaris* L. constituye uno de los granos más importantes para la alimentación humana, a nivel mundial se siembran aproximadamente 26 millones de hectáreas (Emam *et al.*, 2010). En México, durante el ciclo otoño-invierno 2012-13 con humedad residual, se sembraron 12 2840 ha, con un rendimiento promedio de 0.81 Mg ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2014). En el mismo ciclo agrícola, en los estados de Chiapas y Veracruz se sembraron 62 055 ha de frijol, equivalente al 50.5% de la superficie sembrada con humedad residual en el país, aunque el rendimiento promedio fue bajo (0.65 Mg ha<sup>-1</sup>), inferior al promedio nacional (SIAP, 2014).

Los bajos rendimientos obtenidos durante el ciclo otoño-invierno, obedecen en gran medida, al estrés hídrico que sufren las plantas de frijol, provocado por la ocurrencia de sequía, denominada terminal, porque generalmente se presenta después de la floración del cultivo, cuando el frijol es más sensible a la escasez de humedad (Acosta *et al.*, 1999; Frahm *et al.*, 2003). La sequía durante la etapa de floración, provoca aborto de flores y en la etapa de formación de vainas, aborto y poco desarrollo de las mismas, así como reducción de fotosíntesis, que provoca aborto del embrión (Manjeru *et al.*, 2007). La sequía reduce la producción de materia seca y los componentes de rendimiento, a través de la disminución del área foliar y los días de llenado del grano (Emam *et al.*, 2010), se afecta la formación del grano y su tamaño (Acosta-Díaz *et al.*, 2011) y se acelera la madurez fisiológica y la senescencia del

cultivo, por lo que hay una reducción significativa del rendimiento de grano (Acosta-Díaz *et al.*, 2004; Manjeru *et al.*, 2007). También existe reducción en el número de vainas por planta, causada por la abscisión de flores y vainas pequeñas o por falla en la fertilización por polen inviable (Manjeru *et al.*, 2007).

En trabajos experimentales realizados en el centro de Veracruz, con genotipos de frijol negro cultivados con suspensión de riego al inicio de la etapa reproductiva (sequía terminal), se tuvo una reducción de 10 días en su ciclo de madurez fisiológica, una disminución del 50% en el número de vainas producidas por planta y de 62% en el rendimiento de grano, con respecto a los que fueron cultivados con riego durante todo su ciclo de cultivo (López-Salinas *et al.*, 2011). En siembras comerciales de frijol, las pérdidas de rendimiento son del 20 hasta el 100%, de acuerdo con la duración y magnitud de la sequía (López-Salinas *et al.*, 2008).

El mejoramiento genético para tolerancia o resistencia a sequía, es una alternativa viable y práctica para disminuir los efectos negativos de este factor ambiental (Frahm *et al.*, 2003; Acosta-Díaz *et al.*, 2011), mediante el desarrollo de germoplasma adaptado a condiciones de sequía (Acosta *et al.*, 1999; Molina *et al.*, 2001; Frahm *et al.*, 2003; Acosta-Díaz *et al.*, 2004; López-Salinas *et al.*, 2011). Al respecto, Acosta-Díaz *et al.* (2004) mencionan que existe una variación genética entre los genotipos de frijol para las características fisiológicas y fenológicas, que confieren adaptación a las condiciones de sequía terminal. En el Programa de Frijol del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Veracruz, se dispone de líneas avanzadas y variedades mejoradas de frijol negro que han mostrado adaptación a las condiciones tropicales del sureste de México. El objetivo de este trabajo fue evaluar este grupo de genotipos, con la finalidad de determinar su rendimiento de grano en condiciones de humedad residual y de sequía terminal en el centro y norte de Veracruz y centro de Chiapas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ambientes de Evaluación

El estudio se realizó durante el ciclo otoño-invierno 2013-2014, en tres localidades. La primera fue en el Ejido La Candelaria, municipio de Medellín de Bravo, ubicada en el centro de Veracruz, a 18° 55'



19.41" N, 96° 11' 57.10" O, a una altitud de 22 m. En esta localidad, el clima es cálido subhúmedo  $Aw_0(w)$  (g), con una precipitación pluvial anual de 1400 mm y temperatura media anual de 25.4 °C (García, 2004; Díaz-Padilla *et al.*, 2006). La segunda el Campo Experimental Ixtacuaco (CEIXTA), ubicado en el municipio de Martínez de la Torre, en el norte de Veracruz, a 20° 02' 17.9" N y 97° 05' 47.0" O, a una altitud de 92 m. Su clima es cálido húmedo Af(m) (e), con una precipitación pluvial anual de 1743 mm y temperatura media anual de 24 °C (García, 2004; Díaz-Padilla *et al.*, 2006). La tercera fue el Campo Experimental Centro de Chiapas (CECECH), municipio de Ocozocoautla de Espinosa, en el centro de Chiapas, a 16° 46' 50.3" N y 93° 24' 13.2" O, a una altitud de 805 m. El clima es cálido húmedo (A) C ( $w_1$ ) ig' con abundantes lluvias en verano, una precipitación pluvial anual entre 800 y 1000 mm, con una media de 898 mm, temperatura media anual de 23.6 °C y media mensual superior a 18 °C (García, 2004; Serrano-Altamirano *et al.*, 2006).

De acuerdo a la clasificación agronómica de la Norma oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana, 2000), en el sitio de La Candelaria, en el estrato de 0 a 30 cm de profundidad, el suelo es de textura franca, con pH moderadamente ácido (5.99), alto en su contenido de materia orgánica (2.44%), bajo en nitrógeno inorgánico  $NH_4^+ + NO_3^-$  (17 mg  $kg^{-1}$ ), alto en fósforo extraíble (55 mg  $kg^{-1}$ ) y medio en bases intercambiables de potasio (210 mg  $kg^{-1}$ ), calcio (1928 mg  $kg^{-1}$ ) y magnesio (190 mg  $kg^{-1}$ ). En el CEIXTA, el suelo es de textura migajón arenosa, con pH moderadamente ácido (5.43), bajo en su contenido de materia orgánica (1.01%) y nitrógeno (9 mg  $kg^{-1}$ ), alto en fósforo (51 mg  $kg^{-1}$ ) y medio en potasio (175 mg  $kg^{-1}$ ), calcio (1053 mg  $kg^{-1}$ ) y magnesio intercambiables (166 mg  $kg^{-1}$ ). En el CECECH, el suelo es migajón arcillo arenoso, con pH neutro (6.9), bajo en su contenido de materia orgánica (1.1%), alto en nitrógeno inorgánico (106 mg  $kg^{-1}$ ), calcio (3329 mg  $kg^{-1}$ ) y magnesio (1158 mg  $kg^{-1}$ ), muy alto en fósforo orgánico (175 mg  $kg^{-1}$ ) y medio en su contenido de potasio (135 mg  $kg^{-1}$ ).

### Diseño Experimental

En cada sitio se condujo un ensayo uniforme de rendimiento, en el que se evaluaron 11 líneas seleccionadas durante el ciclo invierno-primavera

2013, en ensayos de riego-sequía, las cuales fueron: NGO-17-99, ELS-9-27, NGO-07022, Jamapa Plus, CIAT-103-25, SEQ-344-21, SCN-2, SEN-56, SEN-70, NCB-229 y X02-33-153, junto con las variedades Negro Tacaná, y Negro Jamapa (testigos regionales). Los ensayos se instalaron en el mes de octubre a una densidad de 250 000 plantas  $ha^{-1}$ , en los que hubo una emergencia mayor a 90% en los 13 genotipos de frijol, en los tres sitios experimentales. Se utilizó el diseño experimental bloques completos al azar con tres repeticiones y parcelas de tres surcos de 5 m de longitud, donde la parcela útil correspondió al surco central.

### Manejo Agronómico del Experimento

Durante la fase vegetativa del cultivo se realizó fertilización mineral al suelo con la dosis 40-40-00  $kg\ ha^{-1}$  de N,  $P_2O_5$  y  $K_2O$ , respectivamente, utilizando como fuentes de fertilizante: urea y fosfato diamónico, grado 18-46-00, la cual se complementó con una fertilización foliar a base de N-P-K (11.47% N, 8%  $P_2O_5$ , 6%  $K_2O$ ) y elementos menores (0.036% B, 0.040% Cu, 0.050% Fe, 0.005% Mo, 0.080% Zn y 0.230% S, 0.025% Ca y 0.002 Co) a razón de 2 L  $ha^{-1}$  de producto comercial. En el CECECH y en el CEIXTA, la maleza de hoja ancha y angosta se controlaron manualmente con azadón, mientras que en La Candelaria, el control se realizó con los herbicidas fomesafén y fluazifopbutil, en dosis de 750 + 750 mL  $ha^{-1}$  de producto comercial, cuyo control se complementó con una labor de cultivo realizado a los 27 días después de la siembra (Esquivel *et al.*, 1997). La presencia de doradilla (*Diabrotica balteata* LeConte) en los ensayos del CECECH y La Candelaria se controló con dos aplicaciones de cipermetrina en dosis de 200 mL  $ha^{-1}$  de producto comercial, en tanto que, en el CEIXTA la misma plaga y la chicharrita (*Empoasca kraemeri* Ross y Moore), se controlaron con dos aplicaciones de insecticida a base de imidacloprid + betacyfluthrin, en dosis de 200 mL  $ha^{-1}$  de producto comercial y una de cipermetrina con 100 mL  $ha^{-1}$  de producto comercial.

### Variables Explicativas y de Respuesta

Durante el ciclo del cultivo, se cuantificó la precipitación pluvial y la humedad del suelo. El registro de la precipitación pluvial en los sitios experimentales, se realizó con pluviómetros de PVC, haciendo las lecturas

en probetas. La humedad del suelo se obtuvo con el método gravimétrico, en muestras tomadas una vez por semana, en los estratos de 0-15, 15-30 y 30-45 cm, durante el ciclo del cultivo. Los datos de humedad del suelo se expresaron como humedad aprovechable y se realizó un balance de humedad para determinar el grado de sequía, en la cual se desarrollaron los genotipos de frijol, en los tres sitios experimentales.

Las variables de respuesta fueron: días a floración media de los genotipos, la cual se cuantificó a partir de la siembra hasta que 50% de las plantas tenían por lo menos una flor abierta; días a madurez fisiológica que se midió a partir de la siembra hasta que en 50% de las plantas de cada genotipo, sus vainas cambiaron de color verde a amarillo o morado, así como peso de 100 semillas en gramos y rendimiento de grano en kilogramos por hectárea ajustado al 14% de humedad.

### Análisis Estadísticos

Se realizaron análisis de varianza de las variables de respuesta por localidad, así como un análisis conjunto (localidades-genotipos) de los tres ambientes de evaluación. Para la separación de promedio se aplicó la prueba basada en la Diferencia Mínima Significativa al 5% de probabilidad de error (DMS,  $\alpha = 0.05$ ) (SAS Institute, 1999).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Precipitación Pluvial

En el CEIXTA se registraron lluvias frecuentes, con una precipitación pluvial acumulada hasta la madurez fisiológica del cultivo de 391.6 mm (Cuadro 1), por lo que prácticamente las plantas de frijol se desarrollaron sin estrés por humedad; en tanto que, en el CECECH y en La Candelaria, en ese periodo de desarrollo se tuvieron precipitaciones pluviales acumuladas de

97.7 y 52.1 mm (Cuadro 1), respectivamente, con restricciones de humedad durante la etapa reproductiva del cultivo (Fernández *et al.*, 1985).

### Balance de Humedad del Suelo

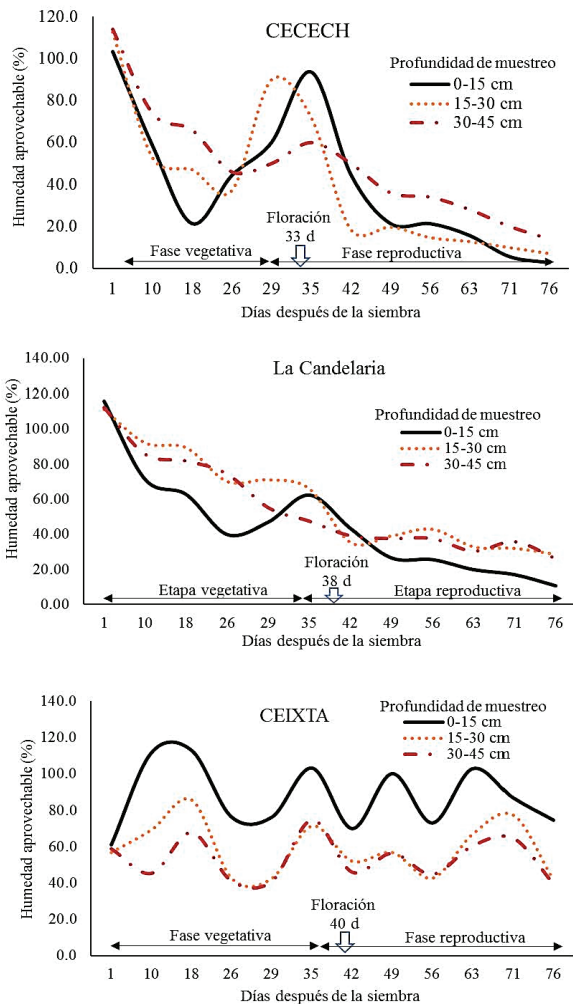
Los suelos en los cuales se estableció el ensayo presentaron una capacidad de campo (CC) de 23.6, 20.3 y 13% en los sitios La Candelaria, CEIXTA y CECECH, respectivamente, con un punto de marchitez permanente (PMP) de 12.5, 10.8 y 6%, en los mismos sitios de prueba, lo que permitió una humedad aprovechable de 11.1, 9.5 y 7%, de acuerdo con la metodología propuesta por Hillel (1980).

En el sitio de La Candelaria se observó menor variación de la humedad aprovechable entre las diferentes profundidades de suelo y fechas de muestreo, así como un descenso paulatino de ésta, desde la siembra hasta la madurez fisiológica del frijol, lo cual se asocia al comportamiento de la precipitación pluvial ocurrida en ese sitio de prueba. A su vez, en el CECECH se tuvo un comportamiento irregular, con alta variación de la humedad aprovechable del suelo entre las diferentes fechas de muestreo, sobre todo antes de la floración de los genotipos. Después de la floración hasta la etapa de madurez fisiológica se observó déficit hídrico en los tres estratos de suelo medidos, la cual fue más severa que en La Candelaria, por la baja capacidad de retención de humedad del suelo (Figura 1).

En el CEIXTA, el comportamiento de la humedad aprovechable durante todo el ciclo del cultivo fue muy variable dentro y entre fechas de muestreo, observándose mayor humedad en el estrato 0-15 cm, con promedio de 87.5%, que en los estratos 15-30 cm y 30-45 cm, en donde se obtuvieron promedios de 58.4 y 53.4%, respectivamente (Figura 1). En esta localidad se tuvieron mejores condiciones de humedad para el cultivo, que en los otros dos sitios de evaluación, cuya humedad aprovechable en la etapa de madurez

**Cuadro 1. Precipitación pluvial (mm) ocurrida en los sitios experimentales en las diferentes etapas vegetativas del cultivo de frijol. Ciclo otoño-invierno de 2013-2014.**

Localidad/municipio/estado	Fecha de siembra	Fase vegetativa	Fase reproductiva	Total en el ciclo
- - - - - Precipitación pluvial (mm) - - - - -				
CECECH, Ocozocoautla, Chiapas	1-Oct-13	97.7	0.0	97.7
La Candelaria, Medellín, Veracruz	23-Oct-13	52.1	0.0	52.1
CEIXTA, Martínez de la Torre, Veracruz	25-Oct-13	256.0	135.6	391.6



**Figura 1. Humedad aprovechable del suelo en el Campo Experimental Centro de Chiapas (CECECH), La Candelaria y Campo Experimental Ixtacuaco (CEIXTA), durante el ciclo otoño-invierno 2013-2014.**

fisiológica, en promedio de los tres estratos fue de 51.9%, en tanto que en La Candelaria y en el CECECH la humedad aprovechable promedio en la misma etapa fue de 28.5 y 6.9%, respectivamente.

La humedad aprovechable promedio de los tres estratos del suelo (0-45 cm) desde la siembra hasta la floración de la mayoría de los genotipos fue de 73.2, 67 y 61.9%, equivalente a una humedad del suelo de 20.6, 17.2 y 10.3%, en los sitios de La Candelaria, CEIXTA y CECECH, respectivamente. Después de este período, hacia la etapa terminal del cultivo, la humedad aprovechable promedio prevaleciente en los sitios respectivos fue de 34.3, 65.9 y 15.5%, equivalente a una humedad del suelo de 16.3, 17.1 y 7.1%. Este comportamiento pone de manifiesto que

en el CEIXTA no hubo diferencia en la humedad del suelo antes y después de floración; mientras que, en La Candelaria y en el CECECH, las diferencias en humedad aprovechable antes y después de floración fueron de 38.9 y 46.4%, respectivamente.

### **Floración Media, Madurez Fisiológica, Peso de 100 Semillas y Rendimiento de Grano**

En las tres localidades se detectó significancia estadística entre tratamientos ( $P \leq 0.01$ ) en las variables días a floración media, madurez fisiológica y peso de 100 semillas. Respecto al rendimiento de grano, sólo en las dos localidades de Veracruz se encontró efecto significativo entre tratamientos ( $P \leq 0.01$ ) (Cuadro 2).

En las tres localidades de prueba, las líneas SEN-56, NCB-229, SCN-2 y SEN-70, tuvieron un tiempo de floración significativamente más temprano que el resto de los genotipos. De acuerdo al análisis combinado, los días a floración media variaron significativamente entre ambientes de evaluación y genotipos. En la localidad de CEIXTA, se tuvo el mayor número de días a la floración media, los cuales fueron significativamente superiores, a los obtenidos en las otras dos localidades.

En el factor genotipo, las variedades Negro Tacaná y Negro Jamapa, junto con siete líneas, conformaron el grupo con el mayor número de días a la floración media, los cuales fueron estadísticamente superiores al de las cuatro líneas arriba indicadas, que en promedio presentaron su floración antes de los 35 días después de la siembra (Cuadro 3).

En los sitios de La Candelaria y CECECH en los que hubo ocurrencia de sequía, las líneas SCN-2, SEN-56 y SEN-70 fueron los genotipos más precoces, los cuales alcanzaron su madurez fisiológica entre los 63 y 67 días después de la siembra, también se observó menor tiempo a la madurez fisiológica en las líneas NCB-229, NGO 07022 y X02-33-153 (Cuadro 4). A su vez, en el CEIXTA, sólo las líneas SEN-56 y SEN-70, mostraron un tiempo significativamente menor a la madurez fisiológica que el resto de los genotipos (Cuadro 4).

En el análisis combinado se detectó significancia en la variable madurez fisiológica en los factores ambientes y genotipo ( $P \leq 0.01$ ). En la localidad del CEIXTA, la madurez fisiológica ocurrió en un tiempo significativamente más tardío, que en los otros dos sitios de evaluación (Cuadro 4). En el CECECH y en La Candelaria, la madurez ocurrió antes de los 70 días. En el factor genotipo, en promedio de

**Cuadro 2. Cuadrados medios y significancia estadística de días a floración media, días a madurez fisiológica, peso de 100 semillas y rendimiento de grano de genotipos de frijol negro evaluados en dos localidades de Veracruz y una en Chiapas. Ciclo otoño-invierno 2013-2014.**

FV	GL	La Candelaria, Veracruz	CEIXTA, Veracruz	CECECH, Chiapas
Días a floración media				
Tratamientos	12	32.363281 **	13.324219 **	8.564453 **
Bloques	2	0.027344	0.691406	3.873047
Error	24	0.414388	1.414876	2.288249
Total	38			
CV (%)		1.70	3.00	4.62
Días a madurez fisiológica				
Tratamientos	12	26.195313 **	4.076823 **	15.635417 **
Bloques	2	0.101563	2.484375	4.023438
Error	24	3.242188	0.904297	2.054036
Total	38			
CV (%)		2.6	1.18	2.12
Peso de 100 semillas				
Tratamientos	12	29.8804 **	43.2799 **	7.9188 **
Bloques	2	0.0254	3.3193	7.8721
Error	24	0.6367	2.5074	1.7329
Total	38			
CV (%)		3.51	6.54	7.65
Rendimiento de grano				
Tratamientos	12	82329.33 **	97751.33 **	11772.08 ns
Bloques	2	5542.00	13418.00	6462.00
Error	24	17784.83	27835.66	7389.96
Total	38			
CV (%)		13.38	13.86	15.01

los tres ambientes de evaluación, las líneas SEN-70, SEN-56 y SCN-2, presentaron un número de días a la madurez significativamente inferior, a los del resto de los genotipos, incluidas las variedades Negro Tacaná y Negro Jamapa (Cuadro 4).

La línea SCN-2 fue el genotipo que se ubicó en el grupo con mayor peso de 100 semillas, tanto en las localidades en que hubo ocurrencia de sequía, como sin estrés de humedad, es decir, en los tres ambientes de evaluación, con un valor estadísticamente superior al de las variedades comerciales Negro Tacaná y Negro Jamapa (Cuadro 5). Esta característica también varió significativamente entre ambientes y genotipos ( $P \leq 0.01$ ). En el factor genotipo, la línea SCN-2 obtuvo en promedio un peso mayor a 27 g por 100 semillas, significativamente superior a los obtenidos por el resto

de los genotipos, los cuales registraron pesos menores a 25 g; en el factor ambiente en promedio el mayor peso se obtuvo en el CEIXTA, con diferencia significativa, respecto a los sitios con presencia de sequía terminal (Cuadro 5).

La presencia de estrés hídrico se asoció con menor rendimiento de grano, encontrándose que ambos sitios con sequía presentaron los menores promedios de rendimiento de grano, con diferencia significativa respecto a la localidad CEIXTA (Cuadro 6). Siete líneas sobresalieron por su alto rendimiento promedio, el cual fue significativamente superior al del resto de los genotipos, incluidas las variedades Negro Tacaná y Negro Jamapa (testigos regionales); de este grupo destaca la línea SEN-70, la cual mostró la mayor producción, tanto en los ambientes en que hubo

**Cuadro 3. Días a floración media de genotipos de frijol negro evaluados en dos localidades de Veracruz y uno en Chiapas. Ciclo otoño-invierno 2013-2014.**

Genotipo	La Candelaria, Veracruz	CEIXTA, Veracruz	CECECH, Chiapas	Promedio
NGO 17-99	40.3 *	40.3 *	32.7 *	37.8*
ELS 9-27	40.0 *	41.3 *	31.7	37.7*
Jamapa Plus	40.0 *	41.0 *	34.0 *	38.3*
NGO 07022	40.0 *	40.3 *	33.7 *	38.0*
CIAT-103-25	40.0 *	39.7 *	34.0 *	37.9*
SEQ-344-21	40.0 *	41.7 *	35.0 *	38.9*
SCN-2	33.0	37.7	31.3	34.0
SEN-56	33.0	34.7	29.3	32.3
SEN-70	33.0	39.0	31.7	34.6
NCB-229	33.7	36.7	31.3	33.9
X02-33-153	39.0	40.7 *	32.0	37.2*
N. Tacaná	40.3 *	41.7 *	34.0 *	38.7*
N. Jamapa	40.0 *	40.3 *	35.0 *	38.4*
Promedio	37.9	39.6 *	32.7	36.7
DMS (0.05)	1.085	2.005	2.549	2.202

\* Genotipos estadísticamente superiores, según la Diferencia Mínima Significativa (0.05).

**Cuadro 4. Días a madurez fisiológica de genotipos de frijol negro evaluados en dos ambientes de Veracruz y uno en Chiapas. Ciclo otoño-invierno 2013-2014.**

Genotipo	La Candelaria, Veracruz	CEIXTA, Veracruz	CECECH, Chiapas	Promedio
NGO 17-99	71.7 *	81.3 *	70.3 *	74.4*
ELS 9-27	68.7 *	82.0 *	69.0 *	73.2*
Jamapa Plus	70.0 *	81.7 *	69.3 *	73.7*
NGO 07022	71.7 *	81.0 *	66.0	72.9*
CIAT-103-25	69.7 *	81.0 *	69.3 *	73.3*
SEQ-344-21	70.0 *	81.3 *	69.7 *	73.7*
SCN-2	67.0	80.7 *	64.0	70.6
SEN-56	63.7	78.0	65.0	68.9
SEN-70	63.0	79.0	66.0	69.3
NCB-229	71.7 *	80.7 *	64.7	72.3*
X02-33-153	69.7 *	81.3 *	66.7	72.6*
N. Tacaná	71.7 *	81.7 *	69.7 *	74.3*
N. Jamapa	71.3 *	82.0 *	69.7 *	74.3*
Promedio	69.2	80.9 *	67.6	72.6
DMS (0.05)	3.034	1.603	2.415	2.653

\* Genotipos estadísticamente superiores, según la Diferencia Mínima Significativa (0.05).

ocurrencia de sequía terminal, como en la localidad de CEIXTA, en donde no hubo sequía (Cuadro 6).

De acuerdo a los resultados de balance de humedad aprovechable de suelo, en dos de los tres ambientes de evaluación, hubo sequía, por lo que puede aseverarse

que los genotipos de frijol evaluados en La Candelaria y en el CECECH, sufrieron estrés hídrico (Allen *et al.*, 2006), condiciones favorables, para identificar genotipos con mejor respuesta en rendimiento de grano bajo condiciones de déficit de humedad, mientras



**Cuadro 5. Peso de 100 semillas (g) de genotipos de frijol negro evaluados en dos ambientes de Veracruz y uno en Chiapas. Ciclo otoño-invierno de 2013-14.**

Genotipo	La Candelaria, Veracruz	CEIXTA, Veracruz	CECECH, Chiapas	Promedio
NGO 17-99	23.3	24.0	17.0	21.5
ELS 9-27	19.7	20.4	17.3	19.1
Jamapa Plus	19.7	22.1	15.7	19.1
NGO 07022	21.7	22.1	17.0	20.3
CIAT-103-25	22.0	23.7	16.3	20.7
SEQ-344-21	20.3	19.8	16.0	18.7
SCN-2	29.7 *	33.2 *	20.3 *	27.7 *
SEN-56	26.0	27.0	19.3 *	24.1
SEN-70	24.0	27.4	19.7 *	23.7
NCB-229	27.0	28.3	17.7	24.3
X02-33-153	20.3	22.5	15.3	19.4
N. Tacaná	21.7	21.0	16.0	19.6
N. Jamapa	20.0	23.2	16.0	19.7
Promedio	22.7	24.2 *	17.2	21.4
DMS (0.05)	1.345	2.669	2.218	2.477

\* Genotipos estadísticamente superiores, según la Diferencia Mínima Significativa (0.05).

**Cuadro 6. Rendimiento de grano (kg ha<sup>-1</sup>) de genotipos de frijol negro evaluados en dos ambientes de Veracruz y uno en Chiapas. Ciclo otoño-invierno 2013-2014.**

Genotipo	La Candelaria, Veracruz	CEIXTA, Veracruz	CECECH, Chiapas	Promedio
NGO 17-99	1141.3 *	1279.3 *	622.7	1014.4 *
ELS 9-27	719.7	998.0	510.7	742.8
Jamapa Plus	1218.3 *	1263.0 *	530.7	1004.0 *
NGO 07022	1034.0 *	1329.3 *	624.0	995.8 *
CIAT-103-25	998.0	840.0	501.3	779.8
SEQ-344-21	1009.3	885.7	613.3	836.1
SCN-2	1043.7 *	1271.3 *	625.3	980.1 *
SEN-56	1057.3 *	1262.0 *	606.7	975.3 *
SEN-70	1253.3 *	1427.3 *	686.7	1122.4 *
NCB-229	840.7	1241.3 *	568.0	883.3
X02-33-153	1044.3 *	1337.0 *	538.7	973.3 *
N. Tacaná	747.0	1199.7 *	468.0	804.9
N. Jamapa	854.3	1318.0 *	549.3	907.2
Promedio	997.0	1204.0 *	572.7	924.6
DMS (0.05)	224.744	281.167	ns	198.502

\* Genotipos estadísticamente superiores, según la Diferencia Mínima Significativa (0.05).

que, en el CEIXTA, las condiciones de humedad que prevalecieron durante el ciclo del cultivo, no permitieron el estrés hídrico de los genotipos de frijol.

La significancia estadística entre tratamientos para

días a floración media, a madurez fisiológica y peso de 100 semillas, se debe principalmente a la diferencia genética y a su respuesta a los diferentes ambientes de prueba. Respecto a la significancia en el rendimiento

de grano, se infiere que en las dos localidades con diferencia significativa, los genotipos mostraron diferente potencial productivo, bajo las condiciones de humedad residual en que fueron evaluados.

Generalmente, la precocidad en la floración se asocia a un adelanto en los días a madurez fisiológica de los genotipos (Acosta-Díaz *et al.*, 2004; Manjeru *et al.*, 2007), premisa que se cumplió en forma parcial en este estudio. La mayoría de los genotipos que mostraron precocidad a la floración, también lo hicieron a la madurez fisiológica, tanto en las localidades en que hubo ocurrencia de sequía, como en el CEIXTA en donde no hubo estrés por humedad. En esta última localidad, las líneas mostraron menor precocidad y sólo SEN-70 y SEN-56 alcanzaron su madurez en un tiempo significativamente menor. De acuerdo con Acosta-Díaz *et al.* (2011), el criterio de la precocidad es una característica de escape importante para la selección de genotipos tolerantes a sequía.

La madurez fisiológica más tardía en la localidad CEIXTA, se debió principalmente, a que se tuvieron mejores condiciones de humedad durante todo el ciclo del cultivo, que favorecieron un mayor tiempo a la madurez fisiológica (Ramírez-Vallejo y Kelly, 1998). A su vez, en el CECECH y en La Candelaria, el menor tiempo a madurez fue debido a las condiciones de deficiencia de humedad presentadas, principalmente después de la etapa de floración del cultivo, lo que provocó adelanto en la madurez fisiológica, que de acuerdo con Rosales-Serna *et al.* (2001), el aceleramiento de la madurez ocurre cuando la sequía se prolonga durante la fase reproductiva y no se presentan condiciones favorables para la recuperación.

La precocidad de las líneas SEN-70, SEN-56 y SCN-2 se ha documentado en otros estudios de evaluación realizados en el sureste de México (Tosquy-Valle *et al.*, 2014), la cual es muy deseable, debido a que las plantas de frijol pueden escapar a la falta de humedad (Acosta-Díaz *et al.*, 2004), ocasionada por la ocurrencia de sequía terminal, que reduce el rendimiento de frijol, en las siembras comerciales de humedad residual de los estados de Veracruz y Chiapas (López-Salinas *et al.*, 2008).

El mayor peso de 100 semillas de la línea SCN-2, en los tres ambientes de evaluación, obedece principalmente, a que este material es de grano de mayor tamaño, que el tipo tropical local, característica que está relacionada con un mayor peso de semilla

(Tosquy-Valle *et al.*, 2014). Entre ambientes, el mayor peso de 100 semillas observado en el CEIXTA fue debido principalmente a la mayor humedad que prevaleció durante el ciclo de desarrollo del cultivo, la cual favoreció una mayor capacidad de las plantas de frijol de translocar asimilados hacia el grano (Rao, 2001). En el factor genotipo, el peso promedio de 100 semillas mayor a 27 g de SCN-2, indica que el grano de esta línea es considerado como de tamaño medio y en el sureste de México, la mayor demanda comercial de frijol negro, es de grano de tamaño pequeño, con un peso menor a 25 g por 100 semillas (Rosales-Serna *et al.*, 2003; López-Salinas *et al.*, 2012; SNICS, 2013).

El mayor promedio en rendimiento de grano obtenido en la localidad de CEIXTA, se debió principalmente a una mayor y mejor distribución de la lluvia durante el ciclo del cultivo, principalmente de las etapas de floración al llenado de vainas, en donde el cultivo recibió más de 90 mm de precipitación pluvial, suficientes para obtener buen llenado del grano (Ruíz *et al.*, 1999; Martínez *et al.*, 2008) y por consiguiente una mayor humedad aprovechable del suelo para las plantas de frijol (Cuadro 1 y Figura 1); por el contrario, el menor rendimiento promedio observado en el CECECH, fue debido principalmente a dos factores: 1) A que el suelo tuvo menor capacidad de retención de humedad, lo cual implicó una humedad aprovechable baja para el cultivo (Figura 1) y 2) A la ocurrencia de sequía durante la etapa reproductiva del cultivo, lo que afectó adversamente el rendimiento de grano (Ruíz *et al.*, 1999; Acosta-Díaz *et al.*, 2009). Aunque en la Candelaria se tuvo menor precipitación pluvial que en el CECECH, el rendimiento fue mayor, debido principalmente a una mayor capacidad de retención de humedad en el suelo (Figura 1).

En el factor genotipo se identificó un grupo de líneas con mayor potencial de rendimiento que las variedades comerciales Negro Tacaná y Negro Jamapa, bajo condiciones de humedad residual en los estados de Veracruz y Chiapas. La mayor producción mostrada en la línea SEN-70, principalmente obedece, a sus características genéticas intrínsecas, de precocidad, alto rendimiento y tolerancia al estrés por humedad (Tosquy-Valle *et al.*, 2014). Cabe destacar, que el grano de esta línea, reúne las características de tipo de frijol negro, opaco y de tamaño pequeño, que demandan los consumidores de esta región (Rosales-Serna *et al.*, 2003; López-Salinas *et al.*, 2012).

## CONCLUSIONES

SEN-70, NGO-17-99 y Jamapa Plus, junto con otras cuatro líneas, mostraron una producción promedio significativamente mayor que el de las variedades comerciales Negro Tacaná y Negro Jamapa, bajo condiciones de humedad residual. La línea SEN-70 fue la de mayor rendimiento con y sin estrés por humedad y su precocidad le permitió escapar a la sequía terminal.

