

ISSN 0187-5779

# TERRA

*Latinoamericana*

JULIO - SEPTIEMBRE DE 2004 • VOLUMEN 22 • NÚMERO 3



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

# TERRA

*Latinoamericana*

## COMITE EDITORIAL

EDITOR	Dr. Antonio Vázquez Alarcón
EDITOR ADJUNTO	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
EDITORES TECNICOS	Dr. David Cristóbal Acevedo Dr. David Espinosa Victoria Dra. Ma. del Carmen González Chávez Dra. Edna Alvarez Sánchez Dr. Mateo Vargas Hernández Dra. Carmen Gutiérrez Castorena Dr. Manuel Sandoval Villa
EDITORES DE ESTILO	M.C. Jorge Alvarado López Ina Aalmers de Aguilar
EDITORA DE ESTILO EN INGLES	Diane Fumiko Miyoshi Udo

## EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

Diseño de portada	Ina Aalmers de Aguilar Sofía Blancas Cando Ricarda Torres Estrada Gardenia Chávez Peña
-------------------	---

## EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

Dr. Juan José Peña Cabriales  
Dr. Manuel Anaya Garduño  
Dr. Jesús Caballero Mellado  
Dr. Lenom J. Cajuste  
Dr. Gabriel Alcántar González  
Dr. Ronald Ferrera Cerrato  
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval  
Dr. Reggie J. Laird  
Dr. Angel Martínez Garza  
Dr. Roberto Núñez Escobar  
Dr. Carlos Ortiz Solorio  
Dr. Enrique Palacios Vélez  
Dr. Oscar L. Palacios Vélez  
Dr. Antonio Turrent Fernández  
Dr. Jorge D. Etchevers Barra  
Dr. Alejandro Velázquez Martínez

## EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

Dr. Winfried E. H. Blum	Austria
Dr. Elemer Bornemisza	Costa Rica
Dr. Luis Alfredo de León	Colombia
Dr. Hari Eswaran	E.U.A.
Dr. Anthony Fischer	Australia
Dr. Juan F. Gallardo Lancho	España
Dr. Renato Grez Z.	Chile
Dr. José M. Hernández Moreno	España
Dr. Eric S. Jensen	Dinamarca
Dr. Walter Luzio Leighton	Chile
Dr. John T. Moraghan	E.U.A.
Dr. Héctor J. M. Morrás	Argentina
Dr. Christian Prat	Francia
Dr. Parker F. Pratt	E.U.A.
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Bernardo Van Ralj	Brasil
Dr. Rafael Villegas Delgado	Cuba
Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. Daniel Buschiazzo E.	Argentina

# TERRA

*Latinoamericana*

## EDITORIAL COMMITTEE

EDITOR	Dr. Antonio Vázquez Alarcón
ASSOCIATE EDITOR	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
TECHNICAL EDITORS	Dr. David Cristóbal Acevedo Dr. David Espinosa Victoria Dra. Ma. del Carmen González Chávez Dra. Edna Álvarez Sánchez Dr. Mateo Vargas Hernández Dra. Carmen Gutiérrez Castorena Dr. Manuel Sandoval Villa
STYLE EDITORS	M.C. Jorge Alvarado López Ina Aalmers de Aguilar
ENGLISH EDITOR	Diane Fumiko Miyoshi Udo

---

## EDITORIAL STAFF

	Ina Aalmers de Aguilar Sofía Blancas Cando Ricarda Torres Estrada Gardenia Chávez Peña
Cover design	

---

## NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Juan José Peña Cabriales  
Dr. Manuel Anaya Garduño  
Dr. Jesús Caballero Mellado  
Dr. Lenom J. Cajuste  
Dr. Gabriel Alcántar González  
Dr. Ronald Ferrera Cerrato  
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval  
Dr. Reggie J. Laird  
Dr. Angel Martínez Garza  
Dr. Roberto Núñez Escobar  
Dr. Carlos Ortiz Solorio  
Dr. Enrique Palacios Vélez  
Dr. Oscar L. Palacios Vélez  
Dr. Antonio Turrent Fernández  
Dr. Jorge D. Etchevers Barra  
Dr. Alejandro Velázquez Martínez