## LITERATURA CITADA

- Acosta, J. A., E. Acosta, S. Padilla-Ramírez, Ma. A. Goytia, R. Rosales y E. López. 1999. Mejoramiento de la resistencia a la sequía del frijol común en México. *Agron. Mesoam.* 10: 83-90.
- Acosta-Díaz, E., C. Trejo-López, L. M. Ruíz-Posadas, J. S. Padilla-Ramírez y J. A. Acosta-Gallegos. 2004. Adaptación del frijol a sequía en la etapa reproductiva. *Terra Latinoamericana* 22: 49-58.
- Acosta-Díaz, E., I. Hernández-Torres, R. Rodríguez-Guerra, J. A. Acosta-Gallegos, J. Pedroza-Flores, M. D. Amador-Ramírez y J. S. Padilla-Ramírez. 2011. Efecto de la sequía en la producción de biomasa y grano de frijol. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2: 249-263.
- Acosta-Díaz, E., J. A. Acosta-Gallegos, C. Trejo-López, J. S. Padilla-Ramírez, and M. D. Amador-Ramírez. 2009. Adaptation traits in dry bean cultivars grown under drought stress. *Agric. Téc. Méx.* 35: 416-425.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO. Riego y Drenaje No. 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. ISBN 92-5-304219-2.
- Díaz-Padilla, G., J. A. Ruíz-Corral, M. A. Cano-García, V. Serrano-Altamirano y G. Medina-García. 2006. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Veracruz (período 1961-2003). Libro Técnico Núm. 13. SAGARPA. INIFAP. CIRGOC. Campo Experimental Cotaxtla. Veracruz, México. ISBN: 970-43-0020-4.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. 2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 17 de octubre de 2000. México, D. F.
- Emam, Y., A. Shekoofa, F. Salehi, and A. H. Jalali. 2010. Water stress effects on two common bean cultivars with contrasting growth habits. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 9: 495-499.
- Esquivel, V. A., O. Cano y E. López. 1997. Control químico de malezas en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en el estado de Veracruz. *Agron. Mesoam.* 8: 53-58.
- Fernández, F., P. Geps y M. López. 1985. Etapas de desarrollo en la planta de frijol. pp. 61-78. *In:* M. López, F. Fernández y A. van Schoonhoven. (eds.). Frijol: Investigación y producción: Referencia de los cursos de capacitación sobre frijol dictados por el Centro Internacional de Agricultura Tropical. PNUD-CIAT. Cali, Colombia.
- Frahm, M., J. C. Rosas, N. Mayek-Pérez, E. López-Salinas, J. A. Acosta-Gallegos y J. D. Kelly. 2003. Resistencia a sequía terminal en frijol negro tropical. *Agron. Mesoam.* 14: 143-150.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- Hillel, D. 1980. Applications of soil physics. Academic Press. New York, NY, USA.
- López-Salinas E., O. H. Tosquy-Valle, F. J. Ugalde-Acosta y J. A. Acosta-Gallegos. 2008. Rendimiento y tolerancia a sequía de genotipos de frijol negro en el estado de Veracruz. *Rev. Fitotec. Mex.* 31: 35-39.
- López-Salinas, E., O. H. Tosquy-Valle, J. A. Acosta-Gallegos, B. Villar-Sánchez, and F. J. Ugalde-Acosta. 2011. Drought resistance of tropical dry black bean lines and cultivars. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 14: 749-755.
- López-Salinas, E., O. H. Tosquy-Valle, Y. Jiménez-Hernández, R. A. Salinas-Pérez, B. Villar-Sánchez y J. A. Acosta-Gallegos. 2012. Rendimiento y adaptación de la variedad de frijol Negro Comapa en dos regiones de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 35: 309-315.
- Manjeru, P., T. Madanzi, B. Makeredza, A. Nciizah, and M. Sithole. 2007. Effect of water stress at different growth stages on components and grain yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *African Crop Sci. Conf. Proc.* 8: 299-303.
- Martínez-Gamiño, M. A., E. S. Osuna-Ceja, J. S. Padilla-Ramírez, J. A. Acosta-Gallegos y C. Loredó-Osti. 2008. Tecnología para la producción de frijol en el norte centro de México. Libro Técnico No. 4. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Noreste. Campo Experimental San Luis. San Luis Potosí, México. ISBN: 978-607-425-030-5.
- Molina, J. C., V. Moda-Cirino, N. da Silva Fonseca-Júnior, R. Teixeira de Faria, and D. Destro. 2001. Response of common bean cultivars and lines to water stress. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* 1: 363-372.
- Ramírez-Vallejo, P. and J. D. Kelly. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica* 99: 127-136.
- Rao, I. M. 2001. Role of physiology in improving crop adaptation to abiotic stresses in the tropics: The case of common bean and tropical forages. pp. 583-613. *In:* M. Pessarakli. (ed.). Handbook of plant and crop physiology. Marcel Dekker Inc. New York, NY, USA.
- Rosales-Serna, R., J. A. Acosta-Gallegos, R. P. Durán-Durán, H. Guillén-Andrade, P. Pérez-Herrera, G. Esquivel-Esquivel y J. S. Muruaga-Martínez. 2003. Diversidad genética del germoplasma mejorado de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México. *Agric. Téc. Méx.* 29: 11-24.
- Rosales-Serna, R., R. Ochoa-Márquez y J. A. Acosta-Gallegos. 2001. Fenología y rendimiento del frijol en el altiplano de México y su respuesta al fotoperíodo. *Agrociencia* 35: 513-523.
- Ruíz-Corral, J. A., G. Medina G., I. J. González A., C. Ortiz T., H. E. Flores L., R. A. Martínez P. y K. F. Byerly M. 1999. Requerimientos agroecológicos de los cultivos. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP-CIRPAC. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jal., México.
- SAS Institute. 1999. SAS/STAT user's guide. Versión 8.0. SAS Institute. Cary, NC, USA.

- Serrano-Altamirano, V., G. Díaz-Padilla, A. López-Luna, M. A. Cano-García, A. D. Báez-González y E. R. Garrido-Ramírez. 2006. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Chiapas (período 1961-2003). Libro técnico Núm. 1. INIFAP, SAGARPA. CIRPAS. Ocozocoautla, Chis., México.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2014. Producción agropecuaria. Producción anual. Cierre de la producción agrícola por estado. Anuario estadístico de la producción agrícola. SAGARPA. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>. (Consulta: junio 4, 2014).
- SNICS (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas). 2013. Guía técnica para la descripción varietal. Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). SAGARPA, SNICS. Tlalnepantla, Edo. de Méx., México.
- Tosquy-Valle, O. H., E. López-Salinas, N. Francisco-Nicolás, J. A. Acosta-Gallegos y B. Villar-Sánchez. 2014. Genotipos de frijol negro opaco resistentes a sequía terminal. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5: 1205-1217.



# Evapotranspiración del cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en la costa de Hermosillo, Sonora, México

## *Evapotranspiration measurement in watermelon (Citrullus lanatus) on the Costa de Hermosillo, Sonora, Mexico*

Leonardo Román Román<sup>1</sup>, Tomás Díaz Valdés<sup>1</sup>, Jesús Enrique López Avendaño<sup>1</sup>, Christopher Watts<sup>2</sup>, Fidencio Cruz Bautista<sup>2</sup>, Julio Rodríguez Casas<sup>2</sup> y Julio Cesar Rodríguez<sup>2‡</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa. Km 17.5, Carretera Culiacán-El Dorado. 80000 Culiacán, Sinaloa, México.

<sup>2</sup> Departamento de Agricultura y Ganadería. Universidad de Sonora. Km 20.5 Carretera Hermosillo-Bahía Kino. 83000 Hermosillo, Sonora, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (jcrodr@guayacan.uson.mx)

### RESUMEN

La sandía (*Citrullus lanatus*) es una hortaliza que para su manejo demanda una mayor necesidad de agua; sin embargo no existen estudios que muestren las cantidades utilizadas de agua con cierta precisión y menos que utilicen técnicas como la covarianza de vórtices para medir la evapotranspiración (ET), debido al alto costo de la instrumentación. El objetivo de este estudio fue medir la ET en sandía (*Citrullus lanatus*) para una región árida en la Costa de Hermosillo Sonora (29° 00' N y 111° 08' O). El experimento se llevó a cabo durante los meses de agosto a Noviembre de 2014. Se utilizó la técnica de covarianza de vórtices para medir ET y se empleó la ecuación Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>). El predio constaba de un sistema de riego por goteo, en el cual se aplicaron 166.1 mm de agua y tuvo una aportación por precipitación de 291.5 mm. La ET fue de 214.4 mm para todo el ciclo del cultivo, mientras que la ET<sub>o</sub> fue de 498.3 mm. Se observaron valores de K<sub>c</sub> de 0.15, 0.65 y 0.35 para etapa inicial, intermedia y final del cultivo respectivamente.

**Palabras claves:** *coeficiente de cultivo, covarianza de vórtices, región árida.*

### SUMMARY

Watermelon (*Citrullus lanatus*) is a fruit that demands a great amount of water. However, there are no studies that show precise quantities of water used nor are there studies that use techniques, such as

covariance of vortices, to measure evapotranspiration (ET) due to the high cost of instrumentation. The aim of this study was to estimate ET in watermelon in an arid region. The experiment was carried out on the coast of Hermosillo, Mexico (29° 00' north and 111° 14 west) during the months from August to November 2014. The Eddy Covariance technique was used to measure actual ET, and the Penman-Monteith equation was used to determine the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>). The experimental plot consisted of a drip irrigation system where 166.1 mm were applied, and rainfall contributed 291.5 mm. The ET was 214.4 mm for the entire crop cycle, while ET<sub>o</sub> was 498.3 mm. K<sub>c</sub> values of 0.15, 0.65 and 0.35 were estimated for early stage, mid- and end of season respectively.

**Index words:** *coefficient of cultivation, covariance of vortices, arid region.*

### INTRODUCCIÓN

En la gestión de recursos hídricos uno de los problemas más urgentes a atender es la competencia por agua entre usuarios urbanos, industriales, agropecuarios y ecológicos, especialmente en las zonas áridas y semiáridas, donde la disponibilidad de este recurso es limitado y las necesidades incrementan de manera continua (Bittelli, 2010; Soulis *et al.*, 2015). A nivel global el agua utilizada por la agricultura es entre el 70 y 90%, con una eficiencia de uso de alrededor del 50% (Hamdy *et al.*, 2003; Berrittella *et al.*, 2007).

En México ocurre algo similar, la agricultura es el principal usuario del agua y consume alrededor

#### Cita recomendada:

Román Román, L., T. Díaz Valdés, J. E. López Avendaño, C. Watts, F. Cruz Bautista, J. Rodríguez Casas y J. C. Rodríguez. 2017. Evapotranspiración del cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en la costa de Hermosillo, Sonora, México. *Terra Latinoamericana* 35: 41-49.

Recibido: junio de 2016. Aceptado: noviembre de 2016.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 35: 41-49.

del 77%, de la cual el 66% proviene de fuentes superficiales (CONAGUA, 2006). Sin embargo, este porcentaje varía de acuerdo a la región y, en el caso de la costa de Hermosillo Sonora ubicado en una región árida, el agua es escasa, la fuente para la agricultura es agua subterránea en un porcentaje superior al 90% (CONAGUA, 2013). La sandía (*Citrullus lanatus*), es una hortaliza importante para las zonas áridas y semiáridas en el mundo (Erdem y Yuksel, 2003; Shukla *et al.*, 2014). En México, los reportes de SAGARPA indican que se cosecharon 23 527 ha de diferentes tipos de sandía, con un rendimiento promedio de 27.24 Mg ha<sup>-1</sup>, de acuerdo a datos disponibles en el 2013 (SIAP, 2014). Los principales estados productores son Chihuahua, Jalisco y Sonora, que acumulan alrededor del 50% de la producción nacional y durante los últimos 10 años, el estado de Sonora ha incrementado su superficie de siembra de 3245 a 6806 ha, ocupando actualmente el primer lugar a nivel nacional (SIAP, 2014). La explotación del cultivo de sandía es importante en la región de la costa de Hermosillo por la mano de obra que genera y su rentabilidad; sin embargo, el problema de la escasez de agua hace prioritario encaminar esfuerzos hacia una mayor eficiencia en el aprovechamiento de este recurso, toda vez que las restricciones en su disponibilidad son cada vez mayores. Por lo anterior, existe la necesidad de generar información referente al uso eficiente del agua de riego que permita reducir la sobreexplotación de los mantos freáticos e incrementar la productividad agrícola.

Una forma de cuantificar la demanda de agua de los cultivos, producto de los cambios atmosféricos, es mediante la estimación o medición de la evapotranspiración (ET). Uno de los métodos más aceptados para estimar la evapotranspiración es el que depende de datos climáticos y se basa en fórmulas teórico-físicas (Allen *et al.*, 1989; 1998). Otro es el basado en flujos turbulentos de masas de aire verticales sobre las superficies, técnica conocida como varianza de vórtices (Baldocchi, 2003). El conocimiento de la evapotranspiración y coeficiente de cultivo (Kc) es fundamental para planificar y gestionar el riego de cualquier cultivo (Bastos *et al.*, 2012). Los principales factores que afectan la evapotranspiración son las variables climáticas, características del cultivo, factores del suelo y manejo (Allen *et al.*, 1998).

La medición de la evapotranspiración en hortalizas es poco común, especialmente en el cultivo de sandía,

debido a que el equipo que se utiliza para estimar o medir la ET es costoso. Sin embargo, esta hortaliza es uno de los cultivos que más volumen de agua necesita para su óptimo desarrollo por ello el interés y necesidad de conocer dicha demanda.

El objetivo de la presente investigación fue determinar la demanda hídrica del cultivo de sandía en la costa de Hermosillo, una zona árida, donde el agua utilizada es agua subterránea con un alto costo económico y energético para su extracción. Lo que brinda una oportunidad para mostrar al usuario la demanda real de agua del cultivo, lo que podría incrementar el uso eficiente y ahorro de agua, contribuyendo a mejorar la condición del acuífero sobreexplotado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

El experimento se realizó en el predio el Águila, localizado geográficamente a 29° 00' N y 111 08' O en la Costa de Hermosillo, (Figura 1). En esta región el clima es desértico, caracterizado por una precipitación media anual de 321 mm, evapotranspiración potencial de 2704 mm, temperatura media anual de 23.1 °C, con temperaturas extremas en inviernos y verano de -3.5 °C y 49 °C, respectivamente (CONAGUA, 2014).

### Sitio Experimental

El área experimental se localiza cerca de las márgenes del río Sonora, en suelos con características predominante francas, con 49.08% de arena, 32.12% de limo y 18.8% de arcilla; con una capacidad de campo (CC) 23.7%, punto de marchitez permanente (PMP) 2% y saturación (S) 40.8%, v/v. En ella se estableció el cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) mini triploide, variedad Extazy (Hazera Genetics), en una superficie de 60 ha. El cultivo se trasplantó en camas cubiertas con plástico de color negro, entre el 8 y 15 de agosto de 2014, con distancia entre cama de 2 m y una longitud de 150 m, con una densidad de 12 000 plantas por ha. La cosecha de los frutos inicio el 9 de octubre y finalizó el 4 de noviembre. El sistema de riego utilizado fue por goteo, con una distancia entre goteros de 0.40 m y un gasto de 1.29 lph; la frecuencia y las horas de aplicación del riego, fueron determinadas por el productor, de acuerdo a su experiencia en el manejo de la sandía.

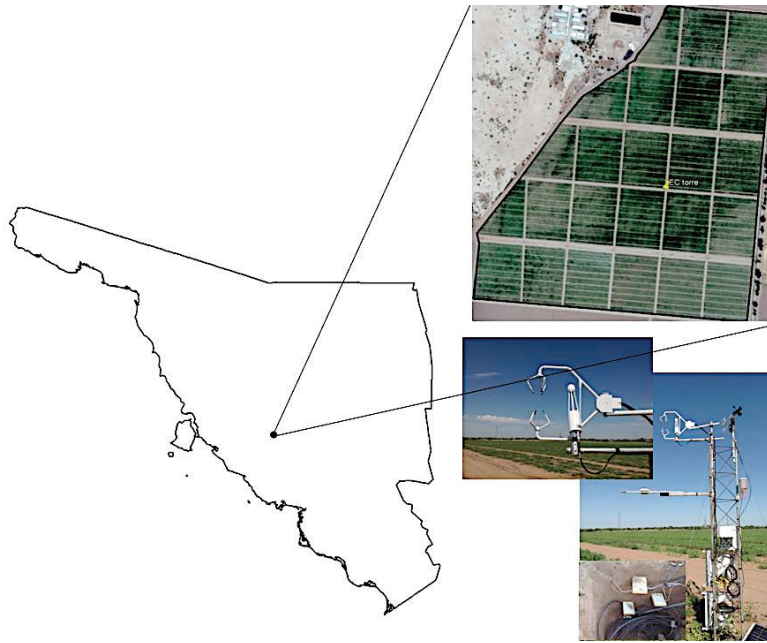


Figura 1. Área de estudio y equipo instalado, predio el Águila, Costa de Hermosillo, México.

La precipitación efectiva (PE), fue calculada utilizando la aproximación de Zierold modificada para México por Palacios (1971), cambiando el lapso de medición de decena a cada siete días.

### Mediciones Micrometeorológicas, Meteorológicas y Procesamiento de Datos

En el centro del sitio experimental sembrado con sandía fue instalada una torre con sensores para medir las componentes de la ecuación de balance de energía, como son la radiación neta ( $R_n$ ), flujo de calor latente (LE), flujo de calor sensible (H) y flujo de calor de suelo (G). Se hicieron otras mediciones meteorológicas como la temperatura y humedad en el aire, velocidad y dirección de vientos, precipitación, presión barométrica, radiación solar y albedo; y variable del como es la tensión, humedad y temperatura (Cuadro 1).

Previo a la instalación de la torre con sensores (instrumentación) se realizó un análisis de la incidencia de la dirección de vientos buscando que fuera en el mismo sentido en que quedaría colocado el anemómetro sónico y así minimizar la modificación de la velocidad por efectos mecánicos (Figura 2). Los flujos turbulentos (H y LE) fueron medidos con la técnica de covarianza de vórtices o Eddy Covariance (EC) (Baldocchi, 2003).

Todos los sensores fueron conectados a un sistema de adquisición de datos CR5000 (Campbell,

SCI), los datos colectados se almacenaron en una tarjeta Compact flashcard de 2 GB de capacidad. Las variables medidas por los sensores para determinar los flujos turbulentos fueron muestreados a 10 Hz y el resto de las variables medidas con los otros sensores se muestrearon a 0.1 Hz. Los datos crudos se procesaron con el programa EdyPro versión 4.1 (desarrollado por LICOR) para obtener promedios cada 30 min. (Burba, 2013). Se realizaron correcciones y particiones necesarias de acuerdo a las recomendaciones de Burba (2013) usando el sitio:

[http://www.bgcjena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/output/20141205021959/results\\_ext.php](http://www.bgcjena.mpg.de/~MDIwork/eddyproc/output/20141205021959/results_ext.php).

Considerando que la falta de cierre en la ecuación de balance de energía fue del 10-20%, no fue necesario aplicar la corrección de la relación de Bowen sugerida (Twine *et al.*, 2000), para la obtención de los flujos turbulentos (Evapotranspiración, LE y calor sensible, H). Los datos meteorológicos y de suelo fueron promediados a 30 min. Ambas series de datos se analizaron para obtener valores diarios.

### Agua en el Suelo

Se instalaron sensores de humedad, tensión y temperatura de suelo para evaluar su comportamiento durante el ciclo del cultivo (Cuadro 1). También se muestreó el suelo para la determinación de la humedad

**Cuadro 1. Sensores instalados en sandía, predio el Águila, Costa de Hermosillo, México.**

Sensor	Variable	Altura de ubicación del sensor m
Radiómetro neto, (Kipp and Zonen)	Radiación neta (MJ m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	2.00
Analizador gases LI7500 (LICOR)	Concentración de H <sub>2</sub> O y CO <sub>2</sub>	3.30
Anemómetro sónico, CSAT3	Velocidad de viento (x, y, z)	3.30
Albedómetro (Kipp and Zonen)	Radiación solar y albedo	2.00
Higrómetro, HMP50 (Vaisala)	Temperatura y humedad en aire	2.90
TDR CS616, (Campbell)	Humedad de suelo	- 0.10,-0.20, -0.30 y -0.60
Termómetro 107, Campbell)	Temperatura de suelo	- 0.10,-0.20, -0.30 y -0.60
SHP	Flujo de calor en el suelo	- 0.05 y -0.05
Tensiómetro (watermark)	Tensión del agua en el suelo	- 0.30 y -0.60
Anemómetro 5103(Young)	Velocidad y dirección de viento	3.40
Pluviómetro 525 (T. Electronics)	Lluvia	0.90
Adquisidor de datos CR5000		

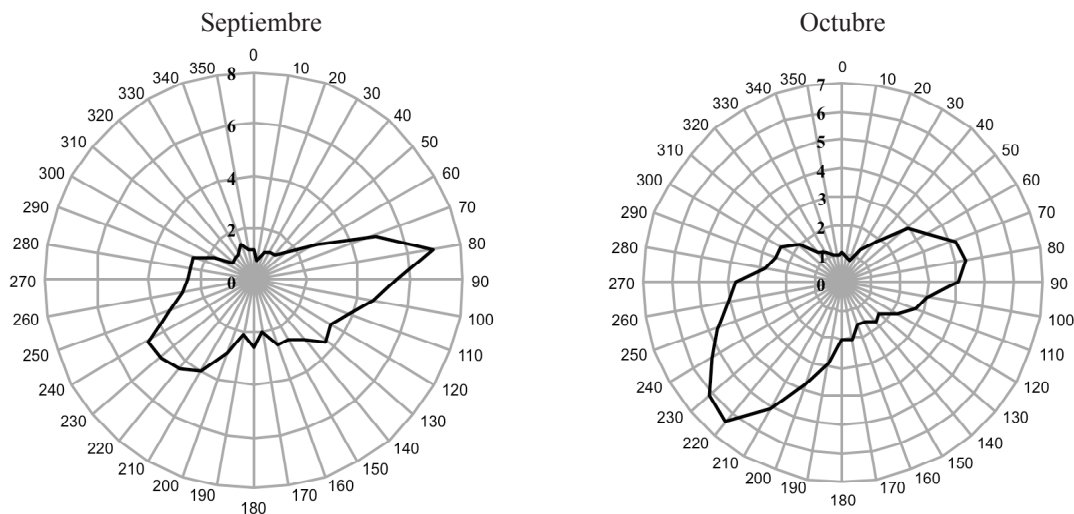
gravimétrica; y de esta manera, corregir los datos de los sensores de humedad, usando la densidad aparente con un valor de 1.5 g cm<sup>-3</sup>, previamente determinada en el sitio a la misma profundidad de colocación de los sensores. Al mismo tiempo fue obtenida la humedad volumétrica del suelo usando el sensor ML2 (Delta T), considerando que tiene un error del 1% (Delta T, 1999; Schmutz y Namikas, 2011). Para la obtención del contenido de agua en el suelo por gravimetría, se tomaron muestras de suelo en el bulbo de humedecimiento, y la determinación se hizo de acuerdo al método estándar, mediante el secado de la muestra a 105 °C por 24 h en horno de convección.

**Evapotranspiración y Coeficiente de Cultivo**

El cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) se realizó usando la ecuación de Penman-Monteith modificada por Allen *et al.* (1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{1}$$

donde: ET<sub>0</sub> evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>), R<sub>n</sub> radiación neta (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>), G flujo de calor del suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>), T es la temperatura



**Figura 2. Rosa de vientos, Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora.**



del aire promedio diario ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\Delta$  pendiente de la curva de presión a saturación a T ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $e_s$  presión de saturación del vapor a T ( $\text{kPa}$ ),  $e_a$  presión de vapor promedio diario ( $\text{kPa}$ ),  $u_2$  velocidad de viento promedio diario a 2 m de elevación ( $\text{m s}^{-1}$ ).

La determinación del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) se realizó con la ecuación de Doorenbos y Pruitt (1975):

$$K_c = K_{cb} * K_s + K_e = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (2)$$

donde:  $K_{cb}$  es la transpiración del cultivo,  $K_s$  estrés hídrico,  $K_e$  la evaporación del suelo, y  $ET_c$  es la evapotranspiración medida ( $\text{mm día}^{-1}$ ).

No se realizó corrección por estrés hídrico ( $K_s$ ,  $K_s=1$ ) considerando que el agua disponible como humedad de suelo para evapotranspirar fue menor al 50% de la diferencia de capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Asimismo, por las dificultades técnicas para medir la transpiración y la evaporación por separado, se consideró el  $K_c$  como el cociente entre  $ET_c$  y  $ET_o$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Variables Meteorológicas

La lluvia al inicio del ciclo fue de 195 mm, que representa en 67% del total de los 292 mm precipitados durante el ciclo del cultivo, lo que dificultó y retrasó

el periodo de trasplante y propició la aparición de malezas de hoja ancha. De este total de lluvia, la PE fue de 149 mm, teniendo su mayor impacto en la evaporación del suelo entre las semanas cinco y seis DDT. Durante el trasplante ocurrieron 3 de los 9 eventos con lluvia superior a 5 mm. En el caso de la temperatura del aire, esta presentó poca variación durante los primeros días después de trasplante debido a la importante presencia de precipitación y alta humedad relativa que se tuvo en el mes de agosto. A principios de septiembre la temperatura alcanzó sus máximos valores para posteriormente disminuir y presentar menores variaciones hasta finalizar el ciclo del cultivo. La humedad relativa presentó sus valores máximos durante y después de las lluvias, con valores superiores al 70%. Asimismo, los mínimos valores de esta variable se presentaron entre estos eventos, pero con tendencia a disminuir durante el resto del periodo, alcanzando valores inferiores al 40% en noviembre (Figura 3). La radiación solar (R. solar) tiende a decrecer desde la plantación hasta el fin de experimento, con una marcada disminución durante los días nublados, excepto cuando la precipitación fue vespertina o nocturna, como ocurre frecuentemente en la región de monzón mexicano (Douglas *et al.*, 1993).

### Riego, Humedad y Tensión del Agua en el Suelo

El monitoreo del contenido de la humedad de suelo ( $\theta_v$ ) inició a los 17 días después del trasplante (DDT). En la Figura 4 se observa que durante las dos primeras

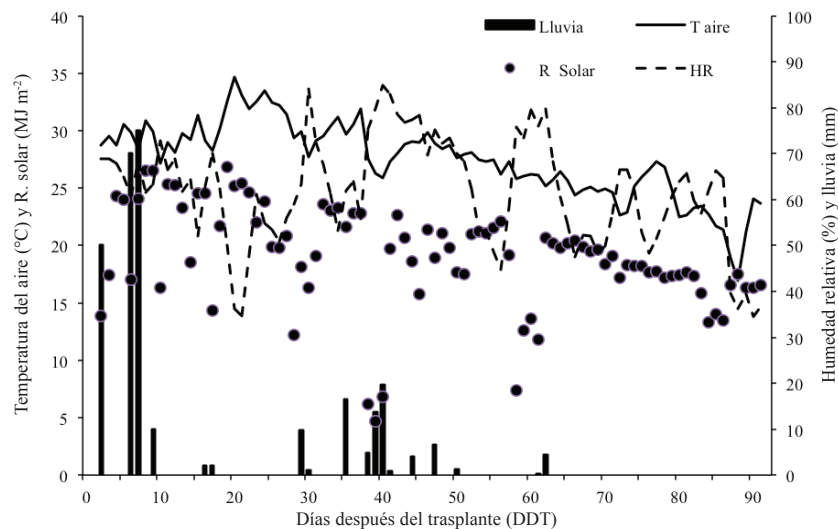


Figura 3. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y precipitación durante el ciclo de cultivo de sandía, en 2014.

semanas después del trasplante no se aplicó agua debido al aporte por precipitación. También se observa que para el caso de la  $\theta_v$  a -30 cm, ésta se mantuvo por encima de la capacidad de campo (CC) la mayor parte del ciclo del cultivo de sandía; mientras que a -60 cm la  $\theta_v$  inició por debajo de CC, para incrementarse hasta  $0.24 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3}$  previo a la cosecha, la cual inició a los 60 DDT, para disminuir hasta valores cercanos a  $0.19 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3}$  al final del ciclo del cultivo. Estos valores de humedad del suelo son superiores a los observados por Ertek *et al.* (2006) para cucurbitáceas en suelo franco de características similares a este experimento. Durante la fase de desarrollo de frutos se observó una importante disminución en el contenido de humedad en el suelo, presentando valores de  $0.15 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3}$  a -30 cm y de  $0.17 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3}$  a -60 cm; los cuales están cerca del 50% de la humedad aprovechable (HA). González *et al.* (2009), mencionan que una práctica común entre los productores, es reducir el volumen de agua previo a la cosecha y en otras etapas fenológicas; sin embargo, Erdem y Yuksel (2003), mencionan que una reducción en el volumen de agua aplicada, principalmente en las etapas sensible reduce el rendimiento de la sandía. Miller *et al.* (2013, 2014) y Shulka *et al.* (2014) mostraron que con reducciones de la HA en un 15% y 33% obtuvieron los máximos rendimientos y en algunos casos hasta el 44% mayor que las reducciones de 50% en la HA. Previo a la cosecha la tensión de agua (Y) a -30 cm fue de -10 kPa, y a -30 kPa a -60 cm

de profundidad (Figura 4), tensiones que no producen estrés a la planta. Sin embargo, posterior a la primera cosecha la tensión comenzó a disminuir presentado dos eventos a -62 y -67 kPa (Figura 4) que pueden producir estrés. Estos valores en general se observan entre -30 y -10 kPa, los cuales son recomendables para sandía y valores hasta de -75 kPa producen disminución en la biomasa y el rendimiento (González *et al.*, 2009; Bastos *et al.*, 2012).

### Evapotranspiración Actual, Evapotranspiración de Referencia y Coeficiente de Cultivo

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), presentó valores entre los 8 y 10 mm día<sup>-1</sup> al inicio del ciclo, pero disminuyó a principios de noviembre con valores cercanos a los 3 mm día<sup>-1</sup> (Figura 5). Estos valores son similares a los observados por Rodríguez *et al.* (2010), los cuales son comunes en las zonas áridas calientes. Los decrementos ocurridos durante el periodo de estudio son ocasionados por días nublados o lluvias. La medición de la evapotranspiración (ET) inició al igual que otras mediciones dos semanas después del trasplante. La ET presenta valores de 1 mm día<sup>-1</sup> al inicio de las mediciones, similares a los obtenidos por Bastos *et al.* (2012) en etapas iniciales de desarrollo, para incrementarse hasta valores de 5.1 y 5 mm día<sup>-1</sup>, después de importantes eventos de lluvia, terminando el ciclo con valores superiores a 1 mm día<sup>-1</sup> (Figura 5).

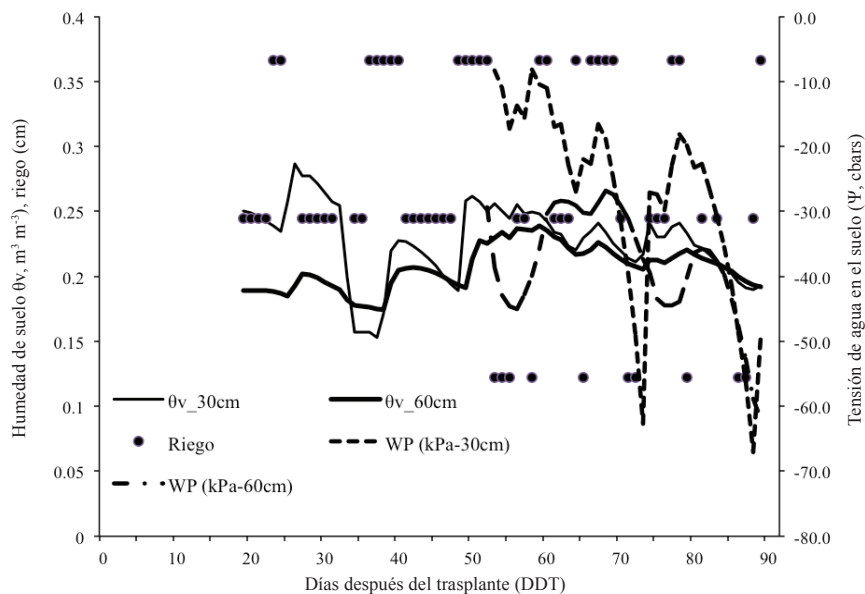
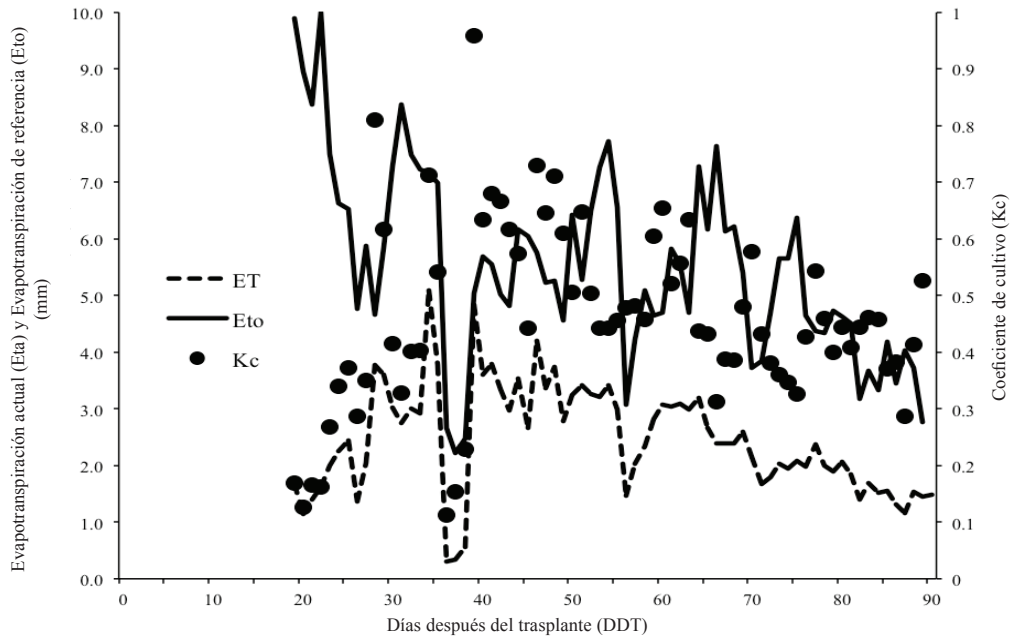


Figura 4. Dinámica de la humedad, tensión en el suelo y riego, en el cultivo de sandía, en 2014.



**Figura 5. Comportamiento de la evapotranspiración actual (ET), evapotranspiración de referencia (ETo) y coeficiente de cultivo (Kc) para la sandía, en 2014.**

Respecto a los valores del coeficiente de cultivo (Kc), a pesar de la existencia de pocos datos en su inicio, se observaron valores entre 0.10 y 0.20, los cuales son similares a los obtenidos por Miranda *et al.* (2004) y Bastos *et al.* (2012), pero después se incrementó hasta alrededor de 0.60 durante la etapa de desarrollo que se presenta entre los 20 a 40 DDT (Figura 5). Posteriormente durante la etapa intermedia (40-60, DDT) los valores varían entre 0.60 y 0.70, inferiores a los obtenidos por Miranda *et al.* (2004), Orgaz *et al.* (2005) y Bastos *et al.* (2012) que obtuvieron valores superiores a 1. Esta variación se puede atribuir al tipo de variedad cultivada, cobertura y estación del año. La etapa final fue considerada de 60 a 90 DDT, donde se observa el decremento del Kc, hasta llegar a valores entre 0.3 y 0.40, los cuales son similares a los reportados por Bastos *et al.* (2012). Estos valores bajos de Kc pueden explicarse por la baja cobertura, siendo de alrededor del 50% durante la etapa de desarrollo intermedio del cultivo. Asimismo, se observa que los cambios en la humedad y tensión en el suelo (Figura 4 y 5), tienen un importante efecto en el Kc, como sucede entre los DDT 30 y 40, y 70 y 80 respectivamente, lo que implica un estrés para el cultivo.

El registro semanal del riego, la lluvia, ET, ETo y Kc se muestran en el Cuadro 2. En este cuadro se observa que la ETo total fue de 498 mm durante el periodo de 90 días, la cual es inferior a la estimada en el 2004 por

Shulka *et al.* (2014), la cual fue de 384 mm, ya que en este periodo ocurrió una importante precipitación en la región. La ET fue 214 mm para el ciclo de 90 días valor inferior al observado en el 2004 por Shulka

**Cuadro 2. Resumen semanal de lluvia, riego, evapotranspiración actual (ETa), evapotranspiración de referencia (ETo) y coeficiente de cultivo (Kc), Días Después del Trasplante (DDT) de sandía.**

DDT	Semana	Lluvia	Riego	ETa	ETo	Kc
----- mm -----						
0-4	0	50.0	0	-	-	-
5-11	1	155.0	0	16.44	43.21	-
12-18	2	4.0	0	15.69	37.78	-
19-25	3	0.0	17.10	10.09	60.03	0.16
26-32	4	10.7	12.22	19.00	43.32	0.44
33-39	5	54.6	15.88	16.02	36.20	0.44
40-46	6	11.4	19.55	24.77	38.36	0.65
47-53	7	1.3	23.21	24.03	38.98	0.62
54-60	8	0.3	13.44	18.25	38.57	0.47
61-67	9	4.3	19.55	20.42	41.88	0.49
68-74	10	0.0	15.88	15.01	35.67	0.42
75-81	11	0.0	15.88	14.34	34.73	0.41
82-88	12	0.0	7.33	10.49	26.34	0.40
89-95	13	0.0	6.11	9.83	23.21	0.42
Suma		291.5	166.1	214.40	498.30	

*et al.* (2014) para un ciclo de 83 días, la cual fue de 245 mm; así como a la observada por Bastos *et al.* (2012) de 234 para un periodo de 65 días. En el mismo cuadro se observa que la máxima ET ocurre durante la etapa fenológica intermedia, cuando ocurre el máximo Kc, la máxima transpiración, ya que se observa una disminución de la humedad del suelo a -30 y -60 cm (Figura 4) sin una disminución del riego y la presencia de lluvia (Figura 3).