---

## INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Winfried E. H. Blum	Austria
Dr. Elemer Bornemisza	Costa Rica
Dr. Luis Alfredo de León	Colombia
Dr. Hari Eswaran	U.S.A
Dr. Anthony Fischer	Australia
Dr. Juan F. Gallardo Lancho	Spain
Dr. Renato Grez Z.	Chile
Dr. José M. Hernández Moreno	Spain
Dr. Eric S. Jensen	Denmark
Dr. Walter Luzio Leighton	Chile
Dr. John T. Moraghan	U.S.A
Dr. Héctor J. M. Morrás	Argentina
Dr. Christian Prat	France
Dr. Parker F. Pratt	U.S.A.
Dr. Karl Stahr	Germany
Dr. Bernardo Van Raij	Brazil
Dr. Rafael Villegas Delgado	Cuba
Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. Daniel Buschlazzo E.	Argentina

# TERRA

*Latinoamericana*

**SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.**

## **MESA DIRECTIVA 2003-2005**

Presidente	<b>Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez</b>
Vicepresidente	<b>Dr. José A. Cueto Wong</b>
Secretario General	<b>Ing. Andrés Espinosa Carmona</b>
Tesorero	<b>Dr. Javier Z. Castellanos Ramos</b>
Secretario Técnico	<b>Dr. Enrique Salazar Sosa</b>
Secretaria de Relaciones Internacionales	<b>Dr. Rogelio Juárez González</b>
Vocales	<b>Dr. Ernesto Frías Ramírez</b>
	<b>Dra. Christina Siebe Grabach</b>
	<b>Dr. Juan Pedro Flores Marges</b>
	<b>Dra. Claudia Hidalgo Moreno</b>
	<b>Dr. David Cristobal Acevedo</b>
	<b>M.C. Yolanda L. Fernández Pavía</b>
	<b>M.C. Laura B. Reyes Sánchez</b>

## **DIVISIONES Y DISCIPLINAS**

### **División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo**

- a) Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos
- b) Física de Suelos
- c) Química de Suelos
- d) Contaminación

---

### **División II: Relación Suelo - Clima - Biota**

- a) Nutrición Vegetal
- b) Relación Agua - Suelo - Planta - Atmósfera
- c) Biología del Suelo
- d) Tecnología y Uso de Fertilizantes
- e) Uso y Manejo del Agua

---

### **División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo**

- a) Conservación del Suelo
- b) Drenaje y Recuperación
- c) Fertilidad
- d) Productividad de Agrosistemas

---

### **División IV: Educación y Asistencia Técnica**

- a) Educación
- b) Crédito y Asistencia Técnica

**TERRA** Latinoamericana registro en trámite.  
Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.  
Julio - Septiembre de 2004 Volumen 22 Número 3  
**ISSN 0187 - 5779**

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 original y dos copias, redactadas conforme a las Normas para Publicación en la Revista TERRA Latinoamericana a: Editor de la Revista TERRA Latinoamericana. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.  
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Estado de México. México.

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

**Teléfono y Fax** +01(595) 952 17 21  
**e-mail:** terra@correo.chapingo.mx

# TERRA

*Latinoamericana*

## MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

### BOARD

President  
Vicepresident  
Secretary  
Treasurer  
Technical Adviser  
International Relations  
Voters

**Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez**  
**Dr. José A. Cueto Wong**  
**Ing. Andrés Espinosa Carmona**  
**Dr. Javier Z. Castellanos Ramos**  
**Dr. Enrique Salazar Sosa**  
**Dr. Rogelio Juárez González**  
**Dr. Ernesto Frías Ramírez**  
**Dra. Christina Siebe Grabach**  
**M.C. Jesús P. Amado Alvarez**  
**Dr. Juan Pedro Flores Marges**  
**Dra. Claudia Hidalgo Moreno**  
**Dr. David Cristobal Acevedo**  
**M.C. Yolanda L. Fernández Pavía**  
**M.C. Laura B. Reyes Sánchez**