### CONCLUSIONES

- Las hortalizas son cultivos que por lo general requieren tener frecuentemente alta humedad en el suelo, esto ha ocasionado recurrentemente la presencia de enfermedades por hongos y requiere determinarse su requerimientos de agua de manera adecuada sin comprometer el rendimiento. Una de técnicas más aceptadas para determinar la evapotranspiración del cultivo, es la covarianza de vórtices y fue utilizada durante el ciclo del cultivo de sandía.

- Durante este experimento se observó que la evapotranspiración actual (ETa) medida durante el cultivo, fue inferior respecto a los valores reportados en otras investigaciones, misma que puede atribuirse a la variedad cultivada, lo cual implica que tuvo una menor demanda atmosférica por su baja cobertura vegetal. Por otro lado, la humedad de suelo durante la mayor parte del cultivo, estuvo por arriba de la capacidad de campo, lo que implicó un exceso de aplicación de agua mediante el riego magnificado por la presencia de lluvias al inicio del ciclo.

- La sandía presentó un coeficiente de cultivo (Kc) menor comparado con otras investigaciones para condiciones climáticas y tipos de suelo similares a este estudio.

- Se considera que los productores de sandía y otras cucurbitáceas deben tener una mejor estrategia para decidir la frecuencia y las horas de riego, para así hacer un mejor uso de su volumen de agua concesionada, reducir sus costos por bombeo, disminuir el riesgo a enfermedades por hongos, mejorar su rendimientos y contribuir a la salud del acuífero. La sandía puede recibir un poco de estrés hídrico durante sus primeras etapas fenológicas, pero no durante la floración, ya que reduce su rendimiento, así que una estrategia del productor para ahorrar agua puede centrarse en esta parte del ciclo del cultivo y mantener óptimo el nivel de agua en el suelo.

### LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., M. E. Jensen, J. L. Wright, and R. D. Burman. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.* 81: 650-662.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper N° 56. Rome, Italy.
- Baldocchi, D. D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Change Biol.* 9: 479-492.
- Berrittella, M., A. Y. Hoekstra, K. Rehdanz, Roberto Roson, R. S. J. Tol. 2007. The economic impact of restricted water supply: A computable general equilibrium analysis. *Water Res.* 41: 1799-1813.
- Bastos, A. E., C. R. Silva, B. H. N. Rodrigues, S. Andrade Jr., and L. M. M. Ibiapina. 2012. Evapotranspiration and crop coefficient of drip irrigated watermelon in Piauí coastline, Brazil. *Eng. Agric.* 32: 582-590.
- Bittelli, M. 2010. Measuring soil water potential for water management in agriculture: A review. *Sustainability* 2: 1226-1251.
- Burba, G. 2013. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications. A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. LI-COR Biosciences. Lincoln, NE, USA.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2006. Estadísticas del agua en México, edición 2006. Sistema Nacional de Información sobre cantidad, calidad, usos y conservación del agua (SINA). México D. F. ISBN 968-817-758-X
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2013. Estadísticas del agua en México, edición 2013. SEMARNAT-CONAGUA. México, D. F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2014. Estadísticas del agua en México, edición 2014. SEMARNAT-CONAGUA. México, D. F.
- Delta\_T Devices LTD. 1999. *ThetaProbe* SOIL MOISTURE. Manual Sensor. Delta\_T. UK.
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and drainage paper 24. FAO. Rome, Italy.
- Douglas, M. W., R. A. Maddox, and K. Howard. 1993. The Mexican monsoon. *J. Clim.* 6: 1665-1677.
- Erdem, Y. and A. N. Yuksel. 2003. Yield response of watermelon to irrigation shortage. *Sci. Hortic.* 98: 365-383.
- Ertek A., S. Sensoy, I. Gedik, and C. Kucukyumuk. 2006. Irrigation scheduling based on pan evaporation values for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown under field conditions. *Agric. Water Manage.* 81: 159-172.
- González, A. M., S. Bonachela, and M. D. Fernández. 2009. Regulated deficit irrigation in green bean and watermelon greenhouse crops. *Sci. Hortic.* 122: 527-531.
- Hamdy, A., R. Ragab, and E. Scarascia-Mugnozza. 2003. Coping with water scarcity: Water saving and increasing water productivity. *Irrig. Drain.* 52: 3-20.
- Miller, G., A. Khalilian, J. W. Adelberg, H. J. Farahani, R. L. Hassell, and C. E. Wells. 2013. Grafted watermelon root length density and distribution under different soil moisture treatments. *HortScience* 48: 1021-1026.

- Miller, G. A., H. J. Farahani, R. L. Hassell, A. Khalilian, J. W. Adelberg, and C. E. Wells. 2014. Field evaluation and performance of capacitance probes for automated drip irrigation of watermelons. *Agric. Water Manage.* 131: 124-134
- Miranda, F. R., J. J. Gonçalves O. e F. Souza. 2004. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultivo para a cultura da melancia irrigada por gotejamento. *Rev. Cienc. Agron.* 35: 36-43.
- Orgaz, F., M. D. Fernández, S. Bonachela, M. Gallardo, and E. Fereres. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agric. Water Manage.* 72: 81-96.
- Rodríguez, J. C., J. Grageda, C. J. Watts, J. Garatuza-Payan, A. Castellanos-Villegas, J. Rodríguez-Casas, J. Saiz-Hernández, and V. Olavarrieta. 2010. Water use by perennial crops on the lower Sonora watershed. *J. Arid Environ.* 74: 603-610.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2014. Producción agrícola. México. [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx); <http://infosiap.siap.gob.mx/> (Consulta: agosto 28, 2014).
- Shukla, S., N. K. Shrestha, F. H. Jaber, S. Srivastava, T. A. Obreza, and B. J. Boman. 2014. Evapotranspiration and crop coefficient for watermelon grown under plastic mulched conditions in sub-tropical Florida. *Agric. Water Manage.* 132: 1-9.
- Schmutz, P. P. and S. L. Namikas. 2011. Utility of the Delta-T theta probe for obtaining surface moisture measurements from beaches. *J. Coastal Res.* 27: 478-484.
- Soulis, K. X., S. Elmaloglou, and N. Dercas. 2015. Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems. *Agric. Water Manage.* 148: 258-268.
- Twine, T. E., W. P. Kustas, J. M. Norman, D. R. Cook, P. R. Houser, T. P. Meyers, J. H. Prueger, P. J. Starks, and M. L. Wesely. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agric. For. Meteorol.* 103: 279-300.



# Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación

## *Physical processes of soil in Pedregal de San Angel ecological reserve: attributes for conservation*

Iván Castellanos Vargas<sup>1‡</sup>, Norma E. García Calderón<sup>2,3</sup> y Zenón Cano Santana<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Interacciones y Procesos Ecológicos. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n Ciudad Universitaria. 04510 Coyoacán, Cd. de México, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (icv@ciencias.unam.mx)

<sup>2</sup> Laboratorio de Edafología "Nicolás Aguilera". Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n Ciudad Universitaria. 04510 Coyoacán, Cd. de México, México.

<sup>3</sup> Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México campus Juriquilla. Boulevard Juriquilla 3001. 76230. Juriquilla, Querétaro, México (Adscripción académica actual).

---

### RESUMEN

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (REPSA-CU) alberga una fracción del derrame original de lava del volcán Xitle y actualmente el suelo y la comunidad vegetal son afectados por la fragmentación del paisaje, el depósito de residuos de relleno (como cascajo y otros materiales) y las construcciones irregulares. Se realizó una descripción de las principales propiedades físicas del suelo en sitios con topografía contrastante (planos abiertos conservados y perturbados, grietas y hondonadas). Se encontró un efecto significativo de la topografía sobre las propiedades edáficas. La materia orgánica mostró correlaciones positivas con la porosidad, la arcilla y la humedad; y mostró correlaciones negativas con la densidad aparente y real, la compactación, la acidez y el contenido de arena. El porcentaje de materia orgánica fue el atributo más importante para la clasificación y el ordenamiento canónico de los sitios. Los planos abiertos perturbados siguieron una trayectoria edafogénica diferente de los sitios conservados y asemejan Urbanosoles. Se sugiere la implementación de estrategias encaminadas a lograr su restauración ecológica. La clasificación del suelo de esta reserva corresponde a tres órdenes probables: 1) Entisol háplico, por la edad geológica de su deposición y los procesos de pedogénesis en curso; 2) Leptosol lítico vítrico, por la recurrencia de afloramientos rocosos lávicos de origen magmático y 3) Andosol vítrico por la naturaleza de su material parental y predominancia de arenas. Se concluye que el suelo de la REPSA-CU es incipiente y actualmente

los horizontes de diagnóstico están en proceso de desarrollo. La importancia ambiental de su suelo radica en su capacidad de filtración y retención de agua; su porosidad y compactación le permiten ser un banco de semillas y hábitat de diversas especies de insectos. La fragilidad de los agregados edáficos y la predominancia textural de arena representaron un factor latente de erosión.

**Palabras clave:** *porosidad, restauración ecológica, textura, Xitle.*

### SUMMARY

The Pedregal de San Angel Ecological Reserve at Ciudad Universitaria (PSAER-CU) has a fraction of the original lava spill of Xitle volcano and currently the soil and plant community are affected by the landscape fragmentation, construction waste filler (such as rubble and other materials) and irregular constructions. A description of the main physical properties of soil in sites with contrasting topography (open preserved and disturbed planes, rifts and hollows) was made. A significant effect of topography on edaphic properties was found. Organic matter showed positive correlations with the percentages fractions of porosity, clay and moisture, and also showed negative correlations with the bulk and particle densities values, compaction, acidity and sand content. The percentage of organic matter was the most important attribute for the analysis classification of sites. The disturbed open plots followed a different edaphogenic path from the conserved sites and resembled Urbanosols.

---

#### Cita recomendada:

Castellanos Vargas, I., N. E. García Calderón y Z. Cano Santana. 2017. Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación. *Terra Latinoamericana* 35: 51-64.

Recibido: octubre de 2016. Aceptado: diciembre de 2016.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 35: 51-64.

It is suggested the implementation of strategies aimed at achieving its ecological restoration. The soil classification corresponds to three probable orders: 1) Haplic Entisol by the recent geological age of deposition and currently underway pedogenesis processes; 2) Vitric Lithic Leptosol by the recurrence of magmatic rock outcrops and 3) Vitric Andosol by the nature of the parent material and textural predominance of sands. It is concluded that the soil of the PSAER-CU is incipient and currently the diagnostic horizons are in development process. Soil environmental importance lies in its capacity of water filtration and retention; its porosity and compaction allow it to be a seed bank and habitat of diverse insect species. Fragility of edaphic aggregates and the textural predominance of sand represented a latent erosion factor.

**Index words:** *porosity, ecological restoration, texture, Xitle.*

## INTRODUCCIÓN

El Suelo de Conservación Ecológica se define como la fracción edáfica en riesgo de pérdida, alteración o destrucción que posee importancia ambiental ya que proporciona servicios ecosistémicos invaluable que incrementan la calidad de vida para las personas dentro del entorno urbano, por ejemplo permiten la filtración de agua y recarga de mantos freáticos (Bullock *et al.*, 2011; GDF, 2012). El suelo de conservación ha estado permanentemente amenazado por factores tales como: el crecimiento desordenado de la ciudad; la presencia de asentamientos humanos irregulares y el desarrollo inmobiliario carente de permisos, que contribuye a urbanizar y poblar las zonas rurales. Los efectos negativos palpables tras la pérdida del suelo de conservación son: 1) la sobreexplotación de los mantos acuíferos, 2) los daños a la cubierta vegetal (pérdida por fragmentación), 3) la contaminación de suelos adyacentes y del agua, 4) la deforestación y erosión, y 5) la pérdida de la biodiversidad (Bullock *et al.*, 2011).

Una de las áreas de mayor vulnerabilidad ambiental en la Ciudad de México es la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (que en lo sucesivo será referida como REPSA-CU) es afectada primordialmente por la fragmentación, el depósito de residuos de construcción empleados como relleno (cascajo y otros materiales), las construcciones y los asentamientos irregulares (Castellanos-Vargas, 2001<sup>1</sup>;

Lot y Cano-Santana, 2009). Los primeros análisis fisicoquímicos enfocados a la descripción general del suelo del Pedregal de San Ángel se atribuyen a Rzedowski (1954), actualmente el estudio del suelo de la REPSA-CU ha pasado inadvertido, por lo que no se cuenta con una identificación y clasificación edáfica que sea concluyente. Por estas razones, se plantearon los siguientes objetivos: 1) realizar una descripción de las principales propiedades físicas del suelo en los sitios con topografía contrastante; 2) identificar los sitios prioritarios de esta reserva para restaurar su suelo y 3) argumentar sobre su valor como suelo de conservación, considerando los beneficios que ofrece y los riesgos de alteración que experimenta.

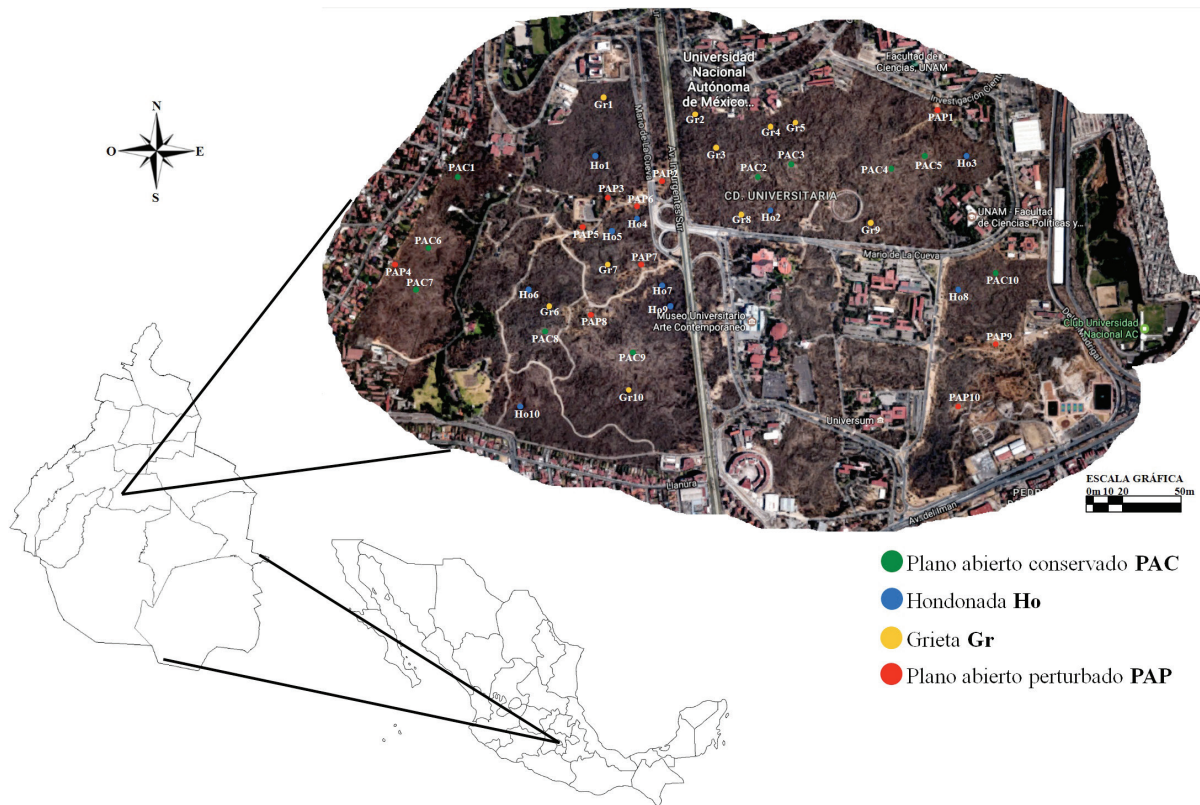
Las hipótesis que se plantearon en este trabajo se enlistan a continuación: 1) si la topografía del sustrato basáltico de la REPSA-CU es contrastante y determina la formación del suelo; entonces se encontrarán diferencias significativas entre las propiedades físicas de los sitios. 2) Si la acumulación del suelo es diferencial en los sitios con topografía contrastante, y ello promueve el crecimiento de plantas con diferente fisonomía; entonces se espera encontrar mayores niveles de materia orgánica y de acidez en las grietas y las hondonadas. Finalmente, 3) se espera encontrar mayor similitud edáfica entre los sitios conservados, en comparación con los sitios perturbados; y esto contribuirá a identificar los sitios con potencial para la conservación y para la restauración ecológica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de Estudio

El estudio se realizó en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel ubicada en el *campus* principal de Ciudad Universitaria a cargo de la Universidad Nacional Autónoma de México. La REPSA-CU ocupa un área de 237.3 ha, se localiza al suroeste de la Cuenca del Valle de México (19° 17' N, 99° 11' O; Figura 1) y cuenta con una altitud promedio de 2300 m. Su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano; presenta estacionalidad marcada, la época de lluvias comprende de junio a octubre mientras que la temporada seca comprende el resto del año (de noviembre a mayo); la temperatura media anual es de 15.6 °C; la precipitación media anual es de 833 mm (Lot y Cano-Santana, 2009). De acuerdo con el trabajo de Peralta y Prado (2009), el territorio de la REPSA-CU se divide en Zonas Núcleo

<sup>1</sup> Castellanos-Vargas, I. 2001. Ecología de la oviposición de *Sphenarium purpurascens* (Orthoptera: Pyrgomorphidae) en la Reserva del Pedregal de San Ángel, México, D.F. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.



**Figura 1. Ubicación geográfica de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (REPSA-CU).** Cada punto representa la ubicación de los sitios con topografía contrastante y las replicas que se delimitaron para la realización del análisis físico del suelo.

con vegetación altamente conservada y Zonas de Amortiguamiento con un alto grado de disturbio por el impacto humano.

El sustrato predominante en las Zonas Núcleo es un basalto gris oscuro de olivino con microcristales originado por la erupción del volcán Xitle hace aproximadamente 2000 a 1705 años (Rzedowski, 1954; Carrillo, 1995; Siebe, 2009). La lava al solidificarse formó un sustrato heterogéneo cuyo espesor varía en algunos lugares de 50 cm a 10 m; las diferencias de nivel en el terreno formaron grietas, hondonadas, sitios planos y promontorios rocosos; en ellos la acumulación del suelo es diferencial y se caracteriza por ser escaso y poco profundo (Enciso de la Vega, 1979; Álvarez *et al.*, 1982; Cano-Santana y Meave, 1996; Santibáñez-Andrade *et al.*, 2009).

Por su parte, en las Zonas de Amortiguamiento es frecuente observar que el suelo está perturbado por la presencia de basura inorgánica y restos de materiales de construcción (cascajo) que se acumulan sobre el sustrato basáltico.

La vegetación de la REPSA-CU es un matorral xerófilo que comprende 377 especies de plantas que coexisten conformando una asociación denominada *Senecionetum praecosis* (Rzedowski, 1954; 1978; Castillo-Argüero *et al.*, 2007). En las Zonas de Amortiguamiento los materiales ajenos al suelo y no consolidados son invadidos por vegetación exótica, algunas de las especies que destacan en estos sitios son el pasto africano *Pennisetum clandestinum*, la higuera *Ricinus communis* y las ornamentales *Tropaeolum majus* y *Leonotis nepetifolia*.

### Técnicas de Muestreo

La selección de los sitios de muestreo se basó en dos criterios, (1) la topografía (sitios planos y abruptos) y (2) la composición de especies vegetales que en ellos se desarrolla.

Se ubicaron sitios planos abiertos conservados (PAC) dominados por el “zacatón” *Muhlenbergia robusta* (Gramineae), así como sitios planos abiertos

y perturbados (PAP) con dominancia de *Pennisetum clandestinum* (Gramineae) y se seleccionaron dos tipos de sitios abruptos: (1) grietas (Gr), que son formaciones elongadas estrechas de menos de 5 m de ancho, originadas de fracturas del basalto de longitud y profundidad variable y (2) hondonadas (Ho), formaciones geológicas resultado de la acumulación de gases desprendidos de la lava, que tienden a formar una bóveda de pocos centímetros de grosor, cuyo techo al colapsarse, origina una oquedad o depresión en el terreno, la cual tiende a adquirir forma circular de diámetros y profundidades variables (Waitz y Wittich, 1911; Wittich, 1919; Schmitter, 1953; Enciso de la Vega, 1979; Santibáñez-Andrade *et al.*, 2009). Las grietas y hondonadas se caracterizaron por mostrar una vegetación arbórea y arbustiva bien desarrollada, con dominancia de *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae) y *Eupatorium petiolare* (Compositae) que les confieren a los sitios un aspecto fisonómico “cerrado”.

De los cuatro tipos de sitios se establecieron 10 réplicas y de cada uno se extrajeron 10 muestras de suelo con la ayuda de un nucleador edáfico acorde con las especificaciones de McIntyre (1967) y van Reeuwijk (2006) (2 cm de diámetro central y 5.5 cm de altura del cilindro). El nucleador se enterró a una profundidad promedio de 5 cm. El periodo de muestreo de los suelos comprendió de enero a marzo de 1999. En cada caso y previo a la extracción de la muestra, se valoró la estructura de los agregados edáficos con base en la terminología descrita en el manual de Cuanalo de la Cerda (1990) y se midió la compactación del suelo mediante un penetrómetro de cono equipado con una punta de 30” y 21.5 mm de diámetro superior (marca Dickey-John Co.), previamente calibrado en kg cm<sup>-2</sup>.

### Técnicas de Análisis Edáficos

Posterior a la colecta, las muestras se procesaron de acuerdo con las técnicas de van Reeuwijk (2006): se secaron al aire, se molieron en un mortero de material inerte y se tamizaron a través de mallas con aperturas de 0.5 y 0.2 cm para extraer cuerpos ajenos a su composición granulométrica.

Las valoraciones que se realizaron a las muestras del suelo fueron:

**Color.** Su determinación se realizó para suelo seco y húmedo por el método de comparación con las tablas de Munsell (1992).

**Densidad aparente (DA).** Se evaluó por el método volumétrico diferencial del aire retenido entre las partículas del suelo (Baver *et al.*, 1980; Redondo-Arámburo, 1988; van Reeuwijk, 2006).

**Densidad real (DR).** La masa sólida real de las partículas edáficas se evaluó por el método de saturación de las muestras con agua, para el proceso se emplearon picnómetros de cristal (Baver *et al.*, 1980; Gandoy-Bernasconi, 1991; van Reeuwijk, 2006).

**Porosidad (%P).** El porcentaje de porosidad de las muestras se evaluó mediante la comparación de la DA con respecto a la DR, según lo indica la siguiente Ecuación 1:

$$\%P = \left( 1 - \left( \frac{DA}{DR} \right) \right) \times 100 \quad (1)$$

**Fraciones texturales.** Los porcentajes de arena, de limo y de arcilla se evaluaron por el principio de sedimentación gravimétrica diferencial de las partículas, para esto se empleó el método del hidrómetro de Bouyoucos (1927), el cual arroja resultados confiables en suelos dominados por arena y escasa arcilla.

**Humedad.** Se midió el contenido de humedad de 400 muestras edáficas (100 por cada tipo de sitio) obtenidas mediante nucleaciones de 100 g realizadas con cajas de Kubiena de 4 × 6 × 9 cm. El contenido de humedad edáfica se obtuvo por la diferencia de peso registrado al momento de coleccionar las muestras edáficas, y posterior a un periodo de 24 h de secado en estufa a 105 °C (Redondo-Arámburo, 1988; Gandoy-Bernasconi, 1991, van Reeuwijk, 2006).

**Acidez edáfica.** Se determinó en el laboratorio empleando un potenciómetro Black Zeromatic con electrodos de vidrio y calibrado con una solución buffer a pH 7. La acidez se determinó a partir de una mezcla de suelo y agua destilada hervida en relación 1:2.5 y una solución de cloruro de potasio (KCl) 1M pH 7 en la misma proporción a la empleada con agua destilada.

**Materia orgánica.** Se evaluó mediante el método de la titulación de Walkley y Black (1934) y modificado por van Reeuwijk (2006) para suelos jóvenes.

La preparación de las muestras y los análisis edáficos se realizaron bajo la supervisión técnica del personal del Laboratorio de Edafología “Nicolás Aguilera Herrera” del Departamento de Biología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.



## Análisis Estadístico

Con el fin de evaluar si el tipo de sitio (en función de su topografía) afecta a las características físicas del suelo se aplicaron análisis de varianza de una vía excepto en el caso del color y la estructura por tratarse de variables categóricas.

Por su parte, las características físicas expresadas como porcentajes (porosidad, textura, humedad y materia orgánica) fueron corregidas como  $x' = \arcsen \sqrt{x}$  (Zar, 2010).

Previamente a la realización de los análisis de varianza, se comprobó que la distribución numérica obtenida de cada una de las pruebas edáficas cumpliera con los supuestos de la normalidad, en caso contrario estos valores se ajustaron mediante una corrección logarítmica (Sokal y Rohlf, 1995; Zar, 2010). Con el fin de determinar las diferencias significativas entre los sitios de la REPSA-CU se aplicaron pruebas de comparación múltiple de medias de Tukey. Para establecer la prioridad de los sitios que requieren restauración ecológica del suelo para fines de su conservación, se realizaron análisis de correlación múltiple entre las diez propiedades físicas edáficas cuantitativas; posteriormente con la matriz de correlación se procedió a determinar la similitud y agrupación entre las réplicas de los sitios mediante un Análisis Canónico de Correspondencia (ACC) fundamentado con el criterio de máxima verosimilitud y se calculó el valor de inercia para cada variable edáfica. Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete STATISTICA v.8.0 (StatSoft, 2008) bajo la supervisión técnica del personal del Laboratorio Ecología de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Orígenes del Suelo

El suelo de la REPSA-CU se desarrolla sobre un manto de alteración (eluvial-coluvial) que es un resultado de la dinámica de factores físicos, químicos y biológicos que originan en su seno una incipiente diferenciación vertical que actualmente dificulta la formación y observación de los horizontes edáficos de diagnóstico.

Las etapas implicadas en la formación del suelo de la REPSA-CU son las siguientes:

**1) Fase eluvial.** Ocurre la disgregación mecánica de la roca ígnea, sucede por procesos de transformación mecánica y meteorización química del basalto que determinan la formación de un manto de alteración *in situ* (o eluvión). En esta fase, los líquenes tienen preponderancia en la litólisis de la roca volcánica (Schmitter, 1953).

**2) Fase coluvial.** En ella ocurre la meteorización química de los materiales regolíticos liberados y transportados desde otros sitios de la Cuenca de México (coluvión) que se enriquece con el aporte de arena y limo transportados por el viento (Ordóñez, 1890; Carrillo, 1995).

### Color y Estructura

De acuerdo con la clasificación de Munsell (1992), el color del suelo varía desde 7.5YR3/2 cuando está seco, hasta 10YR/4/3 cuando está húmedo. El color del suelo es pardo oscuro a muy oscuro, lo cual es indicio de una elevada cantidad de materia orgánica. La naturaleza basáltica de la composición mineralógica del suelo sugiere la existencia de una rápida meteorización capaz de formar mezclas amorfas de magnesio y olivino con escaso o nulo ordenamiento cristalino (Rzedowski, 1954; Delvigne *et al.*, 1979).

Por su parte, la estructura del suelo se caracteriza por estar débilmente desarrollada, destaca que en los sitios PAC se observaron escasos agregados subangulares frágiles de 2 mm, en los sitios abruptos (Gr y Ho) y PAP los agregados se observaron invariablemente poliédricos, con las caras planas, delgadas y delicadas; lo cual es indicio de la predominancia de la fracción arcillosa así como de la actividad de organismos como bacterias, hongos, colémbolos y lombrices cuyas secreciones mantienen unidas a las partículas edáficas (Allison, 1968; Tisdall y Oades, 1982; Muscolo *et al.*, 1999; Caesar-Tonthat, 2002; Carter, 2002; Arango *et al.*, 2009). La estructura que se observó en los agregados del suelo no favorece la diferenciación de los horizontes típicos de un perfil edáfico convencional, esto es indicio de que el suelo de la REPSA-CU es incipiente y los horizontes diagnóstico aún están en proceso de desarrollo y esto es un resultado congruente con los de Rzedowski (1954).



## Efecto de la Heterogeneidad Topográfica sobre las Propiedades Físicas del Suelo

Las propiedades físicas del suelo fueron afectadas significativamente por la topografía que adquirió el basalto al enfriarse y solidificarse en cada tipo de sitio (Cuadro 1). Este resultado es congruente con los hallazgos de Huggett (1975) y Buol *et al.* (2003) quienes reportan que la topografía y la dirección de los flujos hídricos determinan los procesos edafogénicos en ecosistemas terrestres. Santibáñez-Andrade *et al.* (2009) indican que en la REPSA-CU existen por lo menos cinco tipos de microambientes basálticos (sitios planos, oquedades, grietas, hondonadas y promontorios rocosos) los cuales constituyen una muestra representativa de la heterogeneidad geomorfológica y topográfica que presentó el Pedregal original en esta zona de la Cuenca del Valle de México.

A continuación se muestran los valores promedio de cada propiedad edáfica. En todos los casos, la medida de dispersión que se muestra es el error estándar (e.e.).

**Densidad aparente (DA).** El valor promedio global de la DA fue de  $1.12 \pm 1.5 \text{ g cm}^{-3}$ . Este atributo no varió significativamente entre los sitios PAC y PAP ( $1.14$  y  $1.13 \text{ g cm}^{-3}$  respectivamente).

**Cuadro 1. Análisis de Varianza de una vía para evaluar el efecto de los sitios sobre las propiedades físicas del suelo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (REPSA-CU). Los grados de libertad corresponden en todos los casos al número de tratamiento (tipos de sitios – 1) y a las réplicas de las muestras de cada sitio (400 muestras – 4).**

Propiedad edáfica	F	Grados de libertad	P
Densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )	528	3396	< 0.001
Densidad real ( $\text{g cm}^{-3}$ )	308	3396	< 0.001
% Porosidad	234	3396	< 0.001
% Arena	226.8	3396	< 0.001
% Limo	600.5	3396	< 0.001
% Arcilla	37.3	3396	< 0.001
Compactación ( $\text{kg cm}^{-2}$ )	20.5	3396	< 0.001
% Humedad	372.5	3396	< 0.001
pH $\text{H}_2\text{O}$ [1:2.5]	98.5	3396	< 0.001
pH KCl [1:2.5]	123.2	3396	< 0.001
% Materia orgánica	646.8	3396	< 0.001

Las grietas y las hondonadas registraron valores de DA significativamente más bajos  $1.11$  y  $1.09 \text{ g cm}^{-3}$  respectivamente (Cuadro 2).

**Densidad real (DR).** El valor promedio global de la DR fue de  $1.62 \pm 1.08 \text{ g cm}^{-3}$ . La DR varió desde  $1.64 \text{ g cm}^{-3}$  en los sitios PAC hasta  $1.53 \text{ g cm}^{-3}$  en el suelo de las grietas (Cuadro 2).

**Porosidad (%P).** El porcentaje de porosidad global del suelo fue de  $21.6 \pm 5.1\%$  y varió desde  $30.7\%$  en los sitios PAC hasta  $27.4\%$  en el suelo de las grietas (Cuadro 2).

Los valores de densidad (aparente y real) indican que la REPSA-CU posee suelos ligeros que se caracterizan por un alto porcentaje de porosidad. Con base en las ideas de Carter (2002) y Amer (2012), estos atributos son importantes para la filtración del agua de lluvia, así como para favorecer la recarga del manto freático y evitar el hundimiento de zonas territoriales de la Ciudad de México. Por su parte, los resultados de Vreeken-Buijs *et al.* (1998) señalan que los microartrópodos que utilizan al suelo como hábitat son un factor determinante para la distribución y tamaño de los poros edáficos. Estos autores también destacan la importancia de estos organismos para la incorporación de biomasa que favorece la filtración vertical del agua y evita la escorrentía superficial y lateral. Finalmente, la cantidad y forma espacial de los poros del suelo facilitará el desarrollo de las raíces de las plantas; y los exudados radiculares cementarán los agregados y evitarán la movilidad de las partículas edáficas (Glasbey *et al.*, 1991; Kataja-aho *et al.*, 2011).

**Fracciones texturales.** El suelo de la REPSA-CU presentó textura Franca (Migajón) Areno-Limosa. La fracción textural predominante fue la arena ( $53.8 \pm 10.6\%$ ), seguida en orden de importancia por el limo con  $25.1 \pm 3.9\%$  y finalmente, la arcilla fue la fracción representada con el valor más bajo en la composición con  $21.5 \pm 5.1\%$ .

El porcentaje de arena varió significativamente desde  $57.9 \pm 0.26\%$  en los sitios PAP hasta un  $50.0 \pm 0.04\%$  en el suelo acumulado en las grietas (Cuadro 2). Los resultados del porcentaje de arena encontrados en los sitios PAC favorecerían la colonización de hierbas al ser sitios con alta capacidad de filtración, mientras que los valores de limo y arcilla de los sitios abruptos (Gr y Ho) favorece el desarrollo de árboles y arbustos, pues estas partículas generan microporos que retienen agua capilar y generan humedad ambiental (Amer, 2012). De acuerdo con la clasificación que menciona Castellanos

**Cuadro 2. Valores promedio de las propiedades físicas de los suelos en sitios con topografía contrastante de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (REPSA-CU). Las letras diferentes en cada propiedad edáfica denotan diferencias significativas según la prueba de Tukey con  $P < 0.05$ .**

Propiedad edáfica	Sitios			
	Plano abierto conservado	Hondonada	Grieta	Plano abierto perturbado
Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	1.14 ± 0.09 A	1.09 ± 0.07 C	1.11 ± 0.06 B	1.13 ± 0.01 A
Densidad real (g cm <sup>-3</sup> )	1.64 ± 0.03 A	1.56 ± 0.03 C	1.53 ± 0.06 D	1.62 ± 0.03 B
% Porosidad	30.67 ± 0.10 A	29.78 ± 0.11 B	27.35 ± 0.05 C	29.98 ± 0.09 B
% Arena	52.38 ± 0.32 C	53.35 ± 0.09 B	50.06 ± 0.04 D	57.86 ± 0.26 A
% Limo	27.20 ± 0.17 A	24.99 ± 0.04 B	27.57 ± 0.06 A	21.09 ± 0.14 C
% Arcilla	20.43 ± 0.15 D	21.66 ± 0.13 B	22.37 ± 0.08 A	21.06 ± 0.15 C
Compactación (kg cm <sup>-2</sup> )	0.48 ± 0.05 C	0.54 ± 0.05 A	0.53 ± 0.07 A	0.51 ± 0.07 B
% Humedad	16.33 ± 0.15 C	19.38 ± 0.20 B	23.89 ± 0.29 A	13.27 ± 0.25 D
pH (H <sub>2</sub> O 1:2.5)	6.11 ± 0.02 B	6.15 ± 0.04 B	5.34 ± 0.02 A	6.05 ± 0.05 B
pH (KCl 1:2.5)	5.26 ± 0.02 A	5.18 ± 0.04 AB	4.45 ± 0.01 C	5.10 ± 0.04 B
% Materia orgánica	15.55 ± 0.10 B	17.83 ± 0.09 B	18.97 ± 0.09 A	13.44 ± 0.09 C

*et al.* (2000), la arena del suelo de la REPSA-CU está dentro del intervalo correspondiente a muy finas (0.5 a 0.1 mm), en tanto que el limo es grueso (0.002 a 0.49 mm). Estos datos son congruentes con los que reportó Castellanos-Vargas (2001)<sup>1</sup>, donde encontró tamaños de arena (fina a muy fina) entre 0.07 a 0.2 mm de diámetro y limo de gruesos a medios entre 0.03 a 0.006 mm y son altamente preferidos por los ortópteros para ovipositar.