## DIVISIONS AND DISCIPLINES

### Division I: Diagnosis, Methodology and Evaluation of the Soil Resource

- a) Soil Genesis, Morphology and Classification
- b) Soil Physics
- c) Soil Chemistry
- d) Pollution

---

### Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

- a) Plant Nutrition
- b) Water - Soil - Plant - Atmosphere Relationship
- c) Soil Biology
- d) Technology and Fertilizer Use
- e) Water Management and Use

---

### Division III: Use of the Soil Resource

- a) Soil Conservation
- b) Drainage and Restoration
- c) Soil Fertility
- d) Agrosystem Productivity

---

### Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Assistance

**TERRA** Latinoamericana Registration pending  
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science  
July - September, 2004 Volume 22 Num. 3

**ISSN 0187 - 5779**

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 original and two copies must be sent to:  
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:** Edificio del Departamento de Suelos  
Universidad Autónoma Chapingo  
56230 Chapingo, Estado de México.

**Telephone - Fax:** +52 (595) 952 17 21  
**e-mail:** terra@correo.chapingo.mx

# TERRA

*Latinoamericana*

JULIO - SEPTIEMBRE DE 2004 • VOLUMEN 22 • NUMERO 3  
JULY - SEPTEMBER, 2004 • VOLUME 22 • NUMBER 3

## DIVISION I

- 243 Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán.  
Relationship between landforms and soils in karst zones of Yucatán.  
*Francisco Bautista-Zúñiga, Héctor Estrada-Medina, Juan J. Ma. Jiménez-Osorio y José A. González-Iturbe*
- 255 Morfogénesis de suelos con capas endurecidas de la Sierra de Guadalupe, México.  
Morphogenesis of soils with hardened layers of the Sierra de Guadalupe, Mexico.  
*Gilberto Vela-Correa y David Flores-Román*
- 267 Cambios de uso de suelo mediante técnicas de sistemas de información geográfica en una región cacaotera.  
Change of land use by means of geographical information systems in a cacao region.  
*Rodimiro Ramos-Reyes, David J. Palma-López, Carlos A. Ortiz-Solorio, Carlos F. Ortiz-García y Gabriel Díaz-Padilla*
- 279 Relaciones entre el manejo del huerto de nogal y la porosidad del suelo.  
Management of pecan orchards as related to soil porosity.  
*Guillermo González-Cervantes, Ignacio Sánchez-Cohen y David García-Arellano*
- 289 Evolución de las fracciones húmicas de suelos en la zona chinampera de la Ciudad de México.  
Evolution of humic fractions from soils in the chinampa zone from Mexico City.  
*Amanda Laura Reyes-Ortigoza y Norma Eugenia García-Calderón*

# TERRA

*Latinoamericana*

## DIVISION II

- 299 Rendimiento y calidad de fibra de algodón en respuesta al número de riegos y dosis de nitrógeno.  
Cotton yield and fiber quality in response to nitrogen rate and number of irrigations.  
*Arturo Palomo-Gil, Arturo Gaytán-Mascorro, Rodolfo Faz-Contreras, David G. Reta-Sánchez y Emiliano Gutiérrez-del Río*
- 307 CO<sub>2</sub> y dinámica de poblaciones microbianas en composta de estiércol y paja con aireación.  
CO<sub>2</sub> and microbial population dynamics in manure and straw compost under aeration.  
*J. Velasco-Velasco, B. Figueroa-Sandoval, R. Ferrera-Cerrato, A. Trinidad-Santos y J. Gallegos-Sánchez*
- 317 Reducción de la incidencia de *Phytophthora capsici* Leo en el sistema radical de plántulas de chile pre-micorrizadas con *Glomus intraradices*.  
Reduction of *Phytophthora capsici* Leo incidence on *Glomus intraradices*-premycorrhized root system of chili seedlings.  
*D. Espinosa-Victoria, D. González-Mendoza, J. Placencia-de la Parra y R. García-Espinosa*
- 327 Producción de agua y sedimentos por impacto de ciclones tropicales, en la cuenca hidrográfica del río La Sabana, Guerrero.  
Production of water and sediments by impact of tropical hurricanes on the Sabana River watershed, Guerrero State.  
*Isidro Villegas-Romero, José Luis Oropeza-Mota y Enrique Mejía-Sáenz*