Se encontraron variaciones significativas de la cantidad de limo en los diferentes ambientes estudiados. En las grietas y los sitios PAC se registraron los valores más altos de este componente textural (27.6 ± 0.06 y 27.2 ± 0.17%, respectivamente); en tanto que en los sitios Ho y PAP se registraron valores significativamente menores 24.9 ± 0.04% y 21.0 ± 0.15%, respectivamente (Cuadro 2).

Las grietas mostraron contenidos de 22.4 ± 0.08% de arcilla seguidas en orden de importancia por Ho y PAP (21.7 ± 0.13 y 21.0 ± 0.15%, respectivamente), en los sitios PAC se registró la menor cantidad de esta fracción textural con 20.4 ± 0.16% (Cuadro 2).

Algunos datos de García-Hernández *et al.* (2008) sugieren que la topografía de un sitio puede determinar la repartición diferencial de las partículas texturales del suelo. En las zonas altas de los lomeríos de ecosistemas áridos con suelos aluviales predominan las arenas y la velocidad de infiltración es mayor, en comparación con

las partes bajas que son ricas en arcillas depositadas por el arrastre del agua y la filtración del agua es lenta. En el estudio de la REPSA-CU se estimó la pendiente de los promontorios rocosos siendo ≤ 10° y carecen de acumulación de suelo (Santibáñez-Andrade *et al.*, 2009) y según un modelo teórico propuesto por Soberón *et al.* (1991), el movimiento del agua por escorrentía gravimétrica sería desde las partes altas de los promontorios hacia las depresiones topográficas del basalto (sitios planos, grietas y hondonadas) en los que se depositan las partículas del suelo de manera diferencial, pues su movimiento guarda una relación con el tamaño de las partículas. Los resultados de este trabajo indican que el valor del limo en las hondonadas y las grietas varió desde 24.9 a 27.6%; mientras que la arcilla varió en estos sitios desde 21.7 a 22.4%. Finalmente, algunos datos de Castillo-Argüero *et al.* (2009) y Peralta y Prado (2009) señalan que la heterogeneidad fisonómica de la REPSA-CU es atribuible a la zonificación del suelo con distintas propiedades edáficas las cuales potencializan el crecimiento diferencial de la vegetación.

**Compactación.** El valor global de compactación de los suelos fue de 0.51 ± 0.10 kg cm<sup>-2</sup>. Los sitios con la mayor dureza edáfica fueron Ho y Gr con 0.54 ± 0.005 y 0.53 ± 0.007 kg cm<sup>-2</sup>, respectivamente seguidos en orden de importancia por los PAP y PAC con 0.51 ± 0.007 y 0.48 ± 0.005 kg cm<sup>-2</sup>, respectivamente (Cuadro 2).

Se apreció la escasa compactación que ofrecen los suelos de los sitios planos potencializa la movilidad de las partículas promoviendo su erosión. Mientras en los sitios PAP se observó mayor propensión a la erosión debido a que están dominados por el pasto *Pennisetum clandestinum*, que crece con estolones superficiales que fijan escasamente el suelo (Castellanos-Vargas, 2001<sup>1</sup>). Este pasto promueve la acidificación y promueve la erosión hídrica, pues para crecer necesita altos niveles de humedad edáfica (Sidari *et al.*, 2004).

**Humedad.** El valor promedio de la humedad de los suelos durante el periodo de muestreo fue de  $17.6 \pm 8.5\%$ . Las grietas registraron mayor humedad ( $23.9 \pm 0.37\%$ ) en tanto que los sitios PAP registraron el valor promedio más bajo con  $13.2 \pm 0.25\%$  (Cuadro 2). Estos resultados indican que las grietas brindan una alta retención de humedad edáfica que se traduce en la estabilidad de los agregados edáficos (Tisdall y Oades, 1982) y en el desarrollo de vegetación arbórea de aspecto fisonómico cerrado y ello conlleva a beneficios ecosistémicos como la purificación del aire y la regulación de la temperatura atmosférica en la REPSA-CU.

**Acidez edáfica.** Los suelos son moderadamente ácidos (promedio global:  $6.5 \pm 1.3$ ). La acidez edáfica de los sitios en disolución con agua a razón 1:2.5 varió desde  $6.15 \pm 0.04$  en las hondonadas hasta  $5.34 \pm 0.02$  en las grietas; por su parte en solución salina con KCl a razón 1:2.5, la acidez varió desde  $5.26 \pm 0.02$  en los sitios PAC hasta  $4.45 \pm 0.01$  en las grietas (Cuadro 2).

**Materia orgánica.** Los suelos son ricos en materia orgánica, la concentración promedio general fue de  $16.1 \pm 3.9\%$ . Los sitios con una cantidad significativamente mayor de MO fueron las grietas con  $18.9 \pm 0.09\%$  seguidas en orden de importancia por las hondonadas, los sitios PAC y PAP con  $17.8 \pm 0.09$ ;  $15.5 \pm 0.1$  y  $13.4 \pm 0.09$ , respectivamente (Cuadro 2). Los sitios planos (PAC y PAP) registraron menores niveles de humedad, de MO y de compactación en comparación con los sitios de topografía abrupta. Los sitios con mayor alcalinidad fueron las hondonadas (Ho) y los PAC y PAP; y los sitios con mayor acidez fueron las grietas (Gr).

La acidificación del suelo en la REPSA-CU se atribuye a la naturaleza química de las rocas, así como a los aportes de restos vegetales que incrementan la MO. Los resultados sugieren que la fertilidad de los suelos de la REPSA-CU puede estar en función del alto

porcentaje de MO que reciben cuando los árboles y los arbustos pierden su follaje (Castillo-Argüero *et al.*, 2007). Es probable que en los sitios con topografía accidentada existan procesos diferenciales para la síntesis de ácidos húmicos y fúlvicos, pues con base en los trabajos de Yamauchi *et al.* (1984), Piccolo (2002) y Troeh y Thompson (2005) las condiciones idóneas para su formación son la protección ante la incidencia directa de la radiación solar y del viento, así como la recurrencia de humedad ambiental, temperatura media y acción biológica de hongos y bacterias que degradan y mineralizan la MO. Para el caso de la REPSA-CU, es necesario diseñar un estudio enfocado en la caracterización química de estos importantes componentes de la fertilidad edáfica. Finalmente, se considera que la acidez del suelo de esta reserva representa un papel restrictivo para las especies vegetales que la habitan. Por ejemplo, Leary *et al.* (2006) discuten que el coeficiente de acidez/alcalinidad de los suelos volcánicos determina la diversidad de la vegetación xerófitica en las islas de Hawaii. No obstante, *Ulex europaeus* (Fabaceae) al fijar el nitrógeno atmosférico modifica la acidez del suelo, y su alta tolerancia a la escasez de humedad, le permiten invadir la comunidad vegetal y reducir su valor de diversidad.

### Trayectorias del Desarrollo Edáfico de la REPSA-CU

El análisis de correlación múltiple mostró que las diez propiedades edáficas cuantitativas establecen interacciones numéricas estrechas entre sí (Cuadro 3). El porcentaje de materia orgánica es un atributo fisicoquímico que se correlaciona significativamente con el resto de las propiedades edáficas que se evaluaron.

La MO presentó correlaciones positivas con los porcentajes de porosidad, arcilla y humedad; y a la vez correlaciones negativas con la densidad aparente y real; con los porcentajes de arena y limo, así como con la compactación y los valores de pH (Cuadro 3). Este resultado corrobora la tendencia que reportó Rzedowski (1954) sobre la importancia de la materia orgánica en el desarrollo del suelo del Pedregal; destaca el hecho que al incorporarse la MO al suelo, el pH alcanza valores más ácidos.

Con la matriz de correlación se realizó un Análisis Canónico de Correspondencia (ACC) y los resultados

**Cuadro 3. Coeficientes de correlación (R) entre las propiedades edáficas del suelo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel del Pedregal de Ciudad Universitaria (REPSA-CU). Se presentan en negritas los valores significativamente diferentes de cero ( $P < 0.05$ ). DA = Densidad aparente, DR= Densidad real, las lecturas del pH se hicieron en disolución con agua destilada hervida relación 1:2.5 y con solución salina KCl 1N pH 7 relación 1:2.5, %MO = valor porcentual de materia orgánica.**

	DA	DR	Porosidad	Arena	Limo	Arcilla	Compactación	Humedad	pH	
									H <sub>2</sub> O	KCL
	g cm <sup>-3</sup>			%			kg cm <sup>-2</sup>	%		
DR	-0.835									
% Porosidad	0.475	-0.88								
% Arena	0.502	0.613	0.552							
% Limo	0.311	0.349	0.299	-0.913						
% Arcilla	0.618	0.798	-0.738	-0.626	-0.254					
Compactación	0.545	0.66	-0.581	-0.45	0.138	0.813				
% Humedad	0.668	0.821	-0.751	-0.803	0.642	0.691	-0.594			
pH H <sub>2</sub> O	0.064	0.247	0.349	0.295	-0.268	-0.178	-0.048	-0.33		
pH KCl	0.073	0.302	0.427	0.163	-0.149	-0.103	-0.061	-0.353	0.771	
% MO	-0.77	-0.833	0.68	-0.831	-0.696	0.653	-0.551	0.954	-0.263	-0.267

del cálculo de la inercia por el criterio de máxima verosimilitud mostraron que las propiedades edáficas responsables de agrupar a los sitios similares fueron en orden de importancia la MO, la DR, los porcentajes de porosidad y de arena, así como la DA (Cuadro 4). Estas cuatro variables explicaron el 23.18% de la variación del modelo de la Figura 2 y sugieren la existencia de procesos edafogénicos con trayectorias diferenciales atribuibles al estado de conservación de los sitios.

El ACC refleja que los sitios PAC, Gr y Ho se encuentran agrupados (Figura 2) y el criterio edáfico que logró este ordenamiento positivo fue el %MO,

**Cuadro 4. Propiedades edáficas que aportan mayor inercia al Análisis Canónico de Correspondencia (ACC) para la clasificación de los sitios con topografía contrastante de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria (REPSA-CU).**

Propiedad física	Inercia	Correlación con el eje 1	Correlación con el eje 2
	%		
% MO	15.48	-0.99	0.1
DR	4.52	0.18	-0.41
% Porosidad	1.41	0.45	0.4
% Arena	1.77	0.34	-0.8

mientras que los sitios PAP formaron un grupo independiente cuyo criterio de agrupación negativo fue la predominancia de arena lo cual es indicador de disturbio. La recurrencia de material no consolidado (cascajo) y la presencia de especies vegetales exóticas son parte de los agentes responsables del deterioro de los PAP de la REPSA-CU (Castellanos-Vargas, 2001)<sup>1</sup>; por lo que es apremiante instaurar una estrategia de restauración ecológica del suelo con base en los preceptos que Antonio-Garcés (2008)<sup>2</sup> señaló: 1) remover el sustrato ajeno, 2) erradicar la vegetación exótica y 3) incorporar sustrato basáltico cuya composición mineralógica sea similar a la que existe en los sitios conservados (PAC, Gr y Ho).

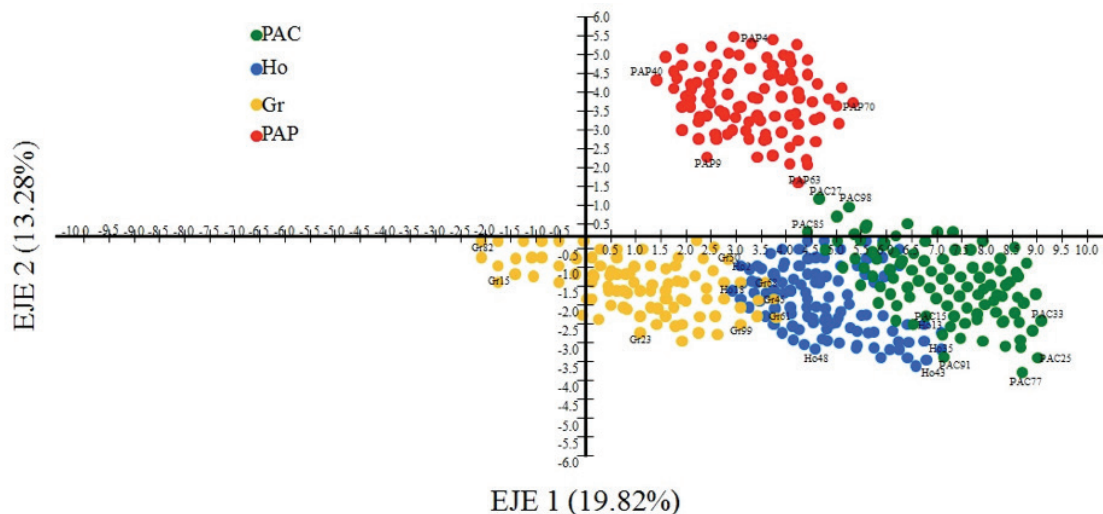
### Clasificación del Suelo con Base en sus Orígenes y sus Propiedades Físicas

De acuerdo con los análisis físicos reportados en el presente estudio, el suelo de la REPSA-CU actualmente está en proceso de maduración, por lo que su clasificación taxonómica es incierta. Con base en los criterios propuestos por la USDA (1999) y Buol *et al.* (2003), sus características lo ubican en por lo menos tres órdenes que se explican a continuación:

1) El suelo reúne las características de un Entisol háplico incipiente dado que se trata de un suelo joven en

<sup>2</sup> Antonio-Garcés, J. 2008. Restauración ecológica de la zona de amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, D. F. (México). Tesis Profesional. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.





**Figura 2. Análisis Canónico de Correspondencia para el ordenamiento y clasificación de los sitios con topografía contrastante en función de diez propiedades físicas del suelo. PAC = plano abierto conservado, Ho = hondonada, Gr = grieta y PAP = plano abiertos perturbados.** Se emplearon 100 muestras por cada sitio, se señalan las muestras que intervinieron en la determinación de la inercia. La trayectoria de los sitios PAP resultó independiente del resto de los sitios.

términos del tiempo geológico. Según datos de Ordóñez (1890); Schmitter (1953) y Siebe (2009) la lava del Xitle se enfrió gradualmente hace aproximadamente 2000 a 1705 años, y a la fecha el manto de alteración eluvial se ha enriquecido por el aporte de la fracción coluvial, generando un suelo delgado, con agregados subangulares cuyas caras son frágiles y sin desarrollo de horizontes de diagnóstico evidentes.

2) Este suelo reúne las características de un Leptosol Lítico Vítrico con frecuentes afloramientos de roca basáltica por lo que su pedregosidad es alta y su profundidad es variable. En algunos de los sitios PAC estudiados el suelo registra una profundidad mínima de 2.5 cm (Castellanos-Vargas, 2001<sup>1</sup>); en contraste con los datos de Cano-Santana y Meave, (1996) y Santibáñez-Andrade *et al.* (2009) quienes indican que en los sitios conservados puede alcanzar hasta 16 cm. Un hecho destacable desde la perspectiva de Blume y Giani (2005), los Urbanosoles o Antroposoles son suelos originados artificialmente por residuos de materiales de construcción no consolidados, que tras un prolongado tiempo de abandono son colonizados por plantas exóticas y animales oportunistas que originan ecosistemas emergentes cuyas interacciones bióticas son volátiles. En la REPSA-CU los resultados encontrados en los sitios PAP avalan esta aseveración, y sus atributos físicos los diferencian significativamente de los sitios conservados (Cuadro 2 y Figura 2) y en

esta reserva, los sitios PAP se han usado para aminorar la heterogeneidad topográfica y nivelar las áreas verdes deportivas.

3) El suelo asemeja un Andosol vítrico muy somero en proceso de desarrollo cuya fracción textural está dominada por las arena volcánica y cenizas con afinidad basáltica. Al revisar los resultados en función de la clasificación de Le Maitre (1976) y Young (2003) sobre rocas ígneas, destaca que el sustrato basáltico de la REPSA-CU reúne las características de un magma basáltico, el cual durante el enfriamiento perdió importantes volúmenes de vapor de agua, que generó grandes cantidades de burbujas que le proporcionaron textura porosa que potencializa la retención de agua líquida y elementos de las fracciones texturales: arena volcánica, limo coluvial y arcilla coloidal o monomineral originada por microdivisiones.

La presencia de minerales arcillosos en el suelo de la REPSA-CU denota la presencia de intemperismo en el material parental, pues corresponden a minerales secundarios producto del proceso de andosolización. Por otra parte, la importancia del estudio de las cenizas volcánicas con afinidad andesítica radica en establecer mejores líneas de interpretación acerca de los procesos edafogénicos, el desarrollo del paisaje y el cambio del clima en esta zona de la Cuenca de México. Estas directrices son congruentes con las que señaló Ward *et al.* (1993) para las planicies de las zonas semiáridas



del sureste de Estados Unidos.

Finalmente, en el suelo de la REPSA-CU los procesos de carácter biológico y bioquímico llegarán a adquirir gran importancia en la conformación de los horizontes; ya sea por la degradación de la materia orgánica a cargo de los microorganismos y los animales cavadores que alberga.

### **Importancia de la Conservación del Suelo de la REPSA-CU**

La REPSA-CU está inmersa en el entorno urbano y su extensión territorial comprende un mosaico de vegetación en el que las interacciones bióticas son complejas y se sustentan en el suelo incipiente que se desarrolla en los sitios con topografía contrastante (Castillo-Argüero *et al.*, 2004; 2009). Las características físicas que se encontraron en el suelo de la REPSA-CU evidencian la fragilidad del ecosistema y potencializan su conservación en términos de los servicios ambientales que proporcionan.

**Retención de agua e infiltración.** La arena y porosidad de los sitios PAC, Ho y Gr potencializa la filtración vertical del agua. Por su parte, la arcilla de las grietas y hondonadas genera microporos capaces de retener agua por capilaridad. El sustrato rocoso contribuye a retener agua debido a la gran cantidad de burbujas producidas por los gases de la lava, que al enfriarse originó oquedades en las rocas.

El valor porcentual de la humedad contenida en las muestras del suelo debe tomarse con la debida medida ya que son claramente un reflejo de la fecha y la estación en la que se colectaron las muestras (entre enero y marzo de 1999 es decir; al finalizar el invierno y principio de la primavera); y son resultado del periodo de lluvias comprendido entre junio a octubre de 1998 (Castellanos-Vargas, 2001)<sup>1</sup>.

En la REPSA-CU los Urbanosoles o Antroposoles (suelos urbanizados y perturbados) que conforman los sitios PAP pueden representar cierta importancia para la captación y filtración de agua en el ecosistema pues están conformados por un 58% de arena (Cuadro 2). No obstante, el funcionamiento y dinámica que seguirán estos sitios debe contar con monitoreo y valoración constante. El suelo de los sitios PAP puede promover la colonización de la vegetación exótica hacia los sitios conservados y alterar la dinámica de las interacciones bióticas que existen en esta reserva (Castillo-Argüero *et al.*, 2004; 2007; 2009).

**Secuestro de partículas y banco de latencia.** La porosidad del suelo de los sitios de la REPSA-CU (Cuadro 2) puede incrementar las probabilidades de secuestrar las partículas atmosféricas suspendidas cuando interactúan con las moléculas de agua de lluvia, mediante su incorporación al espacio intersticial que existe entre los agregados edáficos (Glasbey *et al.*, 1991; Certini y Scalenghe, 2006; Paul, 2007; Amer, 2012). La baja densidad y la alta porosidad del suelo de la REPSA-CU se pueden considerar como factores que facilitan el resguardo de semillas en latencia. El suelo es un banco biológico donde la diversidad genética de las plantas es alta; el germoplasma del suelo potencializa la diversidad de especies que componen a la comunidad vegetal, son consideradas como un recurso para la restauración de la vegetación natural y son hábitat para ootecas, pupas y larvas de diversas especies de insectos que sobreviven al invierno en este medio (Bliss y Smith, 1985; Chambers *et al.*, 1991; Dalling *et al.*, 1995; Butler y Chazdon, 1998; Castellanos-Vargas, 2001<sup>1</sup>; Olfert *et al.*, 2002; Gardiner y Miller, 2004; Hansson *et al.*, 2011).

**Erosión y desertificación.** La textura Franco (Migajón) Arenosa-Limosa promueve en el suelo la formación de agregados pequeños con caras subangulares, delicadas y escasa cohesión. Los agregados edáficos se rompen fácilmente entre los dedos y al aplicarles una presión de 0.51 kg cm<sup>-2</sup> (Cuadro 2), lo cual es un claro referente de la escasa estabilidad que la arena y limo le proporcionan al suelo. La fragilidad y baja cohesividad que se observó entre los agregados son atributos que potencializan la erosión (USDA, 1997). Es probable que los sitios PAC y PAP posean mayor riesgo de erosión debido a la vegetación herbácea predominantemente baja ( $\leq 50$  cm) y raíces poco profundas; en tanto que las grietas y hondonadas pueden presentar un menor riesgo ya que presentan vegetación arbustiva y arbórea ( $> 50$  cm a  $\geq 1.5$  m que le proporcionan a los sitios aspecto cerrado y mayor cobertura al suelo); con raíces muy profundas. En estos sitios se encontraron mayores cantidades porcentuales de arcilla, de humedad edáfica y de materia orgánica (Cuadro 2); estas tres propiedades son responsables de la estabilización de los agregados y de la reducción de la dispersión de las partículas finas (Allison, 1968; Tisdall y Oades, 1982; Glasbey *et al.*, 1991; USDA, 1997; Jastrow y Miller, 1998; Vreeken-Buijs *et al.*, 1998; Cockroft y Olsson, 2000; Brady y Weil, 2002; Busscher *et al.*, 2002; McCarthy, 2007).

**Acidez y fertilidad.** La acidez edáfica de la REPSA-

CU fue de  $6.5 \pm 1.3$  y varió desde 6.15 hasta 4.45 (Cuadro 2) y de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) y Sparks (2003), existen por lo menos seis causas que originan la acidificación del suelo en los ecosistemas terrestres: *a)* el uso de fertilizantes (principalmente de reacción ácida); *b)* la remoción de cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ) que provoca la vegetación nativa tras la asimilación de nutrientes; *c)* la lixiviación de bases intercambiables (en sitios con un régimen de lluvia alto); *d)* el origen y naturaleza del material parental (según su relación  $\text{Al}^{3+} : \text{Ca}^{2+} \text{ Mg}^{2+} \text{ K}^+$ ); *e)* descomposición de la MO y *f)* la recurrencia de lluvia ácida en la localidad.

Para la REPSA-CU hace falta realizar un análisis con mayor grado de profundidad para establecer los factores que intervienen en la acidez del suelo. Rzedowski (1954) estableció que los suelos del Pedregal de San Ángel poseen grandes cantidades de cationes como  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  pues seguramente las plantas los usan diferencialmente para su crecimiento y nutrición; 2) estos iones son abundantes debido a que son aportados constantemente por acarreos aluviales de origen sedimentario (traídos por el viento o disueltos en agua de lluvia desde cualquier lugar de la Cuenca de México) y 3) por su origen eluvial, esto es por la hidrólisis *in situ* de feldspatos presentes en el basalto. Asimismo, los suelos del Pedregal son pobres en aniones como N y P; ya que son aprovechados por las plantas para la formación de tejidos aéreos y subterráneos; forman parte de la materia orgánica y originan una capa de mantillo profunda.

La acidez puede atribuirse al lavado constante de bases intercambiables, pues Lot y Cano-Santana (2009) indican que la precipitación media anual de la REPSA-CU puede alcanzar hasta 833 mm, y la temporada de lluvias comprende cinco meses (de junio a octubre), y durante este periodo el suelo está sometido a un barrido hídrico de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ . De acuerdo con las observaciones de Rzedowski (1954), la vegetación del Pedregal de San Ángel se asentó sobre un basalto gris oscuro de olivino [ $(\text{A}_2)\text{SiO}_4$ ] con microcristales. Según datos de Delvigne *et al.* (1979) y de Ottonello (1997), el olivino es una solución regular de Fayalita y Forsterita, y en su fórmula química " $\text{A}_2$ " puede estar representado por algún metal como  $\text{Fe}^{2+(3+)}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  o  $\text{Ni}^{2+}$ ; los cuales al hidrolizarse pasan a formar parte de la solución del suelo en un ambiente edáfico donde la escases de sitios de intercambio promueve su lixiviación.

## CONCLUSIONES

-La topografía que presenta la REPSA-CU es un factor determinante de las propiedades físicas del suelo y actualmente, los horizontes de diagnóstico de los perfiles edáficos son incipientes y están en proceso de desarrollo.

-El contenido de MO fue un atributo central para la clasificación, agrupación y ordenamiento de los sitios que se analizaron. Este parámetro mostró correlaciones significativas positivas con las fracciones porcentuales de la porosidad, arcilla y humedad y a la vez mostró correlaciones significativas negativas con las densidades aparente y real, la compactación, acidez y contenido porcentual de arena.

-Basados en los resultados de las pruebas físicas se argumenta que la clasificación del suelo conforme a los sistemas taxonómicos vigentes corresponde a las siguientes categorías: 1) Conforme a la clasificación USDA (1999) Entisol háplico, por la edad geológica reciente de su deposición y los procesos de pedogénesis actualmente en curso; 2) Leptosol Lítico, otro calificador se sugiere Vitríco o Ándico conforme a la clasificación de la Base Referencial Mundial de los Suelos (IUSS Working Group, 2006), por la recurrencia de afloramientos rocosos de origen magmático extrusivo y 3) Andosol vitríco por la naturaleza de su material parental y predominancia textural de arena.

-Por su parte, el suelo de los sitios PAP ha sido fuertemente modificado por disturbios antrópicos, por lo que su trayectoria edafogénica lo clasifica como un Ubanosol/Antroposol, y conforma un grupo independiente de los sitios conservados PAC, Ho y Gr. Es apremiante encaminar acciones de restauración ecológica en ellos pues su extensión y cobertura de especies exóticas puede alcanzar otros sitios de esta reserva.

-Con base en los resultados físicos que se mostraron en este trabajo, la importancia de la conservación del suelo de la REPSA-CU radica en su capacidad para retener y filtrar agua; así como en el potencial para secuestrar partículas atmosféricas, a la vez que es hábitat de semillas y huevecillos. A fin de aminorar los riesgos de erosión y desertificación, se sugiere evitar las modificaciones a la comunidad vegetal original de los sitios conservados y erradicar las plantas exóticas.

## AGRADECIMIENTOS

Manifestamos nuestro más sincero agradecimiento a Rosalía Ramos Bello, María del Socorro Galicia Palacios, Elizabeth Fuentes Romero y Marco Antonio Romero Romero por su asistencia técnica. Y a los comentarios de los revisores anónimos que ayudaron a mejorar sustancialmente este trabajo.

## LITERATURA CITADA

- Allison, F. E. 1968. Soil aggregation some facts and fallacies as seen by microbiologist. *Soil Sci.* 106: 136-143.
- Álvarez S., F. J., J. Carabias L., J. Meave C., P. Moreno C., D. Nava F., F. Rodríguez Z., C. Tovar G. y A. Valiente B. 1982. Proyecto para la creación de una reserva en el Pedregal de San Ángel. Cuadernos de Ecología No. 1. Facultad de Ciencias. UNAM. México, D. F.
- Amer, A. M. 2012. Water flow and conductivity into capillary and non-capillary pores of soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 12: 99-112.
- Arango-Galván, A., L. Cutz-Pool, and Z. Cano-Santana. 2009. Estructura de la comunidad de colémbolos del mantillo. pp. 395-402. *In: A. Lot and Z. Cano-Santana (eds.). Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel.* UNAM. México, D. F.
- Baver, L. D., W. H. Gardner y W. R. Gardner. 1980. Física de suelos. U. T. E. H. A. México.
- Bliss, D. and H. Smith. 1985. Penetration of light into soil and its role in the control of seed germination. *Plant Cell Environ.* 8: 475-483.
- Blume, H. P. and L. Giani. 2005. Classification of soils in urban/ industrial agglomerations in Germany and recommendations for the WRB. *Euras. Soil Sci.* 38: 72-74.
- Bouyoucos, G. J. 1927. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *Soil Sci.* 23: 343-354.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 2002. The nature and properties of soils. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Bullock, J. M., J. Aronson, A. C. Newton, R. F. Pywell, and J. M. Rey-Benayas. 2011. Restoration of ecosystem services and biodiversity: Conflicts and opportunities. *Trends Ecol. Evol.* 26: 541-549.
- Buol, S.W., R. J. Southard, R. C. Graham, and P. A. McDaniel. 2003. Soil genesis and classification. Wiley-Blackwell. Hoboken, NJ, USA.
- Busscher, W. J., P. J. Bauer, and J. R. Frederick. 2002. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil Tillage Res.* 68: 49-57.
- Butler, B. J. and R. L. Chazdon. 1998. Species richness, spatial variation, and abundance of the soil seed bank of a secondary tropical rain forest. *Biotropica* 30: 214-222.
- Caesar-Tonthat, T. C. 2002. Soil binding properties of mucilage produced by a basidiomycete fungus in a model system. *Mycol. Res.* 106: 930-937.
- Cano-Santana, Z. y J. Meave. 1996. Sucesión primaria en derrames volcánicos: El caso del Xitle. *Ciencias* 41: 58-68.
- Carrillo, T. C. 1995. El Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Carter, M. R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94: 38-47.
- Castellanos, J. Z., J. X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. México. Colección INCAPA. México, D. F.
- Castillo-Argüero, S., G. Montes-Cartas, M. Romero-Romero, Y. Martínez-Orea, P. Guadarrama-Chávez, I. Sánchez-Gallén y O. Núñez-Castillo. 2004. Dinámica y conservación de la flora del matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (D. F., México). *Bol. Soc. Bot. Méx.* 74: 51-75.
- Castillo-Argüero, S., Y. Martínez-Orea, J. Meave, M. Hernández-Apolinar, O. Núñez-Castillo, G. Santibáñez-Andrade y P. Guadarrama-Chávez. 2009. Flora; susceptibilidad de la comunidad a la invasión de malezas nativas y exóticas. pp. 107-133. *In: A. Lot y Z. Cano-Santana (eds.). Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel.* UNAM. México, D. F.
- Castillo-Argüero, S., Y. Martínez-Orea, M. A. Romero-Romero, P. Guadarrama-Chávez, O. Núñez-Castillo, I. Sánchez-Gallén y J. A. Meave. 2007. La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Aspectos florísticos y ecológicos. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias. UNAM. México, D. F.
- Certini, G. and R. Scalenghe. 2006. Soils: Basic concepts and future challenges. Cambridge University Press. Cambridge.
- Chambers, J. C., J. A. MacMahon, and J. H. Haefner. 1991. Seed entrapment in alpine ecosystems: Effects of soil particle size and diaspore morphology. *Ecology* 72: 1668-1677.
- Cockroft, B. and K. A. Olsson. 2000. Degradation of soil structure due to coalescence of aggregates in no-till, no-traffic beds in irrigated crops. *Aust. J. Soil Res.* 38: 61-70.
- Cuanalo de la Cerda, H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.
- Dalling, J. W., M. D. Swaine, and N. C. Garwood. 1995. Effect of soil depth on seedling emergence in tropical soil seed-bank investigations. *Funct. Ecol.* 9: 119-121.
- Delvigne, J., E. B. A. Bisdom, J. Sleeman, and G. Stoops. 1979. Olivines their pseudomorphs and secondary products. *Pedologie* 29: 247-309.
- Enciso de la Vega, S. 1979. Las lavas del Pedregal de San Ángel. *CONACyT. Ciencia y Desarrollo* 25: 89-93.
- Gandoy-Bernasconi, W. 1991. Manual de laboratorio para el manejo físico de los suelos: Temporal y riego, parcela y cuenca. UACH. Chapingo, Estado de México, México.
- García-Hernández, M. A., M. A. García-Hernández, I. Castellanos-Vargas, Z. Cano-Santana y C. M. Peláez-Rocha. 2008. Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana* 26: 21-27.
- Gardiner, D. T. and R. W. Miller. 2004. Soils in our environment. Pearson Education. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Glasbey, C. A., G. W. Horgan, and J. F. Darbyshire. 1991. Image analysis and three-dimensional modelling of pores in soil aggregates. *J. Soil Sci.* 42: 479-486.
- GDF (Gobierno del Distrito Federal). 2012. Atlas geográfico del suelo de conservación del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) del Distrito Federal, México.
- Hansson, K., B. A. Olsson, M. Olsson, U. Johansson, and D. B. Kleja. 2011. Differences in soil properties in adjacent stands of Scots pine, Norway spruce and silver birch in SW Sweden. *For. Ecol. Manage.* 262: 522-530.



- Huggett, R. J. 1975. Soil landscape systems: A model of soil genesis. *Geoderma* 13: 1-22.
- IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. FAO. Rome.
- Jastrow, J. D. and R. M. Miller. 1998. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. pp. 207-223. *In*: R. Lal, J. K. Kimble, R. F. Follet, and B. A. Stewart (eds.). *Soil processes and the Carbon Cycle*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Kataja-aho, S., H. Fritze, and H. Haimi. 2011. Short-term responses of soil decomposer and plant communities to stump harvesting in boreal forests. *For. Ecol. Manage.* 262: 379-388.
- Le Maitre, R. W. 1976. The chemical variability of some common igneous rocks. *J. Petrol.* 17: 589-598.
- Leary, J. K., N. V. Hue, P. W. Singleton, and D. Borthakur. 2006. The major features of an infestation by the invasive weed legume gorse (*Ulex europaeus*) on volcanic soils in Hawaii. *Biol. Fertil. Soils* 42: 215-223.
- Lot, A. and Z. Cano-Santana. 2009. Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- McCarthy, D. F. 2007. *Essentials of soil mechanics and foundations: Basic geotechnics*. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- McIntyre, G. A. 1967. Soil sampling for soil testing. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 33: 309-320.
- Munsell color. 1992. Munsell soil color chart. Munsell Color Company. Grand Rapids, MI, USA.
- Muscolo, A., F. Bovalò, F. Gionfriddo, and S. Nardi. 1999. Earthworm humic matter produces auxin-like effects on *Daucus carota* cell growth and nitrate metabolism. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1303-1311.
- Olfert, O., G. D. Johnson, S. A. Brandt, and A. G. Thomas. 2002. Use of arthropod diversity and abundance to evaluate cropping systems. *Agron. J.* 94: 210-216.
- Ordóñez, E. 1890. El Pedregal de San Ángel; apuntes para la petrología del Valle de México. *Mem. Soc. Cient. Antonio Alzate* 4: 115.
- Otonello, G. 1997. *Principles of geochemistry*. Columbia University Press. New York, NY, USA.
- Paul, E. A. 2007. *Soil microbiology ecology and biochemistry*. Academic Press. New York, NY, USA.
- Peralta H., A. y J. Prado M. 2009. Los límites y la cartografía. pp. 27-42. *In*: A. Lot y Z. Cano-Santana (eds.). Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. UNAM. México, D. F.
- Piccolo, A. 2002. The supramolecular structure of humic substances a novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. *Adv. Agron.* 75: 57-134.
- Redondo Arámburo, A. 1988. *Manual de edafología general*. Universidad Autónoma de Sinaloa. México.
- Rzedowski, J. 1954. Vegetación del Pedregal de San Ángel (D.F., México). *An. Esc. Nac. Cienc. Biol.* 8: 59-129.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México, D. F.
- Santibáñez-Andrade, G., S. Castillo-Argüero, J. A. Zavala-Hurtado, Y. Martínez Orea y M. Hernández Apolinar. 2009. La heterogeneidad ambiental en un matorral xerófilo. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 85: 71-79.
- Schmitter V., E. 1953. Investigación petrológica en las lavas del Pedregal de San Ángel. pp. 218-237. *In*: *Memorias del Congreso Científico Mexicano: Ciencias físicas y matemáticas*. Vol. III. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Sidari, M., M. R. Panuccio, and A. Muscolo. 2004. Influence of acidity on growth and biochemistry of *Pennisetum clandestinum*: *Biol. Plant.* 48: 133-136.
- Siebe, C. 2009. La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670 ± 35 años AP y sus implicaciones. pp. 43-49. *In*: A. Lot y Z. Cano-Santana (eds.). Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel. UNAM. México, D. F.
- Soberón M., J., M. C. Rosas M. y G. Jiménez C. 1991. Ecología hipotética de la Reserva del Pedregal de San Ángel. *Cienc. Des.* 17: 25-38.
- Sokal, R. R. and F. J. Rohlf. 1995. *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research*. W. H. Freeman. New York, NY, USA.
- Sparks, D. L. 2003. *Environmental soil chemistry*. Academic Press. London.
- StatSoft, Inc. 2008. *Electronic Statistics Textbook*. StatSoft Corporation <http://www.statsoft.com/textbook>. Tulsa. Oklahoma. (Consulta: enero 14, 2014).
- Tisdall, J. M. and J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Troeh, F. R. and L. M. Thompson. 2005. *Soils and soil fertility*. Wiley-Blackwell. New York, NY, USA.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1999. *Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. USDA-NRCS. Agricultural handbook no. 436. Washington, DC, USA.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1997. *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning in the revised universal soil loss equation*. USDA-NRCS. Agricultural handbook no. 703. Washington, DC, USA.
- van Reeuwijk, L. P. 2006. *Procedures for soil analysis*. ISRIC-FAO. Wageningen, The Netherlands.
- Vreeken-Buijs, M. J., J. Hassink, and L. Brussaard. 1998. Relationships of soil microarthropod biomass with organic matter and pore size distribution in soils under different land use. *Soil Biol. Biochem.* 30: 97-106.
- Waitz, P. y E. Wittich. 1911. Tubos de explosión en el Pedregal de San Ángel. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 7: 169-175.
- Walkley, M. S. and C. A. Black. 1934. Methods of soil analysis. *Soil Sci.* 37: 29-35.
- Ward, P. A., B. J. Carter, and B. Weaver. 1993. Volcanic ashes: Time markers in soil parent materials of the southern plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 453-460.
- Wittich, E. 1919. Los fenómenos microvolcánicos en el Pedregal de San Ángel. *Mem. Soc. Cient. Antonio Alzate* 38: 101-105.
- Yamauchi, M., S. Katayama, T. Todoroki, and T. Watanabe. 1984. Total synthesis of fulvic acid. *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 23: 1565-1566.
- Young, D. A. 2003. *Mind over magma the story of igneous petrology*. Princeton University Press. Princeton, NJ, USA.
- Zar, J. H. 2010. *Biostatistical analysis*. Pearson Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.

# Biofertilización en híbridos de maíz androestériles y fértiles para los Valles Altos de México<sup>1</sup>

*Use of a bio-fertilizer on male-sterile and fertile maize hybrids for the High Valleys of Mexico<sup>1</sup>*

Margarita Tadeo Robledo<sup>2</sup>, J. Jesús García Zavala<sup>3</sup>, Hugo Jesús Alcántar Lugo<sup>2</sup>,  
Ricardo Lobato Ortiz<sup>3</sup>, Noel O. Gómez Montiel<sup>4</sup>, Mauro Sierra Macías<sup>5</sup>,  
Martha Blanca Guadalupe Irizar Garza<sup>6</sup>, Roberto Valdivia Bernal<sup>7</sup>, Job Zaragoza Esparza<sup>2</sup>,  
Beatriz Martínez Yáñez<sup>2</sup>, Consuelo López López<sup>2</sup>,  
Alejandro Espinosa Calderón<sup>6‡</sup> y Antonio Turrent Fernández<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Este trabajo es parte del proyecto de investigación PAPIIT: IT201312-3, UNAM, México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM.

<sup>2</sup> Facultad de Estudios Superiores-Cuautitlán, UNAM. Carretera Cuautitlán-Teoloyucan km 2.5. San Sebastián Xhala. 54714 Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México.

<sup>3</sup> Programa de Genética, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

<sup>4</sup> Campo Experimental Iguala (CEIGUA), INIFAP. Carretera Iguala-Tuxpan km 2.5, Col. Apartado Postal 29. 40000 Iguala, Guerrero, México.

<sup>5</sup> Campo Experimental Cotaxtla (CECOT), INIFAP. Carretera Federal Veracruz-Córdoba km 34.5. Apartado Postal 429. 91700 Medellín de Bravo, Veracruz, México.

<sup>6</sup> Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX), INIFAP. Km 13.5 Carretera Los Reyes – Texcoco. 56250 Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (espinoale@yahoo.com.mx)

<sup>7</sup> Universidad Autónoma Nayarit. Ciudad de la Cultura “Amado Nervo”. 63155 Tepic, Nayarit, México.

## RESUMEN

El uso de variedades mejoradas, así como biofertilizantes elaborados con hongos micorriza favorecen la nutrición y permiten complementar el uso de fertilizantes químicos, lo que podría incrementar la producción. El objetivo de este trabajo fue determinar el rendimiento de grano de los híbridos por efecto de la aplicación, y testigo sin aplicar, de micorriza (*Glomus intraradices*), en cinco híbridos de maíz en sus versiones fértiles y androestériles. La evaluación se realizó por medio de cuatro experimentos, dos ubicados en la Facultad de Estudios Superiores FES Cuautitlán-UNAM y dos en el Campo Experimental del Valle de México CEVAMEX - INIFAP, en Texcoco, México. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; las siembras de los materiales se efectuaron en la segunda quincena de mayo y primera de junio de 2012. El análisis estadístico de los datos fue factorial, donde los factores principales fueron ambientes, genotipos, androesterilidad/fertilidad, aplicación o no de biofertilizante, así como las interacciones de los mismos. En los rendimientos se detectó significancia debido a los ambientes y genotipos, no así para ningún otro factor o interacciones. La media general

del rendimiento fue de 8294 kg ha<sup>-1</sup>. El rendimiento obtenido en la segunda fecha de siembra en la FES Cuautitlán-UNAM fue de 9939 kg ha<sup>-1</sup>, siendo superior al de la fecha 1 del CEVAMEX (6071 kg ha<sup>-1</sup>). No hubo efecto de la aplicación de micorriza en el rendimiento medio de los híbridos (8310 kg ha<sup>-1</sup>), el cual fue similar al del testigo sin aplicación de micorriza (8279 kg ha<sup>-1</sup>). El genotipo con mayor rendimiento fue Tsiri PUMA, con 9557 kg ha<sup>-1</sup>, y resultó diferente estadísticamente al del H-47 AE (8692 kg ha<sup>-1</sup>). TSÍRI PUMA I y PUMA 1183 AE rindieron 8687 kg ha<sup>-1</sup> y 8150 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Por otro lado, el rendimiento medio de la versión androestéril de los híbridos fue de 8447 kg ha<sup>-1</sup>, siendo similar estadísticamente al promedio de la versión fértil (8142 kg ha<sup>-1</sup>). Si bien la aplicación de micorriza a la semilla no propició un efecto significativo en el rendimiento promedio de los genotipos, es conveniente verificar en ciclos siguientes en los maíces androestériles y fértiles, con manejo de fechas de siembra diferentes, donde pudiera expresarse el efecto de *Glomus intraradices*, y contar con mayor información de la respuesta a este biofertilizante.

**Palabras clave:** producción de semillas, micorriza, variedades mejoradas, *Glomus intraradices*, *Zea mays*.

## Cita recomendada:

Tadeo Robledo, M., J. J. García Zavala, H. J. Alcántar Lugo, R. Lobato Ortiz, N. O. Gómez Montiel, M. Sierra Macías, M. B. G. Irizar Garza, R. Valdivia Bernal, J. Zaragoza Esparza, B. Martínez Yáñez, C. López López, A. Espinosa Calderón y A. Turrent Fernandez. 2017. Biofertilización en híbridos de maíz androestériles y fértiles para los Valles Altos de México<sup>1</sup>. *Terra Latinoamericana* 35: 65-72.

Recibido: julio de 2016. Aceptado: diciembre de 2016.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 35: 65-72.



## SUMMARY

The use of improved maize varieties and biofertilizers made with mycorrhizal fungi favor nutrition and complement the use of chemical fertilizers to increase production. The objective of this study was to determine the effect of application of mycorrhiza (*Glomus intraradices*) on grain yield of five maize hybrids in their fertile and male sterility versions and compared with an untreated control. The evaluation was carried out in four experiments: two located in the Facultad de Educación Superior, FES Cuautitlán-UNAM, and two in the Experimental Stations of the Valley of Mexico CEVAMEX-INIFAP, in Texcoco, Mexico. The objective was to study the effect of the biofertilizer on grain yield of hybrids. A complete randomized block design with four replicates was used; the experiments were planted in the second half of May and first half of June 2012. Statistical analysis of the data was factorial, where the main factors were environments, genotypes, male sterility / fertility, application or not of biofertilizer, as well as interactions. For grain yield, significances were detected for environments and for genotypes, but not for any other factor or interaction. The overall mean grain yield was 8294 kg ha<sup>-1</sup>. The yield obtained from the crop planted on the second planting date at FES Cuautitlán-UNAM was 9939 kg ha<sup>-1</sup>, which was higher than that of the crop planted on the first date at CEVAMEX (6071 kg ha<sup>-1</sup>). There was no effect of mycorrhiza application on the average yield of the hybrids (8310 kg ha<sup>-1</sup>), which was similar to the control without mycorrhiza (8279 kg ha<sup>-1</sup>). The highest yielding genotype was Tsíri PUMA, with 9557 kg ha<sup>-1</sup>, which was statistically different from H-47 AE (8692 kg ha<sup>-1</sup>). Tsíri PUMA I yielded 8687 kg ha<sup>-1</sup> and PUMA 1183 AE 8150 kg ha<sup>-1</sup>. Average yield of the male-sterility version of the hybrids was 8447 kg ha<sup>-1</sup>, which was statistically similar to the average of the fertile version (8142 kg ha<sup>-1</sup>). Although application of mycorrhiza to seed did not have a significant effect on the average yield of the genotypes, it is recommendable to verify this result in fertile and male-sterile maize in subsequent seasons, managing different sowing dates, so that the effect of *Glomus intraradices* can be expressed and could provide more information on the response to this biofertilizer.

**Index words:** seed production, mycorrhiza, improved varieties, *Glomus intraradices*, *Zea mays*.

## INTRODUCCIÓN

En México se siembran anualmente 8.5 millones de hectáreas de maíz (*Zea mays* L.) y se producen alrededor de 22 millones de toneladas de grano; sin embargo, cada año se recurre a la importación de siete millones de toneladas de grano entero de maíz y de tres millones de toneladas de grano quebrado, que se explican, en parte, por el rendimiento promedio bajo que se obtiene, que es de 2.8 Mg ha<sup>-1</sup> (Turrent-Fernández, 2009).

Una alternativa para elevar la producción de maíz en México es el uso de variedades mejoradas, entre las que se encuentran los híbridos (Ortiz-Cereceres *et al.*, 2007; Espinosa-Calderón *et al.*, 2009), aunado al uso de prácticas y técnicas eficientes de cultivo; entre éstas últimas se reconoce que una adecuada fertilización puede incrementar la producción (Virgen-Vargas *et al.*, 2010; Tadeo-Robledo *et al.*, 2012).

Con la clausura y cierre de Fertilizantes Mexicanos (FERTIMEX) y la constante importación de fertilizantes en México, los precios de éstos se han incrementado considerablemente, lo que hace prohibitivo el empleo de fertilizantes químicos para muchos productores (Irizar *et al.*, 2003). Con las limitaciones en el uso de fertilizantes inorgánicos, una alternativa a explorar es el uso de los biofertilizantes usados extensivamente a partir de 1999, por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en maíz, trigo, sorgo, entre otros (Díaz-Franco *et al.*, 2008; Grageda-Cabrera *et al.*, 2012).

Los biofertilizantes elaborados con hongos micorriza son productos benéficos que se asocian a las raíces de las plantas y favorecen su nutrición. Están presentes en todos los suelos agrícolas y su asociación con las plantas es benéfica tanto para la planta como para la micorriza debido al intercambio de sustancias nutritivas. La micorriza permite a la planta incrementar la exploración de la raíz con un aumento en la absorción y transporte de nutrientes como fósforo, nitrógeno, cobre, zinc y agua del suelo, proporcionándole mayores ventajas para su desarrollo y productividad. Estos biofertilizantes no contaminan ni causan daño al suelo, ni a la planta, incrementan el rendimiento de los cultivos a un bajo costo y permiten complementar el uso de fertilizantes químicos principalmente los nitrogenados y fosfatados (Irizar-Garza *et al.*, 2003; Díaz *et al.*, 2008; González-Camarillo *et al.*, 2012).

Con el fin de aportar elementos que apoyen el uso de los biofertilizantes en maíz en los Valles Altos de

México (2200 a 2600 m), el objetivo de este trabajo fue determinar la respuesta en productividad de grano de cinco híbridos trilineales de maíz, cada uno en sus versiones androestéril y fértil, ante la aplicación de un biofertilizante a base de una micorriza arbuscular (*Glomus intraradices*), en comparación con un testigo sin aplicación de biofertilizante.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se establecieron en el ciclo primavera-verano 2012 en cuatro ambientes. Dos experimentos se realizaron en el Campo Experimental de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC-UNAM) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM *campus* Cuautitlán), ubicado a una altitud de 2252 m. Los otros dos experimentos se establecieron en el Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX) del INIFAP, ubicado en Santa Lucía de Prías, Coatlínchán, Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2240 m (García, 2004). En cada una de las localidades los experimentos se establecieron con diferencia en las fechas de siembra.

En los cuatro experimentos se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. El análisis estadístico de los datos se efectuó en forma combinada, considerando los factores: ambientes (4), híbridos (5), versión androestéril/fértil (2), tratamientos con y sin biofertilizante (2), así como las interacciones entre estos factores. Cada unidad experimental consistió en un surco de 5 metros de largo por 0.8 de ancho. Los híbridos utilizados fueron H-47 AE (Espinosa-Calderón *et al.*, 2010; Tadeo-Robledo *et al.*, 2012), desarrollados en el INIFAP en colaboración con investigadores de la UNAM; Tsiri PUMA, Tsiri PUMA 2, PUMA 1187 AEC1 y PUMA 1183 AEC2 (Tadeo-Robledo *et al.*, 2010; Espinosa-Calderón *et al.*, 2012).

En los cuatro ambientes la preparación del terreno consistió de un barbecho, dos pasos de rastra, cruza y surcado a 80 cm. Se empleó la fórmula de fertilización 80-40-00, la cual se aplicó al surcar. Se utilizó urea como fuente de nitrógeno (46-00-00) en los cuatro ambientes, y fosfato diamónico como fuente de fósforo, este último se aplicó en la UNAM *campus* Cuautitlán, mientras que en Santa Lucía de Prías se aplicó superfosfato de calcio triple. Se consideró la aplicación del tratamiento fertilizante 80-40-00, en los cuatro ambientes, nivel bajo de fertilización, con referencia

a 150-60-00, que es el que se emplea en el manejo del cultivo de maíz comercial en la zona. Se utilizó un biofertilizante producido y comercializado por el INIFAP, elaborado a base de una micorriza arbuscular (*Glomus intraradices*). La semilla necesaria para sembrar un surco de 5 m de largo se colocó en sobres, con un golpe de tres semillas cada 50. Esta semilla no estaba tratada con ningún tipo de agroquímico.

Las semillas de los tratamientos con biofertilizante se prepararon en el laboratorio del CEVAMEX. Se les aplicó miel como adherente para el producto comercial y agua, se mezclaron mecánicamente hasta tener una mezcla homogénea, y posteriormente se les agregó el biofertilizante a razón de 1 kg de micorriza por 40 kg de semilla. La proporción de concentración fue de 40 esporas por gramo, con 85% de colonización radical.

La cosecha en los cuatro experimentos, se realizó a fines de noviembre de 2012, en forma manual. Se cosecharon todas las mazorcas de la parcela, sanas y dañadas. Al final, se seleccionaron solamente las mazorcas que tenían más de 60% de grano comercial.

En una muestra representativa de cinco mazorcas por parcela se determinaron el porcentaje de humedad del grano, mediante un determinador de humedad electrónico Burrows® modelo 700, así la relación grano/olote, que se obtuvo al dividir el peso del grano de cinco mazorcas recién cosechadas entre el peso del grano más olotes y el cociente se multiplicó por 100. Se tomaron al azar cinco mazorcas por parcela, a las cuales se les determinó longitud de la mazorca, número de hileras por mazorca y el número de granos por hilera.

El rendimiento de grano (kg ha<sup>-1</sup>) al 14% de humedad, se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Rendimiento} = (\{PC \times \% MS \times \% G\} \times FC) / 8600$$

dónde: PC = peso de campo del total de mazorcas cosechadas por parcela, expresado en kilogramos; % MS = porcentaje de materia seca, calculado con base en la muestra de grano de cinco mazorcas recién cosechadas; % G = porcentaje de grano, que es la relación peso de grano/peso de mazorca; FC = factor de conversión para obtener rendimiento de grano por ha<sup>-1</sup>; se obtuvo al dividir 10 000 m<sup>2</sup> entre el tamaño de la parcela útil, que fue de 4 m<sup>2</sup>, 8600 = es un valor constante que permite estimar el rendimiento de grano con un contenido de humedad del 14% humedad, utilizado en la semilla comercial.

Se analizaron los siguientes factores de variación:

ambientes (A), con cuatro ambientes; genotipos (G), con cinco híbridos; versiones de los híbridos, con dos niveles: androestéril o fértil (AE); la aplicación de biofertilizante, con dos niveles: con aplicación o testigo sin aplicar (B), así como todas las interacciones:  $G \times AE$ ,  $G \times B$ ,  $A \times G$ ,  $A \times AE$ ,  $A \times B$ ,  $G \times AE \times B$ ,  $A \times G \times AE$ ,  $A \times G \times B$ ,  $A \times G \times AE \times B$ . Para la comparación de medias se aplicó la prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En rendimiento se detectaron diferencias altamente significativas debido a los diferentes ambientes e híbridos, pero no entre tratamientos con y sin biofertilizante, ni tampoco entre versiones de los híbridos, androestériles y fértiles. Para esta misma variable, ninguna de las interacciones mostró diferencias significativas. Entre ambientes hubo diferencias altamente significativas para número de días a floración masculina y femenina, altura de planta y de mazorca, longitud de mazorca, número de hileras por mazorca, número de granos por hilera y número de granos por mazorca (Cuadro 1). Entre los híbridos, hubo diferencias significativas para días a floración masculina y femenina, altura de planta y de mazorca, hileras por mazorca y granos por mazorca; sin embargo, no se detectaron diferencias para longitud de mazorca y granos por hilera (Cuadro 2). La media de rendimiento fue de 8294 kg ha<sup>-1</sup> y el coeficiente de variación (CV) fue de 17.8%. Entre las versiones androestériles y fértiles de los híbridos se detectaron diferencias altamente significativas para días a floración masculina, pero si se detectaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) para

altura de planta. Para las otras variables medidas no se detectaron diferencias significativas.

En la comparación de medias para rendimiento entre ambientes, hubo cuatro grupos de significancia (Cuadro 1), los promedios del rendimiento de los ambientes fueron diferentes entre sí. El rendimiento mayor (9939 kg ha<sup>-1</sup>) se obtuvo en los terrenos de la FESC-UNAM *campus* Cuautitlán en la segunda fecha de siembra (primera quincena de mayo). La segunda fecha de siembra presentó rendimientos mayores con respecto a la primera en las dos localidades, lo cual se debe al estrés en las plantas por falta de humedad (sequía) en la primera fecha de siembra, lo cual no ocurrió en los experimentos sembrados en la segunda fecha, coincidiendo estos resultados con los reportados por Tadeo-Robledo *et al.* (2014).

La comparación de medias entre los híbridos evaluados indicó que el rendimiento más alto correspondió a Tsiri PUMA, con 9557 kg ha<sup>-1</sup>, diferente estadísticamente al de los híbridos H-47 AE y Tsiri PUMA 2, que rindieron 8692 kg ha<sup>-1</sup> y 8687 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Cuadro 2). Lo anterior indica que la conformación genética por el origen de los progenitores y los híbridos poseen productividad diferente. El híbrido Tsiri PUMA se desarrolló en el programa de mejoramiento genético de la FESC-UNAM y recientemente fue inscrito en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV), con el número de registro MAZ-1571-290514 (Tadeo-Robledo *et al.*, 2014). Este híbrido es resultado de trabajos con el esquema de androesterilidad que se realiza desde 1992 con investigadores de la UNAM *campus* Cuautitlán, (Tadeo-Robledo *et al.*, 2010; Tadeo-Robledo *et al.*, 2014).

**Cuadro 1. Comparación de medias de variables de respuesta del maíz entre cuatro ambientes de evaluación considerando el promedio de cinco híbridos en sus versiones fértiles y androestériles con y sin aplicación de biofertilizante. Primavera-verano, 2012.**

Ambientes	Rendimiento	Floración masculina	Floración femenina	Altura planta	Altura mazorca	Longitud mazorca	Hileras por mazorca	Granos por hilera	Granos por mazorca
	kg ha <sup>-1</sup>	- - - - Días - - - -		- - - - - - - - cm - - - - - - - -					
F2 FESC	9939 a <sup>†</sup>	81 a	82 a	227 c	116 c	15.1 b	16 a	31 b	486 a
F1 FESC	8911 b	77 b	78 b	250 b	139 a	15.7 a	15 a	31 b	484 a
F2 CEVAMEX	8254 c	75 d	76 c	248 b	127 b	14.9 bc	14 b	32 a	475 a
F1 CEVAMEX	6071 d	76 c	78 b	265 a	126 b	14.7 c	14 b	29 c	437 b
D.S.H. (0.05)	607	0.7	0.8	7	5	0.5	0.4	1	22

F1 = fecha de siembra en primera quincena de mayo; F2 = fecha de siembra en la segunda quincena de mayo. <sup>†</sup> Medias con igual letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey  $P = 0.05$ ); DHS = Diferencia Honesta Significativa.

**Cuadro 2. Comparación de medias para diferentes variables entre cinco híbridos de maíz en sus versiones fértiles y androestériles considerando el promedio de la aplicación y no aplicación de biofertilizante evaluados en cuatro ambientes. Primavera-verano, 2012.**

Genotipo	Rendimiento	Floración masculina	Floración femenina	Altura planta	Altura mazorca	Longitud mazorca	Hileras por mazorca	Granos por hilera	Granos por mazorca
	kg ha <sup>-1</sup>	Días		cm					
TSÍRI PUMA	9557 a <sup>†</sup>	77 bc	78 bc	249 a	124 b	15.4 a	16 a	31 a	482 a
H-47 AE	8692 b	76 c	77 c	258 a	145 a	15.0 ab	16 a	31 a	491 a
TSÍRI PUMA 2	8687 b	77 bc	78 bc	254 a	119 b	14.7 b	15 b	30 a	467 ab
PUMA 1183 AE2	8150 b	77 bc	79 b	240 b	124 b	14.9 ab	15 b	31 a	446 b
P 1183 AE1	6385 c	79 a	81 a	237 b	122 b	15.1 ab	15 b	31 a	466 ab
D.S.H. (0.05)	721	0.8	1	8	6	0.6	0.4	1	26

<sup>†</sup> Medias con igual letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); DHS = Diferencia Honesta Significativa.

El rendimiento superior del híbrido H-47 AE confirma resultados de trabajos anteriores, lo que perfila a este híbrido para su uso comercial, inscrito también ante el CNVV, con el número 3151-MAZ-1656-300615/C, con lo cual se promueve su siembra extensiva en los Valles Altos. Este material se obtuvo paralelamente al híbrido H-51 AE, el cual se liberó recientemente por el CEVAMEX-INIFAP (Tadeo-Robledo *et al.*, 2013), lo que también confirma resultados previos reportados para el H-47 (Espinosa-Calderón *et al.*, 2010).

La comparación de medias para el rendimiento entre las versiones androestériles y fértiles de los genotipos mostró que los valores de la producción de grano, en promedio de híbridos, fueron similares entre la versión androestéril y la versión fértil (Cuadro 3). El resultado anterior contrasta con el de otros trabajos similares, donde se encontró que las versiones androestériles mostraron rendimientos estadísticamente superiores a los de las versiones fértiles (Martínez-Lazaro *et al.*, 2005; Tadeo-Robledo *et al.*, 2007). Por otra parte, el rendimiento similar entre las dos versiones confirma

que los materiales son isogénicos y que la diferencia entre ambos fue la presencia o ausencia de polen en las espigas.

La comparación de medias entre versiones, para las demás variables evaluadas, indicó que no hubo diferencias significativas para floración femenina, altura de mazorca, longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca; este resultado se atribuye a que las versiones son isogénicas, es decir, son genéticamente similares, excepto para los genes génico-citoplásmicos relacionados con la esterilidad masculina tipo C, que causan que en la versión androestéril no haya producción de polen, mientras que en la fértil sí (Tadeo-Robledo *et al.*, 2007; Tadeo-Robledo *et al.*, 2010; Tadeo-Robledo *et al.*, 2012; Tadeo-Robledo *et al.*, 2013). Por otro lado, en otras variables como floración masculina, altura de planta e hileras por mazorca, aún cuando hubo diferencias, estas no fueron suficientes para afectar de manera significativa el rendimiento entre las versiones.

La comparación de medias de mayor trascendencia en este trabajo de investigación, por ser la parte medular

**Cuadro 3. Comparación de medias entre las versiones fértiles y androestériles de cinco híbridos con y sin aplicación de biofertilizante, evaluados en cuatro ambientes para diferentes variables. Primavera-verano, 2012.**

Versión Androestéril/Fértil	Rendimiento	Floración masculina	Floración femenina	Altura planta	Altura mazorca	Longitud mazorca	Hileras por mazorca	Granos por hilera	Granos por mazorca
	kg ha <sup>-1</sup>	Días		cm					
Androestéril	8447 a <sup>†</sup>	78 a	78 a	245 b	127 a	15.1 a	14 b	31 a	472 a
Fértil	8142 a	77 b	78 a	251 a	126 a	14.9 a	15 b	31 a	468 a
D.S.H. (0.05)	327	0.3	0.4	4	3	0.3	0.2	0.5	12

<sup>†</sup> Medias con igual letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); DHS = Diferencia Honesta Significativa.



de los objetivos y la hipótesis propuestos, es la respuesta del rendimiento de grano de los híbridos evaluados a la aplicación de biofertilizante cada uno en versión androestéril y fértil, comparados con el testigo sin aplicación de biofertilizante. En el Cuadro 4, se observa que entre ambos tratamientos hubo rendimientos de grano estadísticamente similares, donde el rendimiento del tratamiento con biofertilizantes fue de 8310 kg ha<sup>-1</sup>, y el del tratamiento sin biofertilizante de 8279 kg ha<sup>-1</sup>, resultados similares a los reportados en otros estudios (Uribe-Valle y Dzib-Echeverría, 2006; Sánchez de la Cruz *et al.*, 2008). Los rendimientos similares de los tratamientos con y sin aplicación de biofertilizante, posiblemente fueron influenciados por la fertilización química que se aplicó previa a la siembra. Esta ausencia de respuesta al biofertilizante en tales condiciones se reportó previamente por Díaz-Franco (2008) y Sánchez de la Cruz *et al.* (2008), pero es contraria a los resultados del estudio de Cruz-Chávez (2007), quien encontró incrementos hasta de 21% en rendimiento en parcelas tratadas con *Glomus intraradices*. Asimismo, los resultados obtenidos en este trabajo no coinciden con los de Grageda-Cabrera *et al.* (2012), quienes encontraron un incremento superior a 11% en comparación con el testigo, en el rendimiento de grano de maíz con la biofertilización de *A. brasilense* y *Glomus intraradices*.

En la comparación de medias entre tratamientos con y sin biofertilizante para las demás variables evaluadas, no hubo diferencias significativas para ninguna de ellas (Cuadro 4). En todos los casos, la expresión de las variables en los tratamientos con y sin aplicación de biofertilizante fue similar, lo que ya se había detectado en trabajos previos realizados en la FESC-UNAM, acorde con ello, se obtuvieron resultados similares

al aplicar o no aplicar biofertilizante. Sin embargo, es recomendable aplicar biofertilizante en otras condiciones, por ejemplo, haciendo combinaciones de biofertilizantes que tengan un efecto en los materiales (Uribe-Valle y Dzib-Echeverría, 2006), o aplicar biofertilizante y sembrar la semilla sin aplicar fertilizantes químicos, para que el biofertilizante ayude a aprovechar los nutrimentos cuando es limitada su presencia. En este trabajo en los cuatro ambientes de evaluación, se aplicó una dosis baja de fertilizante químico, pero en trabajos futuros pueden incluirse tratamientos sin fertilizante y combinaciones de niveles de fertilizante con aplicación de biofertilizantes, para definir con precisión el efecto probable en estas condiciones, como lo reporta González-Camarillo *et al.* (2012), quien encontró incrementos en rendimiento con niveles de fertilización de 90-60-00 y aplicación de biofertilizante.

Los resultados de este trabajo para los tratamientos con y sin biofertilizante también contrastan con los de Grageda-Cabrera *et al.* (2012), quien reportó rendimientos de maíz de 10 069 kg ha<sup>-1</sup> en parcelas biofertilizadas con micorriza, y de 9336 kg ha<sup>-1</sup> en el tratamiento testigo, lo que significó una diferencia del 8%. Por su parte González-Camarillo *et al.* (2012), en dos parcelas de validación con el híbrido de maíz H-565 y la dosis de fertilización de 90-60-00 aplicada al testigo y a parcelas tratadas con micorriza INIFAP, reportó un rendimiento promedio de 6900 kg ha<sup>-1</sup> para el testigo y de 7700 kg ha<sup>-1</sup> para el tratamiento con micorriza; esta diferencia representa 11% más de rendimiento utilizando micorriza INIFAP. Estos resultados indican la conveniencia de verificar en ciclos siguientes los resultados de los maíces androestériles y fértiles, con un manejo de fechas de siembra diferentes donde

**Cuadro 4. Comparación de medias de rendimiento y otras variables entre tratamientos con y sin aplicación de biofertilizante, considerando el promedio de cinco híbridos en sus versiones fértiles y androestériles evaluados en cuatro ambientes. Primavera-verano, 2012.**

Fertilización	Rendimiento	Floración masculina	Floración femenina	Altura planta	Altura mazorca	Longitud mazorca	Hileras por mazorca	Granos por hilera	Granos por mazorca
	kg ha <sup>-1</sup>	- - - -	Días - - - -	- - - - -	cm - - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -
Con Biofertilizante	8310 a <sup>†</sup>	77 a	78 a	249 a	127 a	15.1 a	15 a	31 a	469 a
Sin Biofertilizante	8279 a	77 a	78 a	247 a	127 a	14.9 a	15 a	31 a	472 a
D.S.H. (0.05)	327	0.3	0.4	4	3	0.3	0.2	0.5	12

<sup>†</sup> Medias con igual letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); DHS = Diferencia Honesta Significativa.



podiera expresarse el efecto de *Glomus intraradices*, pero sobre todo para tener mayor información de la respuesta a este biofertilizante del INIFAP.

## CONCLUSIONES

La aplicación de micorriza a la semilla de maíz no propició un efecto significativo en el rendimiento promedio de los genotipos (9039 kg ha<sup>-1</sup>), pues éste resultó similar estadísticamente al rendimiento del testigo al que no se le aplicó micorriza (8919 kg ha<sup>-1</sup>). Por otro lado, el híbrido que expresó el rendimiento mayor fue Tsiri PUMA, con 9557 kg ha<sup>-1</sup>, el cual fue diferente estadísticamente al resto de los híbridos. El rendimiento promedio de la versión androestéril de los híbridos (8447 kg ha<sup>-1</sup>) fue estadísticamente igual al de la versión fértil de los mismos (8142 kg ha<sup>-1</sup>), aunque superior numéricamente en 300 kg ha<sup>-1</sup>. Finalmente, el mejor ambiente de evaluación fue la segunda fecha de siembra en la FESC-UNAM, campus Cuautitlán.

## AGRADECIMIENTOS

Al proyecto de investigación PAPIIT: IT201215, UNAM, México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM.