# TERRA

*Latinoamericana*

## DIVISION III

- 335** Sistemas de producción de maíz y población de macrofauna edáfica.  
Systems of corn production and population of edaphic macrofauna.  
*Esperanza Pérez-Agis, Marcelino Vázquez-García, Diego González-Eguiarte, Enrique Pimienta-Barrios, Miguel B. Nájera-Rincón y Pablo Torres-Morán*
- 343** Productividad de la alfalfa en condiciones de salinidad en el Distrito de Riego 017, Comarca Lagunera.  
Alfalfa productivity under conditions of salinity in the Irrigation District 017, Comarca Lagunera.  
*Jesús Santamaría-César, Uriel Figueroa-Viramontes y Ma. del Consuelo Medina-Morales*
- 351** Evaluación de abono orgánico-mineral de cachaza en la producción y calidad de la caña de azúcar.  
Evaluation of organic-mineral fertilizer of filter cake on yield and quality of sugarcane.  
*Jesús Arreola-Enriquez, David J. Palma-López, Sergio Salgado-García, Wilder Camacho-Chiu, J. Jesús Obrador-Olán, J. Francisco Juárez-López y Laureano Pastrana-Aponte*
- 359** Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México.  
Variability of organic carbon in hillside soils of the Southeast of Mexico.  
*Miguel Ángel Vergara-Sánchez, Jorge D. Etchevers-Barra y Mateo Vargas-Hernández*



# TERRA

*Latinoamericana*

## DIVISION III

- 369** Almanaque tecnológico: Un medio para difundir innovaciones a productores durazneros de Jérez, Zacatecas, México.  
Technological Almanac: A mean for making fruit growing innovations known to peach farmers of Jerez, Zacatecas, Mexico.  
*Guillermo Galindo-González y Jaime Mena-Covarrubias*

## ENSAYO / Essay

- 377** Transporte de sedimentos en corrientes naturales: Revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo.  
Sediment transport in natural channels: Technical review of empirical bedload equations.  
*Miguel Bravo-Espinosa, Waite R. Osterkamp y Vicente L. López*

Revisores y Editores Técnicos de este número  
Reviewers and Technical Editors of this number

**387**

# RELACIÓN ENTRE EL RELIEVE Y UNIDADES DE SUELO EN ZONAS CÁRSTICAS DE YUCATÁN

## Relationship Between Landforms and Soils in Karst Zones of Yucatán

Francisco Bautista-Zuñiga<sup>1‡</sup>, Héctor Estrada-Medina<sup>1</sup>, Juan J. Ma. Jiménez-Osornio<sup>1</sup> y José A. González-Iturbe<sup>2</sup>

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue el estudio de la relación entre los patrones de relieve y las unidades de suelo según la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) en zonas cársticas con dos zonas geológicamente diferentes, en Yucatán, México, así como la selección de un grupo mínimo de datos necesarios para la identificación de los suelos, que disminuyan el costo de levantamientos utilitarios. La zona de estudio se dividió en tres subzonas, una con calizas del Plioceno-Mioceno (PM), otra con calizas del Eoceno (E) y la frontera geológica (FG). Se caracterizaron los patrones de relieve y las rocas. En cada patrón de relieve, se realizaron pozos pedológicos en los montículos y planicies. Se identificaron los estadios y el grado de evolución del paisaje geopedológico. En las dos zonas geológicas y su frontera se reconocieron ocho patrones de relieve. Los suelos fueron: Leptosol lítico (LPli), Cambisol (CM) y Luvisol (LV). En los suelos de montículo, los suelos fueron LPli, Leptosol hiperesquelético (LPhsk) y Calcisol (CL). Se identificaron cuatro grados de evolución, I en PM, II en PM y en la FG; y III y IV en la zona E. En PM se presentaron los menores grados de evolución, como se esperaba. Los suelos de acuerdo con los grados de evolución del karst presentan las siguientes catenas: Leptosol-Leptosol, Leptosol-Cambisol, Calcisol-Cambisol, Leptosol-Luvisol. La utilización de los patrones de relieve en el estudio de suelos facilita la comprensión de su distribución, lográndose una caracterización más útil y práctica para la toma de decisiones relacionadas con el uso del recurso suelo.