## LITERATURA CITADA

- Díaz-Franco, A., J. Salinas G., I. Garza C. y N. Mayek P. 2008. Impacto de labranza e inoculación micorrizica arbuscular sobre la pudrición carbonosa y rendimiento de maíz en condiciones semiáridas. *Rev. Fitotec. Mex.* 31: 257-263.
- Espinosa-Calderón, A., M. Tadeo-Robledo, A. Turrent-Fernández, N. Gómez-Montiel, M. Sierra-Macías, F. Caballero-Hernández, R. Valdivia-Bernal y F. Rodríguez-Montalvo. 2009. El potencial de las variedades nativas y mejoradas de maíz. *Ciencias* 92-93: 118-125.
- Espinosa-Calderón, A., M. Tadeo-Robledo, B. Zamudio-González, A. Turrent-Fernández, I. Arteaga-Escamilla, V. Trejo-Pastor, B. Martínez-Yañez, E. Canales-Islas, J. Zaragoza-Esparza, M. Sierra-Macías, N. Gómez-Montiel, R. Valdivia-Bernal y A. Palafox-Caballero. 2012. Rendimiento de cruas simples de maíz en versión androestéril y fértil bajo diferentes densidades de población. *Cienc. Agríc. Inf.* 21: 78-85.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana. Serie Libros No. 6, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Grageda-Cabrera, O. A., A. Díaz-Franco, J. J. Peña-Cabriaes y J. A. Vera-Nuñez. 2012. Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3: 1261-1274.
- González-Camarillo, M., N. O. Gómez-Montiel, J. Muñoz-Espíritu, F. Valencia-Espinosa, D. Gutiérrez-Guillermo, H. Figueroa-López y H. Orlando. 2012. Rendimiento del maíz de riego tratado con zeolita más fertilizantes en el estado de Guerrero. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3: 1129-1144.
- Irizar-Garza, M. B., P. Vargas-Vázquez, D. Garza-García, C. Tut y Couoh, I. Rojas-Martínez, A. Trujillo-Campos, R. García-Silva, D. Aguirre-Montoya, J. C. Martínez-González, S. Alvarado-Mendoza, O. Grageda-Cabrera, J. Valero-Garza y J. F. Aguirre-Medina. 2003. Respuesta de cultivos agrícolas a los biofertilizantes en la región central de México. *Agríc. Téc. Méx.* 29: 213-225.
- Martínez-Lázaro, C., L. Mendoza-Onofre, G. García-De Los Santos, M. C. Mendoza-Castillo y A. Martínez-Garza. 2005. Producción de semilla híbrida de maíz con líneas androfértiles y androestériles isogénicas y su respuesta a la fertilización y densidad de población. *Rev. Fitotec. Mex.* 28: 127-133.
- Ortiz-Cereceres, J., R. Ortega-Pazcka, J. D. Molina-Galán, M. Mendoza-Rodríguez, M. C. Mendoza-Castillo, F. Castillo-González, A. Muñoz-Orozco, A. Turrent-Fernández y A. Kato-Yamakake. 2007. Análisis de la problemática de la producción nacional de maíz y propuestas de acción. Grupo Xilonen, Universidad Autónoma Chapingo, Colegio de Postgraduados, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, México.
- Sánchez de la Cruz, R., A. Díaz-Franco, V. Pecina-Quintero, I. Garza-Cano y J. Loera-Gallardo. 2008. *Glomus intraradices* y *Azospirillum brasilense* en trigo bajo dos regímenes de humedad en el suelo. *Univ. Cienc.* 24: 239-245.
- Tadeo-Robledo, M., A. Espinosa-Calderón, D. Beck-Lewis y J. L. Torres. 2007. Rendimiento de semilla de cruas simples fértiles y androestériles progenitoras de híbridos de maíz. *Agríc. Téc. Méx.* 33: 175-180.
- Tadeo Robledo, M., A. Espinosa-Calderon, J. Serrano R., M. Sierra-Macías, F. Caballero-Hernández, R. Valdivia-Bernal, N. Gómez-Montiel, A. Palafox-Caballero, F. A. Rodríguez-Montalvo y B. Zamudio-González. 2010. Productividad de diferentes combinaciones de semilla androestéril y fértil en dos híbridos de maíz. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1: 273-287.
- Tadeo-Robledo, M., A. Espinosa-Calderón, N. Chimal, I. Arteaga-Escamilla, V. Trejo-Pastor, E. Canales-Islas, M. Sierra-Macías, R. Valdivia-Bernal, N. O. Gómez-Montiel, A. Palafox-Caballero y B. Zamudio-González. 2012. Densidad de población y fertilización en híbridos de maíz androestériles y fértiles. *Terra Latinoamericana* 30: 156-164.
- Tadeo-Robledo, M., A. Espinosa-Calderón, V. Trejo-Pastor, I. Arteaga-Escamilla, E. Canales-Islas, A. Turrent-Fernández, M. Sierra-Macías, R. Valdivia-Bernal, N. Gómez-Montiel, A. Palafox-Caballero y B. Zamudio-González. 2013. Eliminación de espiga y hojas en progenitores androestériles y fértiles de los híbridos trilineales de maíz 'H-47' y 'H-49'. *Rev. Fitotec. Mex.* 36: 245-250.
- Tadeo-Robledo, M., A. Espinosa-Calderón, A. Turrent-Fernández, B. Zamudio-González, R. Valdivia-Bernal y P. A. Meza. 2014. Productividad de grano de cuatro híbridos trilineales de maíz en versión androestéril y fértil. *Agron. Mesoam.* 25: 45-52.
- Turrent-Fernández, A. 2009. Potencial productivo de maíz. *Ciencias* 92-93: 126-129.

Uribe-Valle, G. y R. Dzib-Echeverría. 2006. Micorriza arbuscular (*Glomus intraradices*), *Azospirillum brasilense* y Brassinoesteroide en la producción de maíz en suelo luvisol. *Agric. Téc. Méx.* 32: 67-76.

Virgen-Vargas, J., J. L. Arellano-Vázquez, I. Rojas-Martínez, M. A. Ávila-Perches y G. F. Gutiérrez-Hernández. 2010. Producción de semilla de cruza simples de híbridos de maíz en Tlaxcala, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 33: 107-110.

# Fraccionamiento químico del carbono en suelos con diferentes usos en el departamento de Magdalena, Colombia

## *Chemical carbon fractioning in different land uses in the Magdalena Department, Colombia*

José Rafael Vásquez Polo<sup>1‡</sup> y Felipe Macías Vázquez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad del Magdalena. Carrera 32 No 22 – 08, Apartado Postal 2-1-21630. 470004 Santa Marta D.T.C.H., Colombia.

<sup>‡</sup> Autor responsable (jose.quevas@yahoo.es)

<sup>2</sup> Universidad Santiago de Compostela. Facultad de Biología. Rúa Lope Gómez de Marzoa, s/n. (Campus Vida). 15782 Santiago de Compostela, España.

### RESUMEN

El cambio en el uso y manejo de los suelos puede afectar su capacidad para capturar carbono, cuya magnitud es desconocida en la región norte del departamento de Magdalena, Colombia. En este sentido es importante avanzar en estudios de caracterización cualitativa de la materia orgánica del suelo y el efecto que sobre ella han tenido los cambios de uso y el manejo de suelos dedicados al monocultivo. Por tal motivo se estudió la relación de los diferentes usos del suelo sobre los contenidos y formas de carbono (C) en seis zonas edafoclimáticas al norte de dicho departamento, ubicado entre 5 y 956 m de altitud, con temperaturas medias entre 24 y 30 °C y precipitaciones medias entre 663 y 2000 mm. En cada zona se muestrearon dos sitios, cultivos tropicales y bosques (húmedos y secos tropicales), tomando cuatro muestras compuestas por diez submuestras aleatorias por sitio, en las que se determinó C total (Ct), C oxidable total (Cox), C hidrolizable con HCl 6N (Ch), C ligado al material húmico (Cp) mediante extracción con pirofosfato sódico y C no oxidable (Cnox) o C recalcitrante calculado como la diferencia Ct-Cox. El C total almacenado (Cta) por unidad de superficie se calculó teniendo en cuenta la densidad aparente (Da) y la profundidad de muestreo. Se encontraron diferencias estadísticas significativas por el efecto de las zonas, los valores mayores en porcentaje de Nt (0.32), Ct (3.90), Cox (3.85), Ch (2.05) y Cp (1.15) y Cta (109 Mg ha<sup>-1</sup>) se presentaron en los suelos de bosque húmedo de la zona 1, siendo la de mayor altitud (956 m), precipitación (2000 mm) y menor temperatura (24 °C). Para el factor usos del suelo solo presentaron diferencias significativas las propiedades: Nt, Ct, Cox y Ch. Los valores de las formas de C más estables para

los suelos de bosques, superaron los de los suelos de cultivo, en este contexto, Cox y Cnox representaron 95% y 5% del Ct, respectivamente. Se observó en promedio una pérdida de 26% del Ct en suelos de cultivo, en comparación con los suelos de bosques. El uso y manejo de los suelos cultivados en comparación a los suelos de bosque, influyó de manera negativa en los contenidos de las formas de C más estables.

**Palabras clave:** formas de carbono, fijación de carbono, almacenamiento de carbono.

### SUMMARY

Land use change and management can affect the soil's ability to capture carbon; the magnitude of these changes is unknown in the northern region of the Magdalena Department, Colombia. For this reason, we studied the relationship of the different land uses to contents and forms of carbon in six soil and climate zones in northern Magdalena, Colombia, with altitudes between 5 and 956 m, average temperatures between 24 and 30 °C, and average rainfall between 663 and 2000 mm. In each area, two sites were sampled: tropical crops and forests (Humid and Dry Tropical). Four samples consisting of ten random subsamples per site were taken. In each subsample, we determined total C (Ct), oxidizable C total (Cox), hydrolizable C with 6N HCl (Ch), C linked to humic material (Cp) by extraction with sodium pyrophosphate, rust free C (Cnox) or recalcitrant C calculated as the difference between Ct-Cox, total stored C (Cta) per unit of surface area, which is calculated by taking into account bulk density (Da) and sampling depth. Statistically significant differences were found for the effect of area; the highest percentages of Nt (0.32),

#### Cita recomendada:

Vásquez Polo, J. R. y F. Macías Vázquez. 2017. Fraccionamiento químico del carbono en suelos con diferentes usos en el departamento de Magdalena, Colombia. *Terra Latinoamericana* 35: 7-17.

Recibido: febrero de 2016. Aceptado: noviembre de 2016.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 35: 7-17.

Ct (3.90), Cox (3.85), Ch (2.05) and Cp (1.15) and Cta (109 Mg ha<sup>-1</sup>) were found in soils of humid forest zone 1 with the highest altitude (956 m), precipitation (2000 mm) and the lowest temperature (24 °C). Land uses showed significant differences only for NT, CT, Cox, and Ch. The values of the more stable forms of C of forest soils exceeded those of crop soils. Cox and Cnox accounted for 95% and 5% of Ct, respectively, for the different land uses; an average loss of 26% of Ct was observed in cultivated soils as compared with forest soils.

**Index words:** carbon forms, carbon fixation, carbon stocks.

## INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo (MOS) es termodinámicamente inestable bajo condiciones óxicas; su presencia en los suelos está explicada por la existencia de condiciones no ideales o de cinética oxidativa y metabólica ralentizada, de tal forma que el carbono (C) no es oxidado a CO<sub>2</sub> (Albaladejo *et al.*, 2013). La mayor reserva de C terrestre activo se encuentra en el suelo (Schlesinger y Bernhardt, 2013), con una cifra estimada de 2500 Pg de C a 1 m de profundidad, comparado con 620 Pg de la biota terrestre y detritos, 780 Pg contenidos en la atmósfera y 39 000 Pg contenido en los océanos (Lal, 2010).

El aumento progresivo de la población mundial, proyectado en 9.2 billones para el año 2050, ha dado lugar a la conversión en gran escala de ecosistemas naturales a uso agrícola de la tierra; dicha conversión ha significado grandes emisiones de C a la atmósfera; los terrenos agrícolas contienen de 25 a 75% menos C orgánico (COS) que sus homólogos de los ecosistemas naturales (Lal, 2010). Las tasas actuales de pérdida de C debido al cambio en el uso del suelo son aproximadamente 1.6 ± 0.8 Pg C año<sup>-1</sup>, cuyo efecto ocurre en los trópicos de manera más significativa (Smith, 2008). El uso tradicional del suelo y su gestión, han definido un gran sumidero de C, estimado entre 50 a 100 Pg C en todos los suelos del mundo; no obstante, la restauración ecológica de la biosfera terrestre puede transferir algunas de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la atmósfera al stock de C terrestre y compensar también las emisiones antropogénicas (Lal, 2014). El stock de COS es extremadamente sensible a las perturbaciones tales como cambios en el uso del suelo,

drenaje, labranza convencional y erosión. Por lo tanto, la adopción de prácticas sostenibles en el uso y manejo de los suelos son esenciales para minimizar la pérdida de C fijado en los suelos (Lal, 2014).

Gran parte de las emisiones de C a la atmósfera provienen de la deforestación. De acuerdo con los datos correspondientes al período 2002 al 2011 del IPCC (2013), se estima que anualmente se pierden por deforestación 13 millones de hectáreas de bosques tropicales, principalmente en Latinoamérica, lo cual produce globalmente una pérdida neta promedio de 0.9 Pg C año<sup>-1</sup> (1 Pg = 1015 g). El estudio del ciclo global del carbono (C) es prioritario para entender las consecuencias del incremento acelerado de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, así como para diseñar estrategias a fin de reducir sus emisiones (Montaño *et al.*, 2016). Los esfuerzos se han dirigido a estimar el contenido de C en los principales reservorios de los ecosistemas y los factores que determinan su almacenamiento y dinámica (Quéré *et al.*, 2014).

En Colombia, los suelos dedicados a la agricultura convencional contienen de 1 a 3% de COS, mientras que los suelos de pastos y bosques por lo común contienen valores mayores (Mosquera, 2012). Guo y Gifford (2002) resaltaron la influencia que tenía el uso del suelo sobre los contenidos de COS; dichos autores, después de revisar 74 publicaciones, encontraron que los cambios de praderas a bosques artificiales, incluyendo plantaciones forestales, representaban pérdidas de 10% del C inicial, de bosques nativos a bosques artificiales pérdidas de 13%, de bosques nativos a cultivos pérdidas de 42% y de praderas a cultivos pérdidas de 59% en el COS. En este contexto, la conversión de los usos del suelo a cultivos o monocultivos resultan casi siempre en pérdidas del COS (Stockmann *et al.*, 2013).

El suelo puede actuar como un potencial sumidero de carbono, la acumulación de formas estables de C en el suelo depende de varios factores entre ellos el grado de complejidad de las moléculas húmicas (recalcitrancia bioquímica), su posición en los agregados del suelo (protección física) y el modo de asociación con metales y minerales edáficos secundarios (estabilización química); considerando estos mecanismos se ha comprobado que en muchos suelos hay formas de C no oxidables, incluso escapan a la oxidación con la técnica del dicromato en medio ácido y caliente. La aparición del “black carbón” y de estas formas recalcitrantes de C ponen en entre dicho que los datos del método de oxidación con dicromato sean los adecuados para



calcular el sumidero total de C de los suelos y obligan a determinarlo por un método de mayores garantías como serían los de combustión a más de 1000 °C y en corriente rica en O<sub>2</sub> determinando el C total a partir del CO<sub>2</sub> desprendido. La diferencia entre el C total así obtenido y el C obtenido por oxidación ácida en caliente (Cox) podría utilizarse como una estimación del C no oxidable o más recalcitrante, llevando así una diferenciación de formas importantes desde el punto de vista del forzamiento climático (Macías *et al.*, 2004).

Si la oxidación de la materia orgánica es una técnica que aprovecha su inestabilidad termodinámica, pueden realizarse otras determinaciones de formas de C basadas en propiedades diferentes. De esta manera, puede determinarse el C soluble en agua a diferentes temperaturas (Ghani *et al.*, 2003); el C presente en la biomasa microbiana (Vance *et al.*, 1987); el C metabolizable a diferentes condiciones de humedad (respirometrías), que puede obtenerse con los nutrientes actualmente existentes (C metabolizable actual) o añadiendo nutrientes lábiles que incentiven el metabolismo de otras formas menos asimilables (C cometabolizable); el C hidrolizable en diferentes condiciones de pH (Parsons, 1989); el C mineralizado en tiempos de incubación determinados, con o sin adición de nutrientes; el C extraíble con diferentes agentes complejantes, como el C pirofosfato (Macías *et al.*, 2004), que normalmente se considera equivalente al C humificado, y formas de C oxidables, que pueden obtenerse mediante agentes oxidantes con diferente capacidad oxidativa, p. ej: tetróxido de rutenio (Griffith *et al.*, 1989). Tales agentes pueden incluir KMnO<sub>4</sub> en diferentes concentraciones (Tirol- Padre y Ladha, 2004; diferentes condiciones de ataque con K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, oxidación con perboratos, persulfatos, hipoclorito, ozono, radicales OH<sup>-</sup> y otros, desde los más fácilmente oxidables hasta los no oxidables (Macías *et al.*, 2004).

Mediante este trabajo se propuso evaluar la variación de los almacenes de C en sus distintas formas, asumiendo como hipótesis que el COS es afectado por los cambios en el uso del suelo, sin dejar de lado las pérdidas de C en suelos dedicados tradicionalmente a la agricultura intensiva.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó al noreste del departamento de Magdalena (Figura 1), región considerada de alta tradición y vocación agropecuaria,

con una importante área sembrada con cultivos de trascendencia económica para Colombia (IGAC, 2009).

Se realizó un muestreo aleatorio estratificado, con un diseño completamente al azar y un arreglo factorial con 2 factores, (1) zonas edafoclimáticas, con 6 niveles y (2) usos del suelo, con 2 niveles; en cada zona se seleccionaron dos sitios de muestreo, uno de cultivo y el otro en área de bosque, excepto en zona 4, donde se muestrearon 3 sitios (Cuadro 1). En cada sitio se tomaron cuatro muestras de suelos compuestas por 10 submuestras tomadas aleatoriamente en campo a profundidad 0 a 20 cm (Brady y Weil, 2002). La descripción de cada zona se llevó a cabo teniendo en cuenta el paisaje, clima ambiental, tipo de relieve y clasificación de suelos (Cuadro 1), descritos en el estudio de suelos y clasificación de tierras del departamento de Magdalena y Guajira, Colombia (IGAC, 2009).

**Análisis del Carbono y Nitrógeno.** El C total (Ct) y N total (Nt) se determinaron mediante un analizador LECO (Modelo CHN-1000, LECO Corp., St Joseph, MI), para las formas oxidables de carbono presentes en el suelo se utilizó la metodología descrita por Macías *et al.* (2004); C oxidable total (Cox) mediante la técnica Walkley y Black (1934) en caliente (105 °C), C hidrolizable con HCl 6N (Ch) descrito por Tan y Lal (2005); C humificado, ligado al material húmico (Cp)

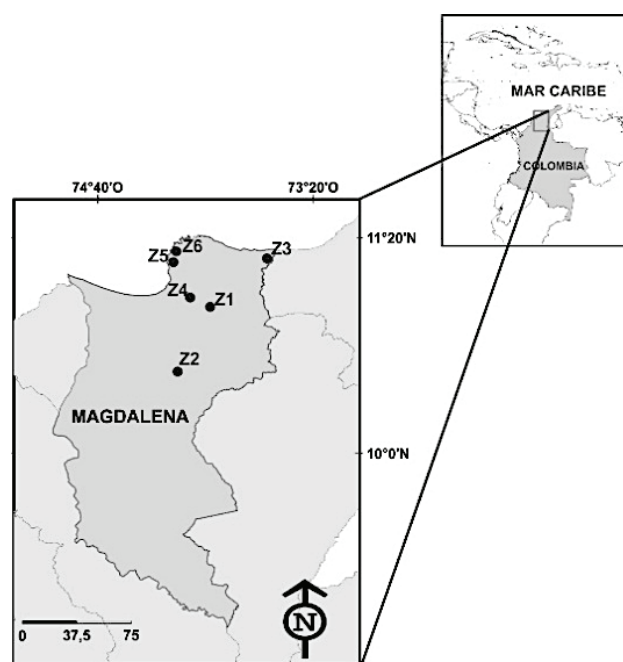


Figura 1. Localización del área de estudio.

**Cuadro 1. Descripción edafoclimática de las zonas de estudio.**

Zonas	Sitios de muestreo	Uso del suelo	Clima	Clasificación de suelos	Paisaje y material parental
1	1	Cultivo de café con sombra, anteriormente bosque húmedo tropical	Cálido húmedo; Altitud 956 m; P 2000 mm; ETP 990 mm; T 24 °C	Typic Eutrodepts Údico Isohipertérmico Cambisol Háplico	Paisaje de montaña; Ladera; MP: esquistos
	2	Bosque húmedo tropical			
2	1	Cultivado hace más de 20 años con palma africana, actualmente se le dá un manejo orgánico al cultivo y se alterna con leguminosas como cobertura para el suelo.	Cálido seco; Altitud 42m; P 1200 mm; ETP 1690 mm; T 28.4 °C	Typic Ustifluvents Ústico Isohipertérmico Fluvisol Háplico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos aluviales
	2	Bosque seco tropical secundario			
3	1	Suelo arado al momento del muestreo para la siembra de banano, anteriormente sembrado con arroz.	Cálido seco; Altitud 5 m; P 1245 mm; ETP 1739 mm; T 27 °C	Fluventic Haplustepts Ústico Isohipertérmico Cambisol Fluvéntico	Paisaje de planicie; MP: depósitos clásticos
	2	Bosque seco tropical			
4	1	Cultivo de banano tradicional, anteriormente bosque seco tropical	Cálido seco; Altitud 15 m; P 750 mm; ETP 1890 mm; T 27.5 °C	Typic Haplustolls Ústico Isohipertérmico Phaozem Háplico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos aluviales medios
	2	Cultivo de mango hace más de 15 años.			
	3	Bosque seco tropical secundario			
5	1	Tradicionalmente sembrado con frutales de clima cálido, anteriormente bosque seco tropical.	Cálido muy seco; Altitud 10 m; P 880 mm; ETP 1910 mm; T 30 °C	Fluventic Haplustepts Ústico Isohipertérmico Cambisol Fluvéntico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos fluviomarinos
	2	Bosque muy seco tropical			
6	1	Hortalizas de clima cálido, anteriormente sembrados de maíz y sorgo.	Cálido muy seco; Altitud 7 m; P 663 mm; ETP 1986 mm; T 29 °C	Typic Ustipsamments Ústico Isohipertérmico Arenosol Háplico	Paisaje de planicie; MP: sedimentos fluviomarinos
	2	Bosque muy seco tropical			

T = temperatura media anual; P = precipitación media anual; ETP = evapotranspiración potencial; MP = material parental.

mediante extracción con pirofosfato sódico (Velasco *et al.*, 2010), para determinar los elementos metálicos por absorción atómica y el C digerido en solución ácida con dicromato potásico y cuantificado por valoración. A su vez, la fracción de C no oxidable (C<sub>nox</sub>) fue

calculada por la diferencia Ct-Cox; los contenidos de C total (C<sub>t</sub>) por unidad de área se calcularon mediante la siguiente Ecuación 1:

$$C_{ta} = C_t * D_a * Prof \quad (1)$$

donde: Cta representa el almacenamiento de C en  $\text{kg m}^{-2}$ ; Ct es C total en  $\text{g kg}^{-1}$ ; Da es densidad aparente expresada en  $\text{g cm}^{-3}$  y prof es la profundidad de muestreo expresada en m.

**Análisis de la información.** Para cada una de las propiedades evaluadas se estimaron los parámetros de tendencia central y de dispersión o variabilidad, con el fin de identificar aquellas variables con mayor poder de discriminación en relación al uso del suelo y zonas edafoclimáticas. Los valores de densidad aparente se determinaron por el método del cilindro, excepto en el sitio de cultivo de la zona 6, donde se aplicó adicionalmente el procedimiento del terrón parafinado (IGAC, 2006). Se realizó un ANOVA factorial para establecer diferencias estadísticamente significativas entre zonas de muestreo, usos del suelo y su interacción. (Programa SPSS versión 22 de 2015).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características de los Suelos Estudiados

Se presentó un color en húmedo con matiz de 2.5YR en suelos de cultivo para las zonas 2, 3 y 5 y en suelos de bosque zona 4; matiz de 10 YR en todos los suelos de bosque excepto zona 4; correspondiendo a colores rojo-amarillentos oscuros, típicos de los horizontes superficiales influenciados por la presencia de pequeñas cantidades de materia orgánica. En relación a la textura, predominó la clase franco arcillo arenosa, con mayor porcentaje de la fracción arena, tanto para suelos de cultivo como para suelos de bosque. Los valores promedio obtenidos fueron de 1.35 y 1.43  $\text{g cm}^{-3}$  para suelos de bosques y cultivo respectivamente (Cuadro 2), considerados normales a ligeramente altos para suelos de textura media (Malagón, 2003). Sin embargo, los valores mayores se presentaron en los suelos de cultivo, donde se expresó el efecto del laboreo de los suelos mediante el aumento de su densidad aparente, la cual se considera una propiedad sensible al cambio de uso.

Los valores promedio y las respectivas desviaciones estándares de las variables analíticas y formas de C determinadas en muestras de las zonas de muestreo se presentan en el Cuadro 2. La media del pH en los suelos cultivados fue 6.9 y de 7.1 para bosques, siendo la zona 1 (Cuadro 1) la que presentó los valores menores de pH, de 5.6 y 6.5 respectivamente, marcados por la diferencia de altitud, pluviosidad y topografía del

terreno, acorde a lo descrito en el Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Magdalena (IGAC, 2009), para los suelos de montaña ubicados en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta. En contraste con la zona 6, se observaron valores promedio de pH = 8.6 para suelos de cultivos y de 8.7 para suelos de bosques. Lo anterior se asocia con una alta saturación de bases en el complejo de cambio de los suelos estudiados, donde Ca es el catión dominante, el cual condiciona numerosos procesos fisicoquímicos (Vásquez *et al.*, 2010). Por otro lado, se determinó una saturación media de 68 y 64% para los suelos de cultivo y bosques, respectivamente. Se detectaron diferencias estadísticas significativas entre zonas, a excepción de los contenidos de limo, destacando el efecto marcado de las condiciones edafoclimáticas (precipitación y temperatura, (Cuadro 1) propias de cada zona sobre las propiedades del suelo. El pH presentó diferencias significativas, detectándose evidencias del efecto de las labores de cultivo sobre la dinámica de dicha propiedad en los suelos estudiados (Jiménez *et al.*, 2010). La relación C/N presentó valores promedio de 10.7 para cultivos y de 11.4 en suelos de bosques, excepto zona 1 con valor medio de 12.5 en suelos de bosque y 9.8 en zona 3 suelo de cultivo; dichos valores bajo las condiciones del clima cálido tropical predominante hacen prevalecer los procesos de mineralización frente a los de humificación de la MOS (Vásquez *et al.*, 2011).

### Análisis de las Formas y Contenidos de Carbono (C)

El análisis de correlación de Pearson entre las propiedades físicas y químicas de los suelos con las formas de C, observó una interacción significativa positiva entre los contenidos de Ca total y las formas Ct ( $P = 0.016$ ) y Cox ( $P = 0.024$ ), lo que muestra la relevancia de dicho elemento en la estabilización de C en los suelos de estudio, lo que refleja su capacidad floculante (Almendros, 2004). De igual manera, los contenidos de N total (Nt) presentaron alta significancia y se relacionaron positivamente con las diferentes formas de C, lo cual evidencia una estrecha relación con compuestos nitrogenados, especialmente con el Ch ( $r = 0.94$ ), que en gran parte representa el C asociado a proteínas, acorde a lo descrito por Von Lützwow *et al.* (2007). En contraste, se observó que el sodio (Na) total se correlaciona significativamente y con signo negativo con las formas de C, lo que explica que altos contenidos de Na tienden a dispersar la materia orgánica y a

**Cuadro 2. Valores medios y las desviaciones estándares de las variables analíticas y formas de carbono determinadas en muestras de las diferentes zonas de estudio.**

Propiedades	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Media	CV	DS
Cultivo									
Da	1.49 ab	1.4 bcd	1.25 de	1.57 a	1.43 bc	1.45 abc	1.45	8.8	0.13
pH	5.6 d	6.3 cd	6.5 cd	7.1 bc	7.1 bc	8.6 a	6.86	13.47	0.93
Nt (%)	0.23 abc	0.12 c	0.13 bc	0.17 bc	0.13 c	0.12 c	0.15	32.95	0.05
Ct (%)	2.61 abc	1.343 c	1.29 c	1.84 bc	1.28 c	1.28 c	1.61	37.84	0.62
Ch (%)	1.43 abc	0.79 c	0.66 c	0.88 c	0.74 c	0.79 c	0.88	36.86	0.32
Cp (%)	0.81 abc	1.00 ab	0.59 bcd	0.53 cd	0.18 d	0.45 cd	0.59	48.98	0.28
Cnox (%)	0.05 a	0.04 a	0.14 a	0.10 a	0.06 a	0.02 a	0.06	157.5	0.12
Cox (%)	2.57 abc	1.307 c	1.15 c	1.74 bc	1.23 c	1.26 c	1.54	40.26	0.63
C/N	11.5 a	11.3 a	9.8 a	10.9 a	10.3 a	10.5 a	10.69	11.87	1.27
Bosque									
Da	1.4 bcd	1.33 cde	1.19 e	1.46 abc	1.35 bcd	1.36 bcd	1.35	7.21	0.1
pH	6.5 cd	5.6 d	7.0 bc	7.8 ab	7.1 bc	8.7 a	7.13	15	1.07
Nt (%)	0.32 a	0.17 bc	0.14 bc	0.15 bc	0.25 ab	0.15 bc	0.19	44.11	0.08
Ct (%)	3.90 a	1.64 bc	1.72 bc	1.76 bc	3.26 ab	1.62 bc	2.32	55.6	1.29
Ch (%)	2.05 a	0.93 bc	0.88 bc	0.82 c	1.81 ab	0.87 c	1.23	55.42	0.68
Cp (%)	1.15 a	0.633 bcd	0.67 bc	0.34 cd	0.78 abc	0.49 cd	0.68	51.96	0.35
Cnox (%)	0.05 a	0.02 a	0.09 a	0.13 a	0.04 a	0.10 a	0.07	109.06	0.07
Cox (%)	3.85 a	1.62 bc	1.64 bc	1.63 bc	3.22 ab	1.52 bc	2.25	58.14	1.3
C/N	12.5 a	9.75 a	11.8 a	12.0 a	12.5 a	10.3 a	11.46	19.25	2.25

CV = coeficiente de variación; DS = desviación estándar; medias con distintas letras entre filas y columnas son diferentes entre sí: Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Da = densidad aparente; Nt = nitrógeno total; Ct = carbono total; Ch = carbono hidrolizable; Cp = carbono pirofosfato; Cnox = carbono no oxidable.

dificultar la producción de biomasa y necromasa. Por otro lado, los suelos con pH mayores a 7.5 encontrados en las zonas 4 y 6 observaron los menores contenidos de carbono total. (Cuadro 2).

A excepción del Cnox y la relación C/N, las demás formas de C estudiadas presentaron diferencias estadísticamente significativas entre zonas; los mayores contenidos se encontraron en los suelos de bosques de la zona 1 (Cuadro 2), donde las condiciones edafoclimáticas favorecen las entradas de la MO al suelo (Vásquez *et al.*, 2011). Para el factor usos del suelo, solo se detectaron diferencias significativas en las variables Nt, Ct, Cox y Ch; la tendencia global sugiere que los valores de las formas de C para los suelos de bosques superaron los de suelos de cultivos, en contraste con los datos de la zona 4, donde los porcentajes de Ct, Cox, Ch y Cp de los suelos de cultivos superaron a

los obtenidos en los suelos de bosques. Lo anterior se debe posiblemente al manejo agronómico del cultivo de banano, que implica un aporte alto de material vegetal con una baja relación C/N, asimismo, al cultivo de mango, en el cual la hojarasca depositada en la superficie del suelo afecta notablemente la dinámica de descomposición de la MO. Los valores de Cnox para la zona 4 fueron mayores en los suelos de bosques, comprobando su efectividad para la captura de C, aunque es previsible el consecuente deterioro de la misma por el cambio en el uso del suelo (Cuadro 2).

La concentración de C total estuvo por debajo del 3% en los suelos de cultivo y bosque de las zonas 2, 3, 4 y 6 (Cuadro 2); sólo los suelos con vegetación de bosque húmedo de la zona 1 y del bosque seco en la zona 5 superaron el 3% de C total, valor que se considera es el mínimo para disponer de una adecuada estabilidad



**Cuadro 3. Almacenamiento de las diferentes formas de C (Mg ha<sup>-1</sup>) a 20 cm de profundidad.**

Formas de C	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Media
Cultivo							
Ct	78.1	37.6	32.1	58.0	36.6	36.9	46.6
Ch	42.8	22.2	16.5	27.6	21.0	22.8	25.5
Cp	24.1	28.1	14.7	16.7	5.1	13.0	16.9
Cnox	1.3	1.0	3.4	3.1	1.6	0.5	1.8
Cox	76.8	36.6	28.7	54.8	35.0	36.4	44.7
Bosque							
Ct	109.1	43.7	40.9	51.1	88.1	43.8	62.8
Ch	57.4	24.8	20.9	23.9	48.8	23.5	33.2
Cp	32.2	16.9	15.8	10.0	21.1	13.2	18.2
Cnox	1.5	0.5	2.0	3.6	1.1	2.6	1.9
Cox	107.6	43.2	39.0	47.5	87.0	41.2	60.9

Ct = carbono total; Ch = carbono hidrolizable; Cp = carbono pirofosfato; Cnox = carbono no oxidable; Cox = carbono oxidable total.

estructural, según la Estrategia Europea de Protección del Suelo (Macías *et al.*, 2004). Al considerar dichos valores dentro del contexto de los suelos colombianos y según el IGAC (2009) quien estableció como rangos medios de C para el clima cálido valores entre 1.5 y 2% resultan no ser excesivamente bajos, aunque sí hacen evidentes los problemas de erosión, baja capacidad de intercambio y baja retención de humedad que pueden aparecer asociados a las pocas entradas de materiales orgánicos y a las altas tasas de mineralización de la materia orgánica en estos suelos, asimismo, la escasa relevancia de estos ecosistemas, incluyendo los naturales, como sumideros de C.

Los contenidos de Ct en relación a los usos del suelo fueron significativamente diferentes ( $P \leq 0.05$ ) (Cuadro 2), con excepción de la zona 4, con cultivo de banano y mango, cuyo valor de Ct (1.84%) fue superior al de los suelos de bosques para la misma zona (1.76%). Dicho incremento en el cultivo del banano y mango puede explicarse por la cantidad importante de aportes de material orgánico que se realizan en estos cultivos. Al respecto, los resultados deben ser tomados en cuenta en la gestión agronómica, hacen evidente que las adiciones de residuos verdes en los suelos cultivados permite mantener e incluso aumentar ligeramente el sumidero de C en las condiciones semiáridas. En sentido negativo, también ponen de manifiesto que determinadas actuaciones, como las que se han llevado

a cabo en la transformación en cultivo de frutales (zona 5), pueden reducir drásticamente (50 a 60%) el contenido de C en los primeros 20 cm de suelo. Un estudio más específico de la historia del cultivo en esta zona permitirá elaborar recomendaciones que eviten procesos de degradación.

Respecto a las formas de C, se observó escaso C recalcitrante; en los suelos de bosques, el porcentaje de esta forma de C de elevada persistencia, equivalente al black carbón, representa 1 a 7% con máximo en el bosque seco de la zona 4, mientras que en los suelos cultivados representa de 1 a 11%, con máximo en el suelo arado para siembra de banano en la zona 3. En la mayor parte de los suelos el C recalcitrante suele formarse a través de los incendios de alta intensidad, por medio de transformaciones pirolíticas que incrementan la concentración de moléculas aromáticas, aunque otros procesos pueden estar implicados. El bajo porcentaje de esta fracción tiene consecuencias importantes, toda vez que el C recalcitrante es relativamente inerte frente al metabolismo y la oxidación, aunque ejerce importantes actuaciones físico-químicas dentro del suelo por su capacidad de retención de agua, iones, nutrientes, contaminantes, su integración con la actividad biótica y la formación de agregados estables (Macías *et al.*, 2004).

El C oxidable es la fracción que representa 90% o más del C total. Es cierto que el método de oxidación utilizado es el más drástico en capacidad

oxidativa ( $K_2Cr_2O_7$  en medio ácido y caliente, con un  $Eh > 1000$  mvol) y que dichas condiciones no se pueden producir en los suelos por lo que este elevado porcentaje no refleja adecuadamente el comportamiento de la materia orgánica de los suelos frente a los procesos oxidativos y metabólicos que se producen en ellos. Aun así, resulta evidente que el método oxidativo proporciona un valor útil para la estimación del C total y que en condiciones drásticas prácticamente toda la materia orgánica podría ser oxidada o metabolizada.

El Ch en HCl 6N el cual remueve eficientemente el C asociado a carbohidratos, proteínas, hemicelulosa y a complejos órgano-minerales, representó el 60% del Cox en suelos de cultivo y 57% en suelos de bosques, lo cual coincide con los valores publicados por Stevenson (1994) y Paul *et al.* (2006), quienes reportaron que el Ch con HCl 6N representa de 30 a 87% del COS. Al tomar en cuenta las formas de C representadas por el Ch y los porcentajes citados anteriormente, para suelos de cultivo y bosques, puede afirmarse que los suelos de bosques poseen un mayor porcentaje de C asociado a formas de menor labilidad, posiblemente porque están presentes mayores cantidades de formas con mayor estabilidad biológica, lo cual incluye materiales con grupos alquilos, arilos, lignina y celulosa cristalina (Von Lützów *et al.*, 2007). El Ch representa cifras alrededor de 50% del Ct en ambos tipos de usos (47 a 57% en suelos de bosque y 48 a 62% en los cultivados), de formas de C correspondientes al Ch de carbohidratos y proteínas, es decir, fundamentalmente ligado a las formas orgánicas más abundantes en la necromasa fresca, las cuales son rápidamente metabolizables, lo que sugiere un valor alrededor del 40% como estimación de las formas más difícilmente metabolizables y oxidables.

Finalmente, el porcentaje de Cp, que suele identificarse con el C humificado existente, se ubicó de 19 a 31% del Ct en los suelos con vegetación natural y más variable en los cultivados (14-71%), siendo mínimo en el cultivo de frutales y máximo en el de palma, lo que se relaciona con las diferencias de aporte y humificación existentes entre dichos sistemas. Se presentaron valores bajos de Cp, lo que insinúa poca formación de complejos orgánicos, al parecer debido al predominio de humus joven con baja capacidad para la formación de complejos (Shoji y Fujiwara, 1984).

En general, los resultados obtenidos coinciden con estudios de Moreno y Lara (2003) en Colombia, quienes

trabajaron en Inceptisoles y Entisoles del departamento de Antioquia. Dichos autores encontraron que el COS de los bosques primarios fue superior al de suelos de áreas intervenidas y de los bosques secundarios. Sin embargo, en estudios realizados por Carvajal *et al.* (2009), quienes estudiaron suelos con diferentes usos en paisajes andinos colombianos, mostraron una tendencia diferente en diferentes perfiles (0-30cm). Observaron que los suelos presentaron ganancias en el almacenamiento de C cuando las coberturas vegetales naturales, a partir de relictos de selva, se transformaron en cultivos, principalmente de café y plátano, mientras que se notaron disminuciones considerables cuando los cultivos se convirtieron en pastizales.

### Acumulación de Carbono

Se muestra, en el Cuadro 3, la tendencia de almacenamiento de las distintas formas de C a 20 cm de profundidad en las diferentes zonas, al tomar en cuenta los usos del suelo.

La acumulación media de las formas de C estudiadas presentó mayores valores en los suelos de bosques, comparados con suelos de cultivo para una misma zona; con valores medios de Ct en suelos de bosque alrededor de los 63 Mg ha<sup>-1</sup>, por debajo de los 99 Mg ha<sup>-1</sup> planteados en el estudio de Lorenz y Lal (2014) de estimación media del COS para diferentes biomas en el mundo. No obstante, en la zona 4 los valores de Ct, Ch, Cox y Cp fueron mayores en los suelos de cultivo, debido posiblemente al intenso retorno de material vegetal al suelo en el manejo agronómico del cultivo de banano. Ridley *et al.* (1990), en Australia encontraron 150% más de C en suelos de cultivo respecto a suelos nativos; tales situaciones aparentemente anómalas, en las que el sistema más intensificado agronómicamente contiene más C, pueden producirse por causas específicas de manejo que incrementan el retorno de mayores cantidades de biomasa y necromasa al suelo, sea por un aporte externo o por un incremento de la producción asociado a la aplicación de fertilizantes. Lo anterior concuerda con las observaciones de Ibrahim *et al.* (2007), quienes encontraron que niveles de C en suelos con praderas nativas fueron superados por los cultivados en la zona; en el mismo sentido, Mosquera *et al.* (2012) encontraron almacenes de C mayores en suelos de pradera que en suelos forestales nativos en la Amazonía colombiana. En el presente estudio,

las formas de C más estables fueron siempre mayores en suelos de bosques, que tienen mayor capacidad natural para capturar y estabilizar más C (Macías *et al.*, 2004).

Las condiciones climáticas de la zona 1, en particular las diferencias derivadas de la mayor altitud sobre el nivel del mar con relación a las demás zonas de muestreo (Cuadro 1), condicionaron la mayor acumulación de C, acorde a lo descrito por Malagón *et al.* (2003) y en concordancia con lo expuesto por Carvajal *et al.* (2009). La mayor acumulación de la forma de C ligada a la fracción húmica (Cp) se presentó en la zona 2, donde prospera el cultivo de Palma Africana (Cuadro 1) influenciado por el manejo orgánico asociado al cultivo, con un alta adición de formas lábiles de C; dicho a su vez este cultivo presentó la menor capacidad para capturar C recalcitrante expresado por la baja acumulación de la forma Cnox.

El análisis interior de cada zona permitió establecer las pérdidas de Ct en relación al cambio de uso del suelo, tomando como referencia el C almacenado en los suelos de bosques. Six *et al.* (2002) analizaron el concepto de “saturación de C” introducido por Hassink (1997), al considerar que los niveles naturales de C de los suelos reflejan el balance de ganancias y pérdidas de C teniendo en cuenta factores como la productividad y los regímenes de humedad y temperatura, no necesariamente representan el límite superior de la capacidad de almacenamiento de C del suelo. Lo anterior significa que “muchos suelos, si no todos, podrían almacenar más C en forma metaestable del que tienen en condiciones naturales. El Ct y Cox se perdieron en los suelos de cultivo, con relación a los suelos de bosque, en promedio para todas las zonas aproximadamente 16 Mg ha<sup>-1</sup> C, lo cual representa una pérdida de 26%; a su vez, una pérdida media de 7.7 Mg ha<sup>-1</sup> de Ch, que corresponde a un 23.3%. Lo anterior concuerda con lo descrito por Calvo de Anta (1992) en un estudio realizado en suelos de la provincia de Coruña (España), donde se comprobó que los suelos de cultivos tenían pérdidas de C en relación a los suelos de bosque, que oscilaban de 26 a 49%, siendo máximas en los suelos sobre esquistos y anfíbolitas y menores en los de gabros. Se estimaron asimismo pérdidas de 1.2 Mg ha<sup>-1</sup> de Cp equivalentes a 6.8%; pérdidas de Cnox de 0.1 Mg ha<sup>-1</sup> equivalentes a 4% y en relación a la fracción Cdox, pérdidas de 15 Mg ha<sup>-1</sup> o 35% de C. Si se relacionan las pérdidas de C con los suelos cultivados, se observa que el suelo plantado con café presentó pérdidas de 28.4% de Ct, lo cual concuerda

con lo descrito por Hoyos *et al.* (2005); a su vez, el cultivo de la Palma africana indujo pérdidas de 15.3%, mientras que los cultivos de banano y mango experimentaron ganancias de aproximadamente 15% de Ct, Cox, y Ch y d 67% para Cp, aunque para las formas recalcitrantes de Cnox presentaron pérdidas de 13.5%.

## CONCLUSIONES

- La forma oxidable del carbono (C) representó 95% del C total para los diferentes usos del suelo, independiente de la zona edafoclimática. Los almacenes de C disminuyeron de manera directamente proporcional a la altura sobre el nivel del mar, observándose una marcada diferencia entre la zona 1 (956 m de altitud) y las demás zonas estudiadas, ubicadas por debajo de los 42 m de altitud.
- El uso y manejo de los suelos cultivados comparados con los suelos de bosques, influyó negativamente en los contenidos de las formas de C más estables, toda vez que en promedio se detectaron pérdidas de C total alrededor de 26%. Es importante conseguir un incremento de las formas humificadas siguiendo el modelo de gestión del cultivo de palma, en general es posible incrementar el contenido de C total y el de todas las formas de C; el modelo del suelo cultivado con banano y mango puede ser utilizado como referencia. Es conveniente incrementar el C recalcitrante en los suelos cultivados.

## AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de Santiago de Compostela (España), por su apoyo logístico, técnico y humano. A la Universidad del Magdalena por su apoyo a través de los recursos de capacidad instalada y tiempo asignado para el desarrollo de la investigación.

## LITERATURA CITADA

- Albaladejo, J., R. Ortiz, N. Garcia-Franco, A. Ruiz-Navarro, M. Almagro, J. Garcia-Pintado, and M. Martínez-Mena. 2013. Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain. *J. Soils Sedim.* 13: 265-277.
- Almendros, C. 2004. Investigaciones básicas sobre el origen y la estructura molecular de las formas estables de materia orgánica relacionadas con el proceso de secuestro de carbono en los suelos. *Edafología* 11: 229-249.

- Brady, N. and R. Weil. 2002. The nature and properties of soils. Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Calvo de Anta, R., F. Macías y A. Riveiro. 1992. Aptitud agronómica de los suelos de la provincia de La Coruña (Cultivos, Pinos, Robles, Eucaliptos y Castaños). (Mapa escala 1:200.000). Diputación Provincial de La Coruña. España.
- Carvajal, A. F., A. Feijoo, H. Quintero y M. A. Rondón. 2009. Carbono orgánico del suelo en diferentes usos del terreno de paisajes andinos colombianos. *Rev. Cienc. Suelo Nutr.* 9: 222-235.
- Ghani, A., M. Dexter, and K. W. Perrot. 2003. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biol. Biochem* 35: 1231-1243.
- Griffith, S. M. and M. Schnitzer. 1989. Oxidative degradation of soil humic substances. pp. 69-98. *In*: M. H. B. Hayes, P. MacCarthy, R. L. Malcolm, and R. S. Swift (eds.). *Humic substances II- In search of structure*. Wiley. New York, NY, USA.
- Guo, L. B. and R. M. Gifford. 2002. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biol.* 8: 345-360.
- Hassink, J. 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil* 191: 77-87.
- Hoyos, N. and N. Comerford. 2005. Land use and landscape effects on aggregate stability and total carbon of Andisols from the Colombian Andes. *Geoderma* 129: 268-278.
- Ibrahim, M., C. Cuartas, G. Ponce, V. Vega, F. Casasola y J. Rojas. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería Am.* 45: 27-36.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. IGAC. Bogotá, Colombia. ISBN: 9789589067987.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2009. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Magdalena. IGAC. Bogotá, Colombia. ISBN: 7703476003829.
- Jiménez-Heredia, Y., C. M. Martínez-Bravo y N. J. Mancera-Rodríguez. 2010. Características físicas y químicas del suelo en diferentes sistemas de uso y manejo en el Centro agropecuario Cotové, Santa Fé de Antioquia, Colombia. *Rev. Suelos Ecuat.* 40: 176-188.
- Lal, R. 2010. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *Bioscience* 60: 708-721. doi: 10.1525/bio.2010.60.9.8.
- Lal, R. 2014. World soils and the carbon cycle in relation to climate change and food security. pp. 31-66. *In*: J. Weigelt, A. Müller, C. Beckh, K. Töpfer (eds.). *Soils in the Nexus*. Oekom Verlag, München, Germany. ISBN 978-3-86581-431-9.
- Lorenz, K. and R. Lal. 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34: 443-454. doi: 10.1007/s13593-014-0212-y.
- Macías, F. 2004. Sumideros de carbono para el forzamiento climático antropoceno. Una visión de alternativas de actuación desde la ciencia del suelo. *Edafología* 11: 7-25.
- Macías, F., R. M. Calvo de Anta, L. Lado, R. Verde, X. Pena y M. Camps Arbustain. 2004. El sumidero de carbono de los suelos de Galicia. *Edafología* 11: 341-376.
- Malagon Castro, D. 2003. Ensayo sobre tipología de suelos colombianos; énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 27: 319-341. ISSN 0370-3908.
- Montaño, N. M., F. Ayala, S. H. Bullock, O. Briones, F. García O., R. García S., Y. Maya, Y. Perroni, C. Siebe, Y. Tapia T., E. Troyo y E. Yépez. 2016. Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana* 34: 39-59.
- Moreno, F. H. y W. Lara. 2003. Variación de carbono orgánico del suelo en bosques primarios intervenidos y secundarios. pp. 189-213. *In*: S. A. Orrego, J. I. Del Valle y F. H. Moreno (eds.). *Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: contribuciones para la mitigación del cambio climático*. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ciencias Forestales. CAEMA. Bogotá D.C., Colombia.
- Mosquera, O., P. Buurman, B. L. Ramirez, and M. C. Amezquita. 2012. Carbon stocks and dynamics under improved tropical pasture and silvopastoral systems in Colombian Amazonia. *Geoderma* 189-190: 81-86.
- Parsons, J. W. 1989. Hydrolytic degradations of humic substances. pp. 99-109. *In*: M. H. B. Hayes, P. MacCarthy, R. L. Malcolm, and R. Swift (eds.). *Humic substances II. In search of structure*. Wiley. Chichester. UK.
- Paul, E., S. J. Morris, R. T. Conant, and A. F. Plante. 2006. Does the acid hydrolysis-incubation method measure meaningful soil organic carbon pools? *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1023-1035.
- Quéré, L. C., G. P. Peters, R. J. Andres, R. M. Andrew, T. A. Boden, P. Ciais, P. Friedlingstein, R. A. Houghton, G. Marland, R. Moriarty, S. Sitch, P. Tans, A. Armeth, A. Arvanitis, D. C. E. Bakker, L. Bopp, J. G. Canadell, L. P. Chini, S. C. Doney, A. Harper, I. Harris, J. I. House, A. K. Jain, S. D. Jones, E. Kato, R. F. Keeling, K. Klein Goldewijk, A. Körtzinger, C. Koven, N. Lefèvre, F. Maignan, A. Omar, T. Ono, G.-H. Park, B. Pfeil, B. Poulter, M. R. Raupach, P. Regnier, C. Rödenbeck, S. Saito, J. Schwinger, J. Segsneider, B. D. Stocker, T. Takahashi, B. Tilbrook, S. van Heuven, N. Viovy, R. Wanninkhof, A. Wiltshire, and S. Zaehle. 2014. Global carbon budget 2013. *Earth Syst. Sci. Data* 6: 235-263.
- Ridley, A. M., K. R. Helyar, and W. J. Slattery. 1990. Soil acidification under subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) pastures in North-Eastern Victoria. *Aust. J. Exp. Agric.* 30: 195-201.
- Shoji, S. and Y. Fujiwara. 1984. Active aluminium and iron in the humus horizons of andosols from northeastern Japan: Their forms, properties and significance in clay weathering. *Soil Sci.* 137: 216-226.
- Schlesinger, W. H. and E. Bernhardt. 2013. *Biogeochemistry: Analysis of global change*. Elsevier. Oxford, UK. ISBN: 978-0-12-385874-0.
- Six, J., R. T. Conant, E. A. Paul, and K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241: 155-176.



- Smith, P. 2008. Soil organic carbon dynamics and land-use change. pp. 9-22. *In*: A. K. Braimoh and P. L. G. Vlek (eds.). Land use and soil resources. Springer Netherlands. New York, NY, USA.
- Stevenson, F. J. 1994. Humus chemistry. Genesis, composition, reactions. Wiley. New York, NY, USA. ISBN: 978-0-471-59474-1.
- Stockmann, U., M. A. Adams, J. W. Crawford, D. J. Field, N. Henakaarchchi, M. Jenkins, B. Minasny, A. B. McBratney, V. de R. de Courcelles, K. Singh, I. Wheeler, L. Abbott, D. A. Angers, J. Baldock, M. Bird, P. C. Brookes, C. Chenu, J. D. Jastrow, R. Lal, J. Lehmann, A. G. O'Donnell, W. J. Parton, D. Whitehead, and M. Zimmermann. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agric. Ecosyst. Environ.* 164: 80-99.
- Tan, Z. and R. Lal. 2005. Carbon sequestration potential estimates with changes in land use and tillage practice in Ohio, USA. *Agric. Ecosyst. Environ.* 111: 140-152.
- Tirol-Padre, A. and J. K. Ladha. 2004. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 969-978.
- Vance, E. D., P. C. Brookes, and D. S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 19: 703-707.
- Vásquez Polo, J. R., D. Baena García y J. C. Menjivar Flores. 2010. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia). *Acta Agronóm.* 59: 449-456.
- Vásquez P., J. R., F. Macías V. y J. C. Menjivar F. 2011. Formas de carbono orgánico en suelos con diferentes usos en el departamento del Magdalena (Colombia). *Acta Agronóm.* 60: 369-379.
- Velasco M., M., J. A. Almeida, P. Vidal T. y F. Macias. 2010. Fraccionamiento químico de carbono en Acrisolas con horizontes sómbricos del Sur de Brasil. *Rev. Cienc. Agrarias* 33: 277-286.
- Von Lützow, M., I. Kögel-Knabner, K. Ekschmitt, H. Flessa, G. Guggenberger, E. Matzner, and B. Marschner. 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biol. Biochem.* 39: 2183-2207.

# Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México

## *Estimation of carbon stored in fir and cypress forests in Texcoco, State of Mexico*

Yunuen Bolaños González<sup>1‡</sup>, Martín A. Bolaños González<sup>3</sup>,  
Fernando Paz Pellat<sup>2</sup> y José Ignacio Ponce Pulido<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México- Texcoco. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (yunuenbg90@gmail.com)

<sup>2</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. km 36.5 Carretera México- Texcoco. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

<sup>3</sup> Programa Mexicano del Carbono. Chiconautla No.8, Col. Lomas de Cristo. 56225 Texcoco, Estado de México, México.

### RESUMEN

Las emisiones de carbono (C) a la atmósfera, así como sus reservorios, en el sector de agricultura, silvicultura y otros usos del suelo son significativas en el balance global del ciclo del carbono; sin embargo, a pesar de esta importancia, es el sector con la mayor incertidumbre en el balance global debido principalmente a la falta de conocimiento preciso de los factores de emisión, por lo que se requiere mayor investigación en el tema. Debido a lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo estimar el C almacenado en los cinco depósitos considerados en ecosistemas forestales: biomasa viva sobre el suelo, biomasa viva debajo del suelo, madera muerta sobre el suelo, mantillo y carbono orgánico del suelo (COS) en dos sitios de muestreo ubicados en las faldas del Monte Tláloc, Texcoco, Estado de México: el primero en un bosque de oyamel (*Abies religiosa*) y el segundo en un bosque de ciprés (*Cupressus lusitanica*). El promedio de la densidad de carbono en el bosque de oyamel en los cinco depósitos estimados fue de 376 Mg ha<sup>-1</sup>, siendo el depósito más importante el de biomasa aérea (59%), seguido del COS (22%); en tanto que en el bosque de ciprés fue de 205 Mg ha<sup>-1</sup>, siendo el depósito con mayor densidad el COS (50%), seguido de biomasa aérea (36%). Los valores de densidad de carbono para biomasa aérea en el caso de bosque de oyamel fueron superiores a los reportados en otros trabajos; lo cual se explica por la existencia de árboles de grandes dimensiones de esta especie en el sitio de muestreo, lo cual nos da una idea precisa del potencial como almacén de carbono que este tipo de vegetación tiene cuando llegan a estados maduros.

**Palabras clave:** depósitos de carbono, biomasa, *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*.

### SUMMARY

Carbon emissions (C) to the atmosphere, as well as their reservoirs, in the sector of agriculture, forestry and other land uses are significant in the global carbon budget. However, despite their importance, it is the sector with the greatest uncertainty in the global budget due mainly to the lack of precise knowledge of emission factors, so that more research on the subject is required. Due to the above, this paper aims to measure the carbon (C) storage capacity in the five pools considered in forest ecosystems: aboveground biomass, belowground biomass, dead wood aboveground, litter and soil organic carbon (SOC) from two sampling sites located in the foothills of Mount Tlaloc, Texcoco, State of Mexico: the first in a fir forest (*Abies religiosa*) and the second in a white cedar forest (*Cupressus lusitanica*). In the fir forest the average carbon density contained in the five pools estimated was 376 Mg ha<sup>-1</sup>; the most important was aboveground biomass (59%), followed by SOC (22%). In contrast, in the white cedar forest it was 205 Mg ha<sup>-1</sup>, with the highest density storage in SOC (50%), followed by aboveground biomass (36%). The values of carbon density for aboveground biomass in the fir forest were higher than those reported for similar vegetation types in other papers and is explained by the existence of large trees of this species in the sampling site. The results give us a precise idea of the potential this type of vegetation has as a carbon pool when it reaches mature states.

#### Cita recomendada:

Bolaños González, Y., M. A. Bolaños González, F. Paz Pellat y J. I. Ponce Pulido. 2017. Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 35: 73-86.

Recibido: marzo de 2016. Aceptado: diciembre de 2016.  
Publicado en *Terra Latinoamericana* 35: 73-86.

**Index words:** *carbon pools, biomass, Abies religiosa, Cupressus lusitanica.*

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático global asociado al aumento potencial de la temperatura superficial del planeta es un problema que se acentúa por el rápido incremento actual en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Bolin *et al.*, 1989) y por las dificultades de reducir en forma sustantiva el incremento de los mismos en el futuro próximo (Houghton *et al.*, 1995); así, por ejemplo, se calcula un ingreso antropogénico a la atmósfera de aproximadamente 8.9 Pg C año<sup>-1</sup> a nivel mundial (Ciais *et al.*, 2013). Diferentes autores: Schneider (1989), Houghton y Woodwell (1989), Lashof y Ahuja (1990), Dixon *et al.* (1994), Masera (1995), Schimel (1995), (Le Quéré *et al.*, 2009), Houghton *et al.* (2012), afirman que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) más importantes y que su emisión a la atmósfera por el cambio de uso del suelo ocupa el segundo lugar a nivel mundial que, de acuerdo a las últimas estimaciones disponibles, se calcula 1.1-1.14 Pg C año<sup>-1</sup> (Ciais *et al.*, 2013, Houghton *et al.*, 2012), con una fuerte contribución de las zonas tropicales.

En México, de acuerdo al Inventario Nacional de emisiones de GEI, la categoría Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura (USCUSS) fue en 2006 el tercero en liberación de GEI a la atmósfera con un 9.9% del total estimado en el país (SEMARNAT e INECC, 2009); aunque en 2010 se estimó en 6.3%, siendo el cuarto en importancia (SEMARNAT e INECC, 2012), lo que representó una disminución en términos absolutos de 23 310 Gg de CO<sub>2</sub> eq, debidos principalmente a cambios en la metodología e interpretación, dado que se utilizó la misma información base (SEMARNAT e INECC, 2012). Debido a lo anterior, los ecosistemas forestales tienen un papel prioritario en el ciclo global del carbono y en el cambio climático global, por lo que resulta de gran importancia su conservación; ya que a pesar de ello, no existen mediciones forestales colectadas en forma regular y sistemática utilizando metodologías consistentes a lo largo del tiempo y manteniendo series históricas, debido a lo cual existe un alto grado de incertidumbre en estas estimaciones (De Jong *et al.*, 2009).

De acuerdo al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2003 y 2006), en los ecosistemas forestales el C se distribuye en cinco depósitos: biomasa viva por encima del suelo (biomasa aérea), biomasa viva por debajo del suelo (biomasa subterránea), madera muerta sobre el suelo, mantillo y carbono orgánico del suelo (COS). La biomasa aérea y subterránea se definen como la cantidad total de material orgánico vivo existente, por arriba y por abajo del suelo, respectivamente, expresada como peso anhidro por unidad de área (FAO, 2004). La capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar carbono en forma de biomasa varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Schulze *et al.*, 2000). Así, Prentice *et al.* (2001), estimaron que la mitad de la producción primaria bruta (PPB) se incorpora en los tejidos vegetales como hojas, raíces y tejidos leñosos (producción primaria neta o PPN), calculando globalmente con datos de los ochentas, que la PPB era de 120 Pg año<sup>-1</sup> de C. Posteriormente, Beer *et al.* (2010) estimaron la PPB en 123±8 Pg año<sup>-1</sup>.

El COS es el producto de la descomposición de plantas, el metabolismo de organismos vivos y el crecimiento bacteriano (Gardi *et al.*, 2014). Se estima que el depósito de COS a 1 m de profundidad es de 1500-2400 Pg (Batjes, 1996; Lal, 2003; Ciais *et al.*, 2013), tres a cuatro veces mayor que el depósito de C en la vegetación (550 Pg C) y dos veces mayor que el atmosférico (760 Pg) (Eswaran *et al.*, 1993; Lal, 2003).

El mantillo incluye desde materia orgánica fresca hasta materiales orgánicos altamente descompuestos y parcialmente estabilizados y es la fuente principal de C y de nutrientes disponibles para las plantas (Swift *et al.*, 1979; Caldato *et al.*, 2010), teniendo en gran medida responsabilidad en el funcionamiento de los ecosistemas forestales. La calidad del mantillo (relación carbono: nitrógeno) está determinada en gran medida por las especies de árboles presentes, que a su vez dependen de la elevación, el clima y la historia de uso (Berg, 2000).

De acuerdo al IPCC (2006), la madera muerta comprende toda la biomasa boscosa no viva no contenida en el mantillo, ya sea en pie, superficial o en el suelo. Es un componente natural importante en los bosques, que además de ser un elemento clave de la biodiversidad forestal, también influencia

el microclima de éstos, actúa como un almacén de agua en periodos secos (Harmon *et al.*, 1986) y como un almacén de C y nutrientes a largo plazo (Harmon *et al.*, 1986; Schaetzl *et al.*, 1989; Keenan *et al.*, 1993).

El Monte Tláloc forma parte de la Sierra Nevada, una de las regiones terrestres prioritarias para la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), y representa un área de gran importancia desde el punto de vista biogeográfico puesto que ahí convergen las regiones neártica y neotropical, además de valores altos de riqueza y endemismos (Arriaga, *et al.*, 2000) y como principal zona de recarga y amortiguamiento hidrológico del Valle de México (Moctezuma y Carreón, 2005). Adicionalmente, la Sierra Nevada se sitúa al oriente de uno de los mayores complejos urbanos del mundo: la zona metropolitana de la Ciudad de México, la cual ejerce una enorme presión sobre la vegetación circundante y en general sobre los recursos naturales (Sánchez y López, 2003), misma que, se prevé, se incrementa con la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (OECD, 2015), en especial en el municipio de Texcoco, Estado de México. Debido a esta importancia geográfica estratégica, a la falta de información específica de factores de emisión del sector agrícola, silvícola y otros usos del suelo (AFOLU, por sus siglas en inglés) y a la capacidad de almacenamiento de carbono de los ecosistemas forestales, descrita anteriormente; en el presente estudio se seleccionaron dos sitios de muestreo ubicados en el municipio de Texcoco, utilizando metodologías de muestreo y

laboratorio estandarizadas con los criterios definidos por el IPCC (IPCC, 2003 y 2006) para la estimación de los depósitos de carbono de un bosque de oyamel y un bosque de ciprés; aportando información para reducir el grado de incertidumbre en las estimaciones de emisiones de GEI que a la fecha se tienen en este sector, por lo que este trabajo contribuye con este objetivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitios de Muestreo

El área de muestreo se ubicó entre las coordenadas  $19^{\circ} 26' 42.36''$  y  $19^{\circ} 28' 20.09''$  N y  $98^{\circ} 44' 59.74''$  y  $98^{\circ} 46' 42.78''$  O e integra parte de los ejidos de Santa Catarina del Monte, San Pablo Ixayoc, Santa María Nativitas y San Miguel Tlaixpan, todos en el municipio de Texcoco. Se seleccionó un paisaje de 9 km<sup>2</sup> espacialmente representativo de la vegetación y de los tipos de suelos de los bosques templados del oriente del Estado de México, dentro de esta área se delimitaron dos zonas denominadas Bosques de Referencia (BR), con rasgos homogéneos en términos de almacenes de carbono: el primero fue un bosque monoespecífico de oyamel (*Abies religiosa*) y el segundo un bosque monoespecífico de ciprés (*Cupressus lusitanica*). Cada BR (Conglomerado) se integró por cuatro sitios de muestreo (Figura 1). Algunas de las variables de densidad de ambos BR se muestran en el Cuadro 1, en el que se agregó como referencia el número de

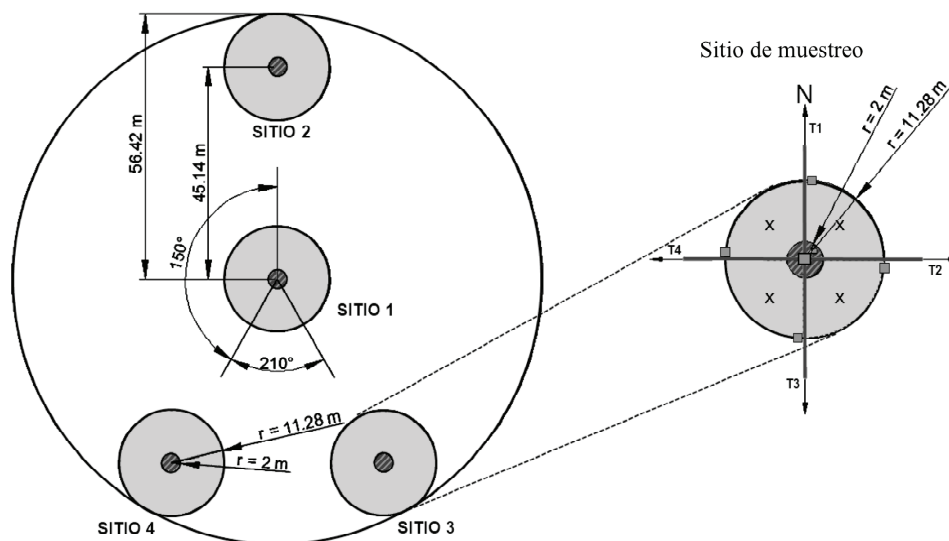


Figura 1. Diseño del conglomerado (Bosque de Referencia). Fuente: Elaboración propia, adaptado de CONAFOR 2011.





(hojarasca y capa de fermentación) y suelo, cuatro de ellas distribuidas en la periferia del círculo que delimitó el sitio, orientadas a cada uno de los puntos cardinales, y una en el centro del mismo, denominada DAP (donde se midió densidad aparente del suelo). Finalmente, se trazaron dos transectos perpendiculares entre sí para medir el material leñoso caído (combustibles), tal como se muestra en la Figura 2.

### Estimación de Depósitos de Carbono

Los depósitos considerados fueron los siguientes:

**Biomasa aérea.** Se refiere a toda la biomasa viva por encima del suelo incluyendo el fuste, las ramas, la corteza, las semillas y las hojas; su cuantificación es de gran importancia debido a que aproximadamente el 50% de ella es C (Brown, 1997; Chojnacky y Milton, 2008). En el caso de la vegetación arbórea se midieron los datos de diámetro normal (DN) de cada árbol registrado por sitio de muestreo. Con estos datos se realizó el cálculo de biomasa para *Abies religiosa* utilizando ecuaciones alométricas y factores de expansión de biomasa encontrados en la literatura revisada (Cuadro 3).

Basado en los resultados obtenidos en el cálculo de biomasa de *Abies religiosa*, para cuantificar el contenido de carbono se seleccionaron dos ecuaciones alométricas para esta especie, tomando como criterio de selección el que se explica en la sección denominada Estimación de contenido de biomasa de *Abies religiosa*. Adicionalmente se utilizó una ecuación para el cálculo de biomasa y carbono de *Cupressus lusitanica* y otra para *Quercus laurina* (se encontraron 2 árboles de esta especie en el BR2 y uno en el BR1), las cuales corresponden a las especies arbóreas encontradas en los sitios de muestreo (Cuadro 4), tomando como criterios de selección el que corresponden a la misma especie y que fueron obtenidas en sitios próximos geográficamente al área de estudio.

En lo que respecta a la vegetación arbustiva se realizó un procedimiento similar al usado para la vegetación arbórea, pero no se encontraron en la literatura ecuaciones alométricas desarrolladas para las especies encontradas en los sitios de muestreo, por lo que se utilizó la ecuación desarrollada por Búrquez *et al.* (2010), ya que, aunque fue desarrollada para especies de zonas desérticas (la gran mayoría de ecuaciones encontradas fueron desarrolladas para especies de éstas zonas, donde el aporte del estrato arbustivo a la biomasa

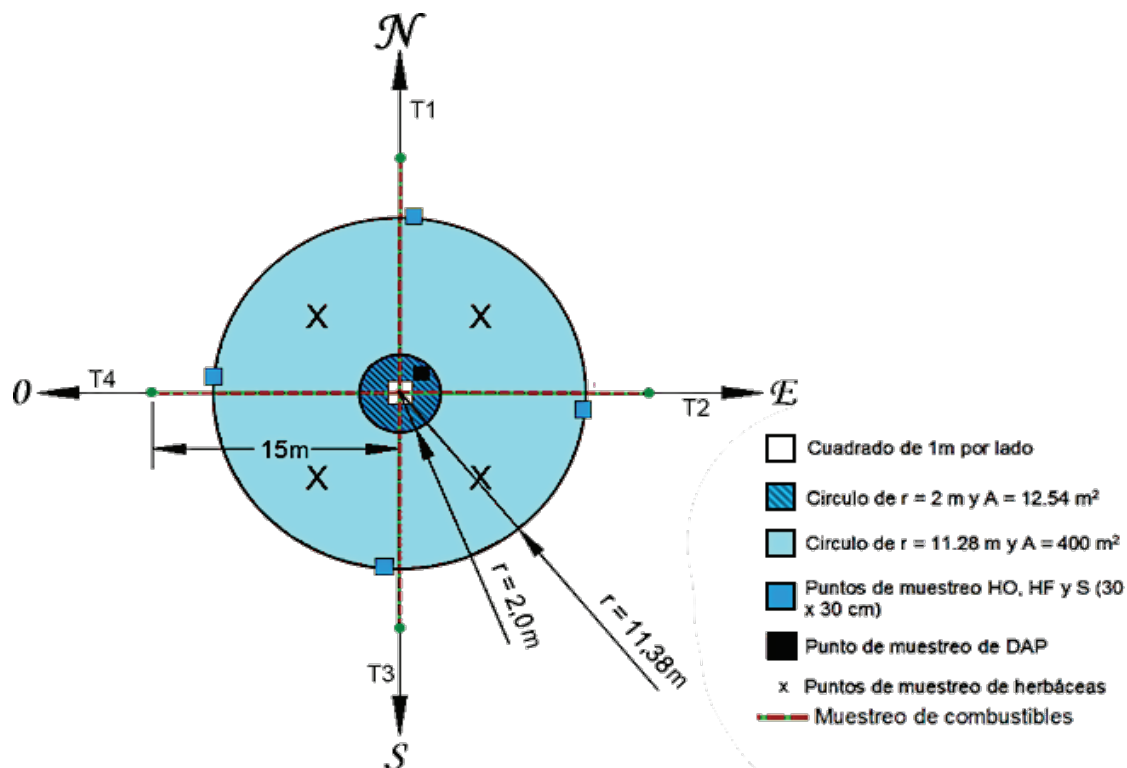


Figura 2. Diseño del sitio de muestreo cuantitativo y puntos de toma de datos.