<sup>1</sup> Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (bzuniga@tunku.uady.mx)

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

Recibido: Julio de 2002. Aceptado: Febrero de 2004.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 243-254.

*Palabras clave:* Evolución del karst, Calcisol, Leptosol, Luvisol, sistemas geopedológicos.

### SUMMARY

The aim of this work was to study the relationship between the landform pattern and the soil unit using the World Reference Base for Soil Resources in karst zones with two geology zones in Yucatán, Mexico, as well as to identify a minimum data set of soil properties to reduce costs of utilitarian soil surveys. The study zone comprises three distinctive subzones with rocky limestone substrates dating from the Pliocene-Miocene (PM), Eocene (E), and geologic boundary (FG). Both landform patterns and superficial rocks were characterized; the soil pits were carried out on small hills and plains. The evolution of the geopedological landscape was then identified. Results showed eight landform patterns in the two areas and their boundaries. Soils in plains were Litic leptosol (LPli), Cambisol (CM), and Luvisol (LV). Soil on hills were: LPli, LPhsk, and CL. Four degrees of evolution were identified: I for PM, II for PM and the geological frontier, and III and IV in the E zone. The zone PM had the lowest degree of evolution. Soils showed the following catenas according to the degrees of evolution: Leptosol-Leptosol, Leptosol-Cambisol, Calcisol-Cambisol, and Leptosol-Luvisol. The use of landform patterns for the study of soils facilitates the understanding of present-day soil distribution and makes characterizations more useful and practical for decision-making related to soil management.

*Index words:* Karst evolution, Calcisol, Leptosol, Luvisol, geopedological systems.

### INTRODUCCIÓN

En México, desde la década de los 90s se ha promovido la elaboración de planes de ordenamiento ecológico del territorio (POET), para lo cual se recomienda, en primer término, la realización de un

diagnóstico ambiental con cartografía temática a escala 1:20 000 (geomorfología, suelos, uso del suelo y vegetación).

En la metodología para el levantamiento de suelos, se ha establecido la influencia de los procesos geomorfológicos sobre sus propiedades y evolución (Nash, 1980; Gerrard, 1992). Esta influencia resulta en particular notable en zonas montañosas, con relieves abruptos, donde los procesos geomorfológicos son activos y las variaciones de los tipos edáficos resultan dependientes de la litología y de la geomorfología. En estos casos, las imágenes de satélite y fotografías aéreas son de gran utilidad en la realización de inventarios de suelos. Por esto, la norma oficial mexicana (NOM-023-RECNAT-2000) para la elaboración de cartografía de suelos 1:20 000 indica que las unidades de fotointerpretación se trazan sobre fotografía aérea de escala mayor que el mapa de publicación, como 1:10 000 p.e. Todos los linderos se verifican en toda su extensión mediante barrenaciones sistemáticas (SEMARNAP, 2000). Sin embargo, en las zonas cársticas, como en el centro y norte de Yucatán, se presentan planicies onduladas con montículos de 1 a 5 m de altura y con cobertura vegetal; por esta razón, las fotografías aéreas 1:20 000 no son de utilidad para trazar las unidades de mapeo en levantamientos de suelo. Además, se sabe de la gran heterogeneidad espacial, en la que se encuentran las unidades de suelo a unos cuantos metros de distancia (Duch, 1988; 1991; Pope *et al.*, 1996; Bautista-Zúñiga *et al.*, 2000; 2003).