**Cuadro 3. Métodos/modelos para estimación de biomasa de *Abies religiosa*.**

Autor	Modelo/Método	Observaciones
Avendaño <i>et al.</i> , 2009	$B = 0.0713DN^{2.5104}$	Ecuación utilizada para estimar la biomasa de árboles individuales en Nanacamilpa, Tlaxcala. El modelo se generó con datos de árboles con diámetro normal (DN) de 6.5-79cm.
Brown <i>et al.</i> , 1997	$B = \frac{0.5 + 15000 DN^{2.7}}{DN^{2.7} + 364946}$	Ecuación utilizada para estimar la biomasa de especies de coníferas de bosques no perturbados en Estados Unidos, incluyendo árboles de grandes dimensiones (DN>70cm). El DN está en centímetros y la B en kg árbol <sup>-1</sup> .
Flores <i>et al.</i> , 2011	$B_f = 0.0173DN^{2.7459}$ + $B_{mra} = 1.5842e^{0.044DN}$ + $B_{fa} = 0.8413e^{0.0398DN}$	Ecuaciones para estimar biomasa de árboles individuales en bosques en decaimiento en el Desierto de los Leones (D.F.) y Monte Tláloc (Edo. de México), en tres secciones: biomasa de fuste (B <sub>f</sub> ), biomasa de madera de ramas (B <sub>mra</sub> ) y biomasa de acículas (B <sub>fa</sub> ). El modelo se generó con datos de árboles con DN de 12-105cm.
Rodríguez y Calva, 2013	$B = 0.0519DN^{2.5954}$	Ecuación utilizada para estimar biomasa de árboles individuales en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo; la cual se generó con datos de árboles con DN de 2.86-100.59cm.
FEB <sup>†</sup> . IPCC, 2003	${}^{\infty}B = V_f \cdot \delta_b \cdot FEB;$  ${}^{\circ}V_f = \frac{\pi DN^2}{4} \cdot h \cdot CM$	El volumen del fuste (V <sub>f</sub> ) se calculó con un coeficiente mórfico forestal (CM) de 0.7 y se utilizó una densidad básica de la madera (δ <sub>b</sub> ) de 0.3874 y un FEB de 1.3, valores tomados de Rojas y Villers (2008).

<sup>†</sup> FEB = factores de expansión de biomasa.

total del sitio es muy importante) mostró consistencia en las estimaciones de biomasa de muchas especies con diferentes formas de crecimiento, tamaños, condiciones edáficas y de disponibilidad de humedad.

Así, el modelo utilizado considera el área proyectada de la copa como una elipse, de tal forma que el volumen de ésta corresponde a un cilindro elíptico, Ecuación 1.

$$V = \pi \times r_1 \times r_2 \times h \quad (1)$$

De los tres modelos desarrollados por Búrquez *et al.* (2010), en este trabajo se seleccionó el no lineal, mismo que se generó en condiciones de mayor disponibilidad de agua en el suelo y estima la cantidad de biomasa

seca sobre el mismo (B<sub>m</sub>, g m<sup>-2</sup>) a partir del volumen de copa (V, en m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup>) con la Ecuación 2.

$$Bm = 356.983 V^{1.416} \quad (2)$$

El contenido de carbono en el estrato herbáceo se calculó a partir del peso seco de la muestra (1 m<sup>2</sup>) y se obtuvo la densidad de la biomasa (Mg ha<sup>-1</sup>). Posteriormente el valor de densidad de biomasa se multiplicó por el factor de contenido de carbono recomendado por el IPCC (2003) de 0.5 para obtener la densidad de carbono en este estrato.

**Biomasa subterránea.** Este reservorio incluye toda la biomasa de raíces vivas excluyendo raíces finas de

**Cuadro 4. Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de contenido de carbono en biomasa aérea arbórea.**

Especie	Ecuación para biomasa	Ecuación para carbono	Referencia bibliográfica
<i>A. religiosa</i>	$B = 0.0713DN^{2.5104}$	$C = 0.0332DN^{2.5103}$	Avendaño <i>et al.</i> , 2009.
<i>A. religiosa</i>	$B = \frac{0.5 + 15000 DN^{2.7}}{DN^{2.7} + 364946}$	$C = 0.465 * B$	Brown <i>et al.</i> , 1997. Se tomó el valor de contenido de carbono (CC) de 46.5% (Avendaño <i>et al.</i> , 2009).
<i>Cupressus lusitanica</i>	$B = 0.5266DN^{1.7712}$	$C = 0.2639DN^{1.7698}$	FAO, 2013.
<i>Quercus laurina</i>	$B = 0.1033DN^{2.39}$	$C = 0.5 * B$	Acosta <i>et al.</i> , 2002. Se tomó el valor de contenido de carbono (CC) de 50% (IPCC, 2003).

menos de 2 mm de diámetro debido a que con frecuencia no se pueden distinguir de la materia orgánica del suelo o mantillo (IPCC, 2006). En el presente estudio este depósito se estimó únicamente para vegetación arbórea viva, ya que se consideró que la de la vegetación herbácea es poco significativa y la de la vegetación arbustiva requiere realizar muestreos destructivos, que implican una gran cantidad de tiempo y recursos económicos (no son aplicables las ecuaciones alométricas existentes en la literatura), además de provocar una perturbación mayor en los sitios de medición, por lo que se optó por no considerarlos en la cuantificación de éste depósito. Basado en el trabajo realizado por Cairns *et al.* (1997), el IPCC (2006) recomienda la utilización de la ecuación alométrica (Ecuación 3) para estimar la biomasa por debajo del suelo en bosques templados, en función de la biomasa aérea seca (BSS) calculada previamente.

$$Y = e^{-1.0587 + 0.8836 \cdot \ln(BSS) + 0.2840} \quad (3)$$

**Carbono orgánico del suelo (COS).** El COS se estimó en función de la densidad aparente, profundidad, fracción gruesa del suelo (partículas mayores a 2mm) y porcentaje de carbono medido con un analizador automático Shimadzu 5050A. Para obtener el valor del COS se utilizó la Ecuación 4.

$$COS = DAP \cdot P \cdot 10000 \cdot (1 - FG100) \cdot COS_p(0.01) \quad (4)$$

dónde:

COS = carbono orgánico del suelo (Mg ha<sup>-1</sup>)

DAP = densidad aparente del suelo (Mg m<sup>-3</sup>)

P = profundidad del suelo (m)

FG = fragmentos gruesos en el suelo (> 2 mm), en %

COS<sub>p</sub> = contenido de carbono orgánico, en %

0.01 = factor de conversión de unidades (porcentaje a fracción).

El valor del factor de escala (10 000) tiene como unidades m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>.

El valor de la DAP se obtuvo tomando una muestra de suelo en campo, misma que se llevó al laboratorio para secado en estufa y determinar su peso seco. La profundidad que se consideró en el cálculo del contenido de carbono para el presente estudio fue de 0.3 m debido a que, de acuerdo al IPCC (2003), es una buena práctica medir el depósito de carbono en el suelo mínimamente a esta profundidad, ya que probablemente donde se producirán las mayores variaciones es en este depósito en el tiempo. El porcentaje de FG se obtuvo secando, moliendo y tamizando el suelo de las muestras en una malla 10, con abertura de 2 mm, calculando el peso de ambas fracciones (gruesa y fina) y su respectivo porcentaje en relación al total de la muestra. Posteriormente se obtuvo una submuestra de 5 g, la cual se tamizó en malla 100 para estimar el COS<sub>p</sub>.

**Mantillo.** Incluyó la hojarasca, capa de fermentación y material leñoso caído fino con diámetro menor

de 7.5 cm. El cálculo de contenido de C se realizó determinando el peso seco de cada compartimento y midiendo el porcentaje de carbono de las muestras mediante el analizador automático Shimadzu 5050A.

**Madera muerta.** Dentro de este depósito se consideró árboles muertos en pie, tocones, trozas o material leñoso caído con un diámetro  $\geq 7.5$  cm. Para los árboles se estimó el contenido de carbono utilizando las mismas ecuaciones alométricas que para biomasa aérea, para los tocones se estimó su volumen con el diámetro y altura medido (asumiendo que tienen forma cilíndrica) y la densidad de madera de acuerdo a su grado de putrefacción y para el caso del material leñoso caído (MLC) se utilizó el método de líneas de intersección recomendado por el IPCC (Van Wagner, 1968; IPCC, 2006), Ecuación 5, y la densidad de madera de acuerdo a su grado de putrefacción.

$$V = \frac{\pi^2 * (D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2)}{8L} \quad (5)$$

dónde:

V = volumen de MLC ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )

D = diámetro de cada una de las n trozas (cm)

L = largo de la línea (suma de todos los transectos) en sitio de muestreo (m)

Posteriormente se estimó la biomasa, para ello se utilizó la Ecuación 6.

$$B_{MLC} = V * DM \quad (6)$$

dónde:

$B_{MLC}$  = biomasa del MLC ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )

V = volumen de MLC ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )

DM = densidad de la madera ( $\text{Mg m}^{-3}$ )

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Estimación de Contenido de Biomasa de *Abies religiosa*

En el BR1 se encontraron árboles de *Abies religiosa* con Diámetro Normal (DN)  $>70$  cm, de grandes dimensiones de acuerdo a la definición de Brown *et al.* (1997), mismos que estaban fuera del rango de estimación de todas las ecuaciones alométricas encontradas inicialmente para esta especie en la literatura revisada (Avendaño *et al.*, 2009; Rodríguez y Calva, 2013; Flores *et al.*, 2011), por

lo que las estimaciones de biomasa y contenido de carbono con las ecuaciones mencionadas resultaron ser mucho mayores a todo lo reportado en la literatura para esta especie. Por lo anterior, se utilizó el método de Factores de Expansión de Biomasa (FEB), que es uno de los dos que recomienda el IPCC (2003), y la ecuación alométrica propuesta por Brown *et al.* (1997) utilizada en la cuantificación de contenido de carbono en bosques inalterados del este de Estados Unidos, en donde se encontraron árboles de grandes dimensiones, similares a los encontrados en el BR1. En los sitios 1 y 2, donde todos los árboles medidos tuvieron un  $DN < 70$  cm, la cantidad de biomasa estimada con todos los métodos utilizados es relativamente similar, dado que el coeficiente de variación (CV) para el sitio 1 es de 32.6% y 31.5% para el sitio 2 (Cuadro 5), siendo la ecuación que calcula el valor menor la propuesta por Flores *et al.* (2011) y el mayor valor al utilizar el método de factores de expansión de biomasa (IPCC, 2003). Las otras tres ecuaciones alométricas propuestas (Brown *et al.*, 1997; Avendaño *et al.*, 2009; Rodríguez y Calva, 2013) estiman valores muy similares de biomasa, por lo que, tomando en cuenta únicamente éstas ecuaciones, el CV se reduce a 4.32% para el sitio 1 y 1.91% para el sitio 2 (Cuadro 5).

En cambio, en los sitios 3 y 4 del BR1, donde se midieron los árboles con  $DN > 80$  cm, existió una diferencia notable entre las estimaciones con los métodos utilizados. Así, con excepción de la ecuación alométrica propuesta por Brown *et al.* (1997), el resto calculó cantidades superiores a lo reportado en la literatura revisada para este tipo de vegetación y especie (De Jong *et al.*, 1999; Ordóñez *et al.*, 2008; Avendaño *et al.*, 2009; Rodríguez y Calva, 2013; Flores *et al.*, 2011). Lo anterior se debe a que los DN de los árboles de grandes dimensiones están fuera de los rangos utilizados en la construcción de estas ecuaciones alométricas, por lo que no consideran esta condición. Así, por ejemplo, Avendaño *et al.* (2009) utilizaron rangos de DN entre 5.7 y 79 cm; pero en el BR1 se midieron tres árboles en el Sitio 4 con  $DN > 79$  cm (84, 159 y 262 cm) y en el Sitio 3 dos árboles (132 y 210 cm), por lo que el modelo utilizado no es representativo de estas clases diamétricas y, aunque son solo cinco especímenes de un total de 38 medidos, dadas sus dimensiones, es suficiente para sobreestimar el contenido de carbono en estos sitios.

Adicionalmente, en la Figura 3 se muestra una comparación de los valores de biomasa por árbol

**Cuadro 5. Biomasa aérea de *Abies religiosa* calculada con diferentes métodos/ecuaciones alométricas.**

Modelo/Método	Sitio	Biomasa	Promedio	D. E. †	CV ‡
		----- Mg ha <sup>-1</sup> -----			%
Avendaño <i>et al.</i> , 2009	1	189	1289	1345	104
	2	285			
	3	1640			
	4	3046			
Brown <i>et al.</i> , 1997	1	204	516	342	66
	2	296			
	3	601			
	4	961			
Rodríguez y Calva, 2013	1	190	1455	1552	107
	2	292			
	3	1854			
	4	3484			
Flores <i>et al.</i> , 2011	1	116	2389	3429	144
	2	184			
	3	1867			
	4	7387			
Factores de expansión de biomasa (IPCC, 2003)	1	298	1471	1392	95
	2	449			
	3	1863			
	4	3271			

† = desviación estándar; ‡ = coeficiente de variación.

estimada con las ecuaciones alométricas propuestas por Avendaño *et al.* (2009) y Brown *et al.* (1997), donde se observó que para árboles de *Abies religiosa* con DN < 80 cm de los cuatro sitios que integran el conglomerado (BR) los valores estimados son muy similares con ambas ecuaciones. En contraste, para árboles de esta misma especie, pero con DN > 80 cm, se observó una diferencia amplia en las estimaciones, misma que es mayor a medida que crece el DN (Figura 4), lo cual se debe principalmente a que la ecuación propuesta por Avendaño *et al.* (2009) es de tipo exponencial, por lo que los valores estimados crecen rápidamente conforme se incrementa el valor de la variable independiente (DN).

Como resultado del análisis anterior, para estimar el contenido de C en el BR1 se utilizó la ecuación alométrica propuesta por Avendaño *et al.* (2009) para árboles de *A. religiosa* con DN ≤ 80cm, considerada más precisa debido a que es específica para esta especie y se generó a partir de un sitio geográficamente próximo y con condiciones similares al del presente

estudio; y la propuesta por Brown *et al.* (1997) para los especímenes con DN superior a este valor: dos en el caso de sitio 3 y tres en el caso del sitio 4, como se mencionó anteriormente.

### Cálculo de Contenido de Carbono

La densidad de C total fue mayor en el BR1 con respecto al BR2, siendo superior en todos los depósitos considerados con excepción del COS. Así, el promedio de la densidad de carbono total para los sitios del BR 1 fue de 376 Mg ha<sup>-1</sup>, siendo el depósito más importante el de biomasa aérea (59%), seguido del COS (22%); en tanto que en el BR 2 fue de 205 Mg ha<sup>-1</sup>, siendo el depósito con mayor densidad el COS (50%), seguido de biomasa aérea (36%). En el Cuadro 6 se muestran las densidades de carbono para los cinco depósitos considerados en el presente estudio, así como los promedios para cada uno de los BR medidos.

Para el caso de densidad de carbono en biomasa aérea, el contenido mayor en el BR1 con respecto



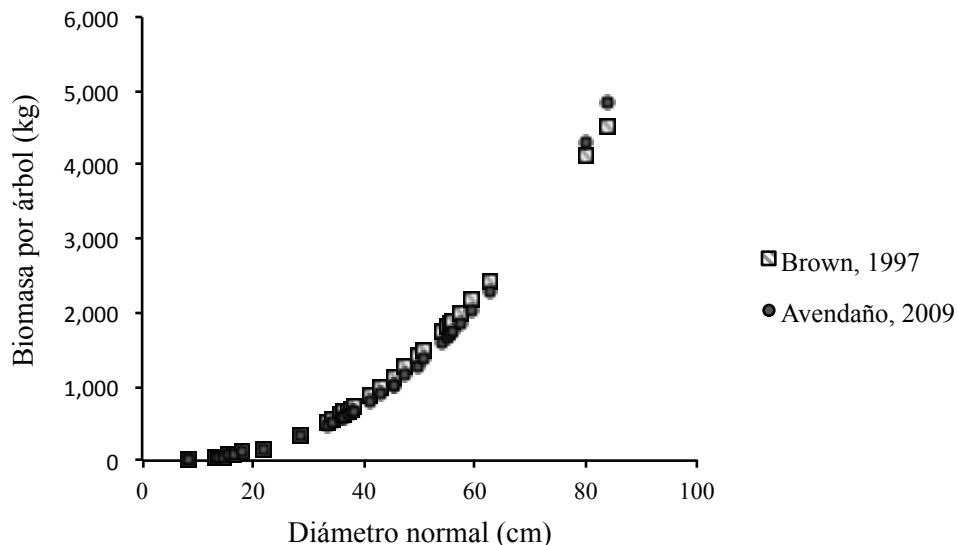


Figura 3. Biomasa aérea arbórea de *Abies religiosa*, utilizando las ecuaciones alométricas propuestas por Avendaño *et al.* (2009) y Brown *et al.* (1997), especímenes con DN < 85cm.

al BR2 se debe principalmente a que las ecuaciones alométricas utilizadas están en función de la especie considerando como variable independiente el DN de los individuos, por lo que al ser mayores los DN de los especímenes de *Abies religiosa* medidos en el BR1, a pesar de ser menos individuos, con respecto a los especímenes de *Cupressus lusitanica* medidos en el BR2, la biomasa aérea es mayor en el primero.

En el BR1, el valor calculado de C en biomasa aérea fue superior al reportado en otros trabajos

con tipos de vegetación similares, por ejemplo De Jong *et al.* (1999) reportó densidades de carbono en biomasa de 145.7 Mg C ha<sup>-1</sup>; Ordóñez *et al.* (2008) 169.7 Mg C ha<sup>-1</sup>; Galeana *et al.* (2013) 163 Mg C ha<sup>-1</sup> (bosque cerrado); incluyendo a un bosque mono específico de *A. religiosa* de 75 años de edad ubicado en el Cofre de Perote, Veracruz en el que se estimó una densidad de C en biomasa aérea arbórea de 157 Mg C ha<sup>-1</sup> (Mendoza y Galicia, 2010). Lo anterior se debe, como ya se mencionó, a que se encontraron

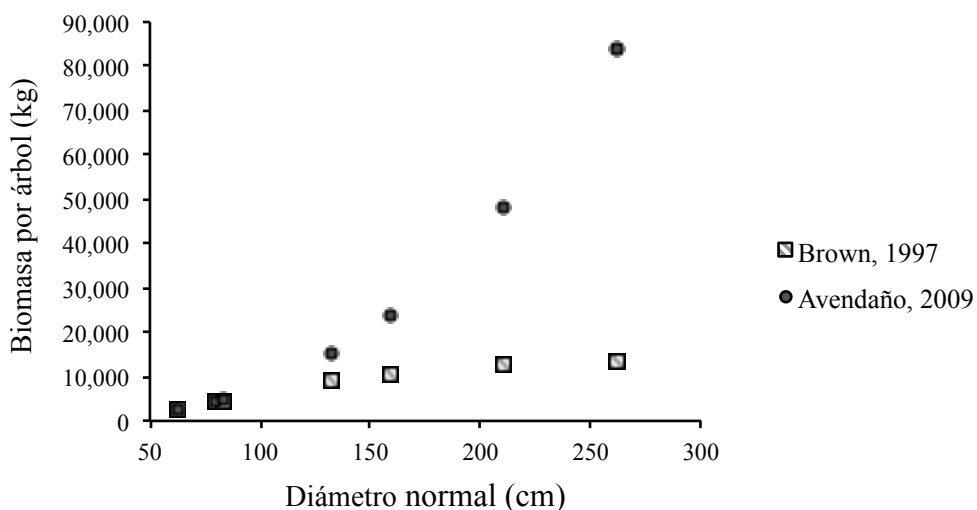


Figura 4. Biomasa aérea arbórea de *Abies religiosa*, utilizando las ecuaciones alométricas propuestas por Avendaño *et al.* (2009) y Brown *et al.* (1997), especímenes con DN > 60cm.

**Cuadro 6. Densidad de carbono en todos los depósitos.**

Bosque de referencia	Sitio	Carbono almacenado (Mg ha <sup>-1</sup> )					
		Biomasa aérea	Biomasa subterránea	COS	Mantillo	Madera muerta	Total
Bosque de <i>Abies religiosa</i>	1	92	20	80	14	8	214
	2	135	27	49	7	7	225
	3	280	48	69	10	18	426
	4	440	79	74	14	31	637
Media		237	43	68	11	16	376
Desviación estándar		158	26	14	4	11	200
C. V. <sup>†</sup> (%)		67	61	20	31	68	53
Bosque de <i>Cupressus lusitanica</i>	1	72	18	117	7	3	217
	2	73	17	105	5	19	218
	3	76	19	99	5	6	205
	4	70	18	89	2	1	181
Media		73	18	102	5	7	205
Desviación estándar		3	1	12	2	8	17
C. V. <sup>†</sup> (%)		4	4	11	41	110	9

<sup>†</sup> = coeficiente de variación.

árboles de grandes dimensiones en dos de los sitios de muestreo que integraron el BR1. En contraste, las densidades medias de carbono estimadas en el BR2 para biomasa (73 Mg ha<sup>-1</sup>) son inferiores a las reportadas por otros autores en tipos de vegetación similares (bosques de pino-encino), por ejemplo, De Jong *et al.*, 1999, reportó densidades de carbono en biomasa de 166.3 Mg ha<sup>-1</sup> y Ordóñez *et al.* (2008) 115.7 Mg ha<sup>-1</sup>), debido principalmente a que este bosque tuvo especímenes con DN pequeño (10-40 cm) y a que ha estado sujeto a tala, debido a la gran cantidad de tocones que se midieron, como se reportó en el Cuadro 1.

La densidad del COS de ambos BR se encuentra por debajo de lo reportado por otros autores para vegetación similar en México, tales como De Jong *et al.* (1999) quienes encontraron densidades de 172.6 Mg C ha<sup>-1</sup> (Bosque de pino) y 174.4 Mg C ha<sup>-1</sup> (bosque de pino-encino) en los altos de Chiapas; Cairns *et al.* (1997) reportan una densidad promedio de 118 Mg C ha<sup>-1</sup> para bosques de México. El contenido de C en este depósito fue mayor en el BR2 que en el BR1, lo que se debe principalmente a que el porcentaje de la fracción gruesa del BR1 es mayor al del BR2, por lo que esta fracción se resta de la masa del suelo, de acuerdo a la Ecuación 4.

En el caso del contenido de C en Mantillo, los valores encontrados (11 y 5 Mg ha<sup>-1</sup>) son inferiores al reportado por Woodall (2012), quien encontró que la densidad promedio de C en este depósito en los ecosistemas forestales de Estados Unidos fue de 25.6 Mg ha<sup>-1</sup>, lo cual puede deberse a que los sitios medidos en este estudio están sujetos a intervención humana, por lo que es probable que parte del mantillo se haya retirado para utilizarse como combustible (extracción de leña) o materia orgánica para plantas (tierra de monte), prácticas comunes en la zona; sin embargo, esto no fue cuantificado.

## CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en el presente estudio mostraron que los depósitos de carbono mayores fueron la biomasa viva sobre el suelo (biomasa aérea) y el carbono orgánico del suelo (COS). El primero fue más importante en el bosque de *Abies religiosa* con 237 Mg ha<sup>-1</sup> (representó el 59% del total de C almacenado) y el segundo fue el mayor depósito en el bosque de *Cupressus lusitanica* con 102 Mg ha<sup>-1</sup> (representó el 50% del C total estimado). En ambos bosques la suma de estos dos depósitos fue superior al 80% del total del C almacenado. Asimismo, dentro del

depósito correspondiente a la biomasa aérea, el estrato arbóreo resultó ser mucho mayor que el arbustivo y herbáceo (representó más del 98% en ambos bosques con respecto al total estimado en biomasa aérea).

- De acuerdo a los resultados obtenidos con las ecuaciones alométricas desarrolladas para *Abies religiosa*, éstas sobreestiman la biomasa aérea y, por lo tanto, su contenido de carbono, con excepción de la desarrollada por Brown *et al.* (1997). Dado lo anterior, es necesario explorar funciones que representen de manera más adecuada la acumulación de biomasa y carbono en la vegetación arbórea, ya que existen indicios de que las funciones exponenciales representan adecuadamente solo una parte del ciclo de crecimiento, por lo que se concluye que es necesario construir ecuaciones alométricas que representen el ciclo de crecimiento completo, incluyendo árboles de grandes dimensiones.

- Es importante medir los depósitos de carbono que la mayoría de los estudios no estiman: biomasa subterránea, madera muerta sobre el suelo y mantillo; ya que su aporte como depósito de C aunque no es tan grande como el de biomasa aérea y COS, en conjunto se estimó en este estudio entre 14% (bosque de *Cupressus lusitanica*) y 19% (bosque de *Abies religiosa*), pero dada la extensión de los bosques en nuestro país, representan un depósito de carbono importante, mismo que debe ser considerado como parte del ciclo global del C. Adicionalmente, la estimación del contenido de C en estos depósitos representa un avance en el conocimiento del ciclo de este elemento en el sector silvícola; además de que juegan un rol muy importante en la salud del ecosistema, ya que son fuentes primarias de nutrientes y almacén de combustibles para potenciales incendios forestales.

- Finalmente, se encontró que el contenido de C en el bosque de oyamel fue superior a lo reportado en otros sitios con vegetación similar, por lo que resulta importante conservar este tipo de vegetación como reservorio de carbono en el área de estudio y nos da una idea precisa del potencial como almacén de C que este tipo de vegetación tiene cuando llega a estados maduros.

## LITERATURA CITADA

Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velásquez-Martínez y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 6: 725-736.

- Arriaga, L., J. M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (coordinadores). 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Escala de trabajo 1:1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México.
- Avendaño, D., M. Acosta, F. Carrillo y J. Etchevers. 2009. Estimación de la biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotec. Mex.* 32: 233-238.
- Batjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163.
- Beer, C., M. Reichstein, E. Tomelleri, P. Ciais, M. Jung, N. Carvalhais, C. Rödenbeck, M. A. Arain, D. Baldocchi, G. B. Bonan, A. Bondeau, A. Cescatti, G. Lasslop, A. Lindroth, M. Lomas, S. Luysaert, H. Margolis, K. W. Oleson, O. Rouspard, E. Veenendaal, N. Viovy, C. Williams, F. I. Woodward, and D. Papale. 2010. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science* 329: 834-838.
- Berg, B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in Northern forest soils. *For. Ecol. Manage.* 133: 13-22.
- Bolin, B., B. R. Döös, J. Jäger, and R. A. Warrick. 1989. The greenhouse effect, climatic change, and ecosystems. *Scope* No 29. Wiley-Blackwell. Sedona, AZ, USA. ISBN-10: 0471910120.
- Brown, S., P. Schroeder, and R. Birdsey. 1997. Aboveground biomass distribution of US eastern hardwood forests and the use of large trees as an indicator of forest development. *For. Ecol. Manage.* 96: 37-47.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. *FAO Forestry paper* 55. Rome, Italy.
- Búrquez, A., A. Martínez-Yrizar, S. Núñez, T. Quintero, and A. Aparicio. 2010. Aboveground biomass in three Sonoran Desert communities: Variability within and among sites using replicated plot harvesting. *J. Arid Environ.* 74: 1240-1247. doi:10.1016/j.jaridenv.2010.04.004.
- Cairns, M., S. Brown, E. H. Helmer, and G. A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: 1-11.
- Caldato, S. L., P. A. Floss y E. C. Serafini Floss. 2010. Producción y descomposición de hojarasca en la selva ombrófila mixta en el sur de Brasil. *Bosque* 31: 3-8.
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R. B. Myneni, S. Piao, and P. Thornton. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. Chapter 6. pp. 465-570. *In*: T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley (eds.). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working Group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* Cambridge University Press. Cambridge, UK, New York, NY, USA.
- Chojnacky, D. C. and M. Milton. 2008. Measuring carbon in shrubs Chapter 5. pp. 45-72. *In*: C. M. Hoover (ed.). *Field measurements for forest carbon monitoring: A landscape-scale approach*. Springer Science + Business Media. New York, NY, USA.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2011. Inventario nacional forestal y de suelos: Manual y procedimientos para el muestreo de campo, re-muestreo 2011. Zapopan, Jal., México.
- De Jong, B., M. Cairns, P. Haggerty, N. Ramírez, S. Ochoa, J. Mendoza, M. González, and I. March. 1999. Land-use change

- and carbon flux between 1970s and 1990s in Central Highlands of Chiapas, Mexico. *Environ. Manage.* 23: 373-385.
- De Jong, B., M. Olguín, F. Rojas, V. Maldonado, F. Paz, J. Etchevers, C. Cruz y J. Argumedo. 2009. Actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2006 en la Categoría de Agricultura, Silvicultura y otros usos de la tierra. Instituto Nacional de Ecología (INE). México, D. F.
- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler, and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Eswaran, H., E. van den Berg, and P. Reich. 1993. Organic carbon soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 192-194.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2013. *GlobAllomeTree-Assessing* volume, biomass and carbon stocks of trees and forests. <http://www.globallometree.org/data/allometric-equations/> (Consulta: enero 11, 2017).
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2004. *Global forest resources assessment update 2005, Terms and definitions (final version)*. (<http://www.fao.org/docrep/007/ae156e/ae156e00.HTM>). (Consulta: enero 11, 2017).
- Flores, P., M. A. López, G. Ángeles, M. de la Isla y G. Calva. 2011. Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en proceso de declinación. *Rev. Mex. Cien. For.* 2: 9-20.
- Gardi, C., M. Angelini, S. Barceló, J. Comerma, C. Cruz Gaistardo, A. Encina Rojas, A. Jones, P. Krasilnikov, B. Mendonça Santos, L. Montanarella, O. Muñiz, P. Schad, M. Vara Rodríguez y R. Vargas. 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxemburgo. Luxemburgo.
- Galeana, J. M., J. A. B. Ordóñez y N. Corona. 2013. Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera Bosques* 19: 53-69.
- Harmon, M. E., J. F. Franklin, F. J. Swanson, P. Sollins, S. V. Gregory, J. D. Lattin, N. H. Anderson, S. P. Cline, N. G. Aumen, J. R. Sedell, G. W. Lienkaemper, K. Cromack, and K. W. Cummins. 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Adv. Ecol. Res.* 15: 133-302.
- Houghton, R. A. y C. M. Woodwell. 1989. Global climate change. *Sci. Am.* 260: 36-40.
- Houghton, R. A., J. I. House, J. Pongratz, G. R. van der Werf, R. S. DeFries, M. C. Hansen, C. Le Quéré, and N. Ramankutty. 2012. Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosci. Discuss.* 9: 835-878. doi:10.5194/bg-9-5125-2012.
- Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell. 1995. *Climate change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, England.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry*. IGES. Kanagawa, Japan.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IGES. Kanagawa, Japan.
- Keenan, R., C. E. Prescott, and J. P. H. Kimmins. 1993. Mass and nutrient content of woody debris and forest floor in western red cedar and western hemlock forests on northern Vancouver Island. *Can. J. For. Res.* 23: 1052-1059.
- Lal, R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environ. Int.* 29: 437-450.
- Lashof, D. A. and D. R. Ahuja. 1990. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature* 344: 529-531.
- Le Quéré, C., M. R. Raupach, J. C. Canadell, G. Marland, L. Bopp, P. Ciais, T. J. Conway, S. C. Doney, R. A. Feely, P. Foster, P. Friedlingstein, K. Gurney, R. A. Houghton, J. I. House, C. Huntingford, P. E. Levy, M. R. Lomas, J. Majkut, N. Metz, J. P. Ometto, G. P. Peters, I. C. Prentice, J. T. Randerson, S. W. Running, J. L. Sarmiento, U. Schuster, S. Sitch, T. Takahashi, N. Viovy, G. R. van der Werf, and F. I. Woodward. 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nat. Geosci.* 2: 831-836.
- Masera, O. 1995. Carbon mitigation scenarios for Mexican forests: Methodological considerations and results. *Interciencia* 20: 388-395.
- Mendoza, A. and L. Galicia. 2010. Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry* 83: 497-506. doi:10.1093/forestry/cpq032.
- Moctezuma Barragán, P. e I. Carreón. 2005. *Sembrando el futuro en la Sierra Nevada*. <http://colectivopalabra.com/sembrando-el-futuro-en-la-sierra-nevada> (Consulta: agosto 30, 2016).
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). 2015. *Territorial reviews: Valle de México, Mexico*. OECD Publishing. Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264245174-en>.
- Ordóñez, J. A. B., B. H. J. De Jong, F. García-Oliva, F. L. Aviña, J. V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez, and O. Masera. 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highland of Michoacán, Mexico. *For. Ecol. Manage.* 255: 2074-2084.
- Prentice, I. C., G. D. Farquhar, M. J. R. Fasham, M. L. Goulden, M. Heimann, V. J. Jaramillo, H. S. Khesghi, C. Le Quéré, R. J. Scholes, and D. W. R. Wallace. 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. pp. 99-181. *In: J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson (eds.). Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Rodríguez, V. y G. Calva. 2013. Estimación del carbono contenido en el bosque de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo. pp. 7-13. *In: F. Paz Pellat, J. Wong G., M. Bazan y V. Saynes (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México, Síntesis a 2013*. PMC. Texcoco, México. ISBN 978-607-96490-1-2.
- Rojas G., F. y L. Villers R. 2008. Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Rev. Cienc. For. Méx.* 33: 59-86.
- Sánchez G., A. y L. López M. 2003. Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *UNAM. Anal. Inst. Biol. Serie Botánica* 74: 47-71.

- Schaetzl, R. J., S. F. Burns, D. Johnson, and T. Small. 1989. Tree uprooting: Review of impacts on forest ecology. *Vegetation* 79: 165-176.
- Schimel, D. S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biol.* 1: 77-91.
- Schneider, S. H. 1989. The greenhouse effect: Science and policy. *Science* 243: 771-781.
- Schulze, E. D., C. Wirth, and M. Heimann. 2000. Managing forest after Kyoto. *Science* 289: 2058-2059.
- SEMARNAT-INECC (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2009. México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México, D. F. ISBN: 978-607-7908-00-5.
- SEMARNAT-INECC (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2012. México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México, D. F. ISBN: 978-607-824-650-2.
- Swift, M. J., O. W. Heal, and J. M. Anderson. 1979. Decomposition in terrestrial ecosystems. *Estudios de Ecología*, Vol. 5. University of California Press. Los Ángeles, CA, USA.
- Van Wagner, C. E. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. *For. Sci.* 14: 20-26.
- Woodall, C. W., C. H. Perry, and J. A. Westfall. 2012. An empirical assessment of forest floor carbon stock components across the United States. *For. Ecol. Manage.* 269: 1-9.



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

Alcala Jauregui, Jorge A.	Facultad de Agronomía y Veterinaria, UASLP. San Luis Potosí, SLP, México.
Alvarez Latorre, Pablo	Universidad de La Serena (PROMMRA). La Serena, Chile.
Arévalo Galarza, Gustavo	Depto. de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México, México.
Bargiela, Martha	Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
Covaleda, Sara	Kibeltik Clima y Medio Ambiente. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.
Cristóbal Acevedo, David	Depto. de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México, México.
Escalante Estrada, José A.	Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México, México.
Etchevers Barra, Jorge	Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México, México.
Gallardo Lancho, Juan	IRNASA centro del CSIC. Salamanca, España.
González Molina, Lucila	INIFAP C.E. Valle de México. Coatlinchán, Texcoco, Edo. de México, México.
Moreno Reséndez, Alejandro	Depto. de Suelos, UAAAN-Unidad Laguna. Torreón, Coahuila, México.
Murillo Amador, Bernardo	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, Baja California Sur, México.
Ojeda Barrio, Leopoldina	Fac. de Ciencias Agrotecnológicas, UACH. Chihuahua, Chihuahua, México.
Ojeda Bustamante, Waldo	Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua. Cuajimalpa, México, México.
Ortiz Salinas, Rutilo	Depto. de Producción Agrícola y Animal. UAM-Xochimilco. Cd. de México, México.
Saiz Hernández, Juan A.	Depto. de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
Siebe Grabach, Christina	Instituto Geología, UNAM. Cd. Ciudad de México, México.
Troyo Diéguez, Enrique	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, Baja California Sur, México.
Valdivia Bernal, Roberto	U. A. de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit. Xalisco, Nayarit, México.
Zamudio González, Benjamín	INIFAP C.E. Toluca. Zinacantepec, Edo. de México, México.