En este estudio, se parte de la premisa siguiente: muchos componentes del paisaje son predecibles, así los suelos asociados a los componentes del paisaje como el relieve, también son predecibles; sin embargo, hay dos categorías de variabilidad en estudios de paisaje: la sistemática y al azar dependientes del grado de observación (Hall y Olson, 1991). En ambos casos, se requiere la caracterización de los patrones espaciales en las formas del paisaje para identificar el error sistemático y el error por azar, para: a) entender las relaciones existentes entre el mesorelieve y las unidades de suelos; b) la identificación del grado de evolución de la asociación relieve-suelos; y c) la identificación del grado de estabilidad, penestabilidad e inestabilidad (Cvijic, 1918; Arnold y Wilding, 1991; Geisert, 2000). En la actualidad, la relación meso y microrelieve-suelos se está estudiando debido al interés en el conocimiento de la variabilidad espacial para la instrumentación de planes de agricultura de precisión o también llamada

de sitio específico. Para esto, se requiere de la medición de la variabilidad espacial del suelo y determinar las escalas de ocurrencia para generar explicaciones sobre la variabilidad observable y determinar las posibilidades de predicción.

Por otro lado, los estudios de suelo en zonas de karst tropical son escasos y de tipo cualitativo debido a: a) la presencia de varios grupos de suelo en espacios menores que 1 ha; b) la dificultad de hacer inventarios de suelo en zonas de alta variabilidad espacial por el micro y mesorelieve; c) el "escaso valor agrícola" desde el punto de vista de la agricultura moderna (Isphording, 1975, 1984; Magier y Rabina, 1984; Caamal *et al.*, 2001; Weisbach *et al.*, 2002; Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003).

A estos inconvenientes se le suma el costo elevado de los levantamientos de suelo (Zinck, 1990), lo cual ha ocasionado que las prácticas de manejo agrícola del suelo se realicen sin el conocimiento de sus propiedades químicas, físicas y biológicas, así como de los procesos involucrados, lo que origina: la presencia de problemas de degradación edáfica, sobre uso de insumos agrícolas y deficiente disposición de desechos.

Ante esta situación, en el mundo han surgido nuevos enfoques, tanto en la generación de datos de suelos, como en su manejo, por ejemplo: a) elaboración de mapas de atributos de suelo y clasificación y manejo de los epipedones (FAO 1998); b) tratamientos geoestadísticos (Cipra *et al.*, 2003); c) mapas morfométricos de suelos-terreno elaborados con base en modelos digitales de elevación (Wagenet *et al.*, 1991); d) generación de datos mediante funciones de transferencia; e) Mapas participativos de suelos/clases de tierra, con la participación activa de campesinos/agricultores, considerando el conocimiento indígena o local (Ortiz *et al.*, 1990; Barrera-Bassols y Zinck, 2000); y f) Mapas de paisaje edáfico considerando la integración de la geomorfología como base cartográfica y de la pedología como el contenido edáfico (Hartung *et al.*, 1991).

En esta investigación, se planteó como objetivo la generación de datos que le den precisión al estudio de la relación mesorelieve y unidades de suelo con el fin de identificar los patrones de variación de suelos en zonas de karst en Yucatán, México, así como la selección de un grupo de propiedades mínimas con las que se puedan identificar los suelos en levantamientos utilitarios.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de Estudio

El municipio de Hocabá se encuentra en la región central del estado de Yucatán a 20° 49' N y 89° 15' O, paisaje geomorfológico definido por Lugo y García (1999) como planicie estructural casi horizontal marginal a la costa de hasta 10 m de altitud (Figura 1). El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano  $AW_1(i')g$  (Orellana *et al.*, 1999). El tipo de vegetación corresponde a selva baja caducifolia (Flores y Espejel, 1994) y los principales usos del suelo son la producción de henequén y la agricultura de roza-tumba-quema. Por la geología, la zona de estudio se puede dividir en dos zonas: sureste con calizas del Plioceno-Mioceno (PM) (13 a 25 millones de años) de color crema y pardo, microcristalinas y con gran cantidad de fósiles y, en el resto de la zona, calizas del Eoceno (E) (58 millones de años) de grano fino silicatadas con escasa presencia de fósiles (INEGI, 1983).

### Patrones de Relieve

Para la identificación, caracterización y localización geográfica de los patrones de relieve, se analizaron 45 sitios de muestreo fotográfico sobre fotografías aéreas 1:20 000 en escala de grises. Los sitios seleccionados fueron aquellos lugares que no presentaban cobertura vegetal y que permitían la observación de las formas del relieve. Cada sitio de muestreo fue de una extensión de 40 000 m<sup>2</sup> (200 x 200 m). En cada sitio, se contaron los montículos y se midió la superficie y el diámetro de las planicies de disolución con el módulo AREA del programa Idrisi (Eastman, 1997).

En campo, se revisaron 74 sitios de muestreo, en los cuales se tomó nota del tipo de patrón de relieve de acuerdo con el tamaño de los montículos (altura y diámetro) y la extensión de las planicies de disolución; además, se tomaron muestras de rocas y sus fragmentos.

### Rocas

Se realizaron recorridos de campo para la toma de muestras de rocas en la zona que corresponden a la época PM, E y en la frontera geológica (FG) entre ambas (INEGI, 1983). En cada una, se tomaron muestras de rocas, tanto superficiales, como

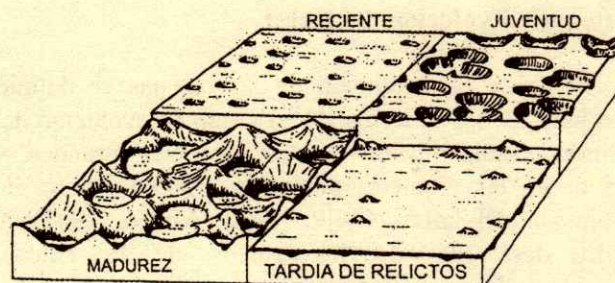


Figura 1. Etapas evolutivas lineales del paisaje carsotectónico.

subsuperficiales, con la finalidad de explorar la relación entre las rocas, los patrones de mesorelieve y los suelos.

Los análisis realizados a las rocas y piedras fueron, en primer término, reacción al HCl a 10% y consistencia. También se realizaron observaciones con microscopio estereoscópico para la medición del tamaño de los cristales. Los minerales que componen las rocas se identificaron mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) con un difractómetro Philips PW-1050. El contenido total de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se midió por espectroscopía de fluorescencia de rayos X con un espectrómetro secuencial Siemens SRS 3000 automatizado.

### Suelos

Una vez seleccionados los patrones de relieve, se realizaron pozos pedológicos en las dos formas de relieve, montículos y planicies. Los perfiles de suelo se describieron de acuerdo con Siebe *et al.* (1996).

Las muestras de suelo se tomaron por horizonte para la realización de análisis físicos y químicos. Los análisis de las muestras de suelo fueron: color por comparación con las tablas Munsell; separación y medición de la tierra fina y grava; textura por el método del densímetro de Bouyoucos (Okalebo *et al.*, 1993); el porcentaje de gravas por tamizado a 2 mm, pH por el método potenciométrico relación suelo:agua 1:2.5 (Lean, 1982); carbonato de calcio equivalente por el método del calcímetro (USDA, 1996); materia orgánica con dicromato de potasio y aplicación de calor externo (Nelson y Sommers, 1982); capacidad de intercambio de cationes y cationes intercambiables desplazados con acetato de amonio y medidos con espectroscopía de absorción atómica. Los suelos se clasificaron de acuerdo con la World Reference Base (SICS-ISRIC-FAO, 1999).

## Catenas y Evolución del Karst

El grado de evolución de las catenas se definió con base en dos criterios: 1) El grado de evolución del relieve, siendo menor en las planicies grandes y mayor en las planicies pequeñas según la teoría de evolución del karst (Cvijic, 1918; Mateo, 1981); y 2) El desarrollo de los suelos de la catena, considerando que existe una secuencia de desarrollo pedogénico de los grupos de suelo en zonas de karst que va de LP < CM < CL < LV (Gile *et al.*, 1966).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Patrones de Mesorelieve

El análisis de las fotografías aéreas, escala 1:20 000, permitió la identificación de 12 patrones de relieve; sin embargo, con el trabajo de campo se reconocieron ocho patrones de relieve (Cuadro 1). La verificación en campo reveló que, cuando los montículos se encuentran muy cerca uno de otro, en la fotografía aérea no se alcanza a observar la separación y dan la impresión de ser montículos grandes. Otra limitante para la identificación de los patrones de relieve con fotografías aéreas es la cobertura vegetal abundante que no permite la observación de los montículos. Esto debido a que, en la zona de estudio, se practica una agricultura de roza, tumba y quema que genera un mosaico de superficies que van de 1 a 6 ha que se encuentran desprovistas de vegetación dentro de una matriz de vegetación secundaria.

Los Patrones de relieve 3 y 5 incluyen dos tipos de montículos siendo, por lo mismo, los de mayor heterogeneidad espacial; dos de estos patrones de relieve se localizan en la zona E y una en FG.

Existen dos formas de relieve: montículos y planicies, es decir, formas positivas y neutras, respectivamente. El término local que los campesinos le dan a los montículos es "altillos" y a las planicies les denominan "planadas".

En la zona E, el tamaño de las planicies es menor que en las planicies de las zonas PM y FG (Cuadro 1). Esta situación es producto del escaso desarrollo del karst en el centro y norte de Yucatán.

Por otro lado, el escaso contraste en el relieve de la zona de estudio en comparación con el sur del estado de Yucatán, en el que los montículos de mayor tamaño y las planicies de mayor superficie, como lo mencionaron Lugo *et al.* (1992), se debe a la menor precipitación en el norte de Yucatán (990 mm año<sup>-1</sup>) en comparación con la del sur (1200 mm).

### Rocas y sus Fragmentos

En la zona de estudio, se encontraron dos tipos de roca: un fragmento de roca (piedra) y otra con dos modalidades: roca y fragmento, nombradas por el tamaño del cristal predominante y por su posición en el perfil.

La roca más abundante en la superficie es la calcita con microcristales (Mudstone 1), presenta canales de disolución y también se llega a encontrar en la parte baja del perfil de los suelos someros de las planicies. En ella se forman colonias de algas que van solubilizando la roca hasta formar hoyos, localmente llamados "sartenejas", donde el suelo y la materia orgánica se acumulan. Es la roca con menor contenido de óxidos y es el material parental consolidado, que le imprime el carácter lítico a los suelos someros (LPl<sub>i</sub>) (Figura 2; Cuadro 2). Se localiza principalmente en la zona PM.

Cuadro 1. Características de los patrones de relieve.

Geología	Patrón de relieve	Diámetro de planicies	Diámetro de montículos	Altura de montículos	Número de montículos
		----- m -----			
PM	7	36.2 ± 19.1	30 ± 5	3.5 ± 0.5	17 ± 4
PM	8	52.2 ± 2.8	25 ± 5	2.5 ± 0.5	10 ± 2
PM	4	36.5 ± 10.3	30 ± 10	4.0 ± 0.5	16 ± 1
FG	6	33.0 ± 3.5	25 ± 5	4.0 ± 0.5	17 ± 2
E	2	28.0 ± 8.8	25 ± 5	4.0 ± 0.5	18 ± 9
E	5	25.4 ± 17.0	15 ± 5	1.5 ± 0.5	9 ± 4
			25 ± 5	2.5 ± 0.5	
E	3	30.3 ± 4.8	15 ± 5	< 1	17 ± 6
			30 ± 10	3.5 ± 0.5	
E	1	32.1 ± 2.4	25 ± 5	3.0 ± 0.5	12 ± 1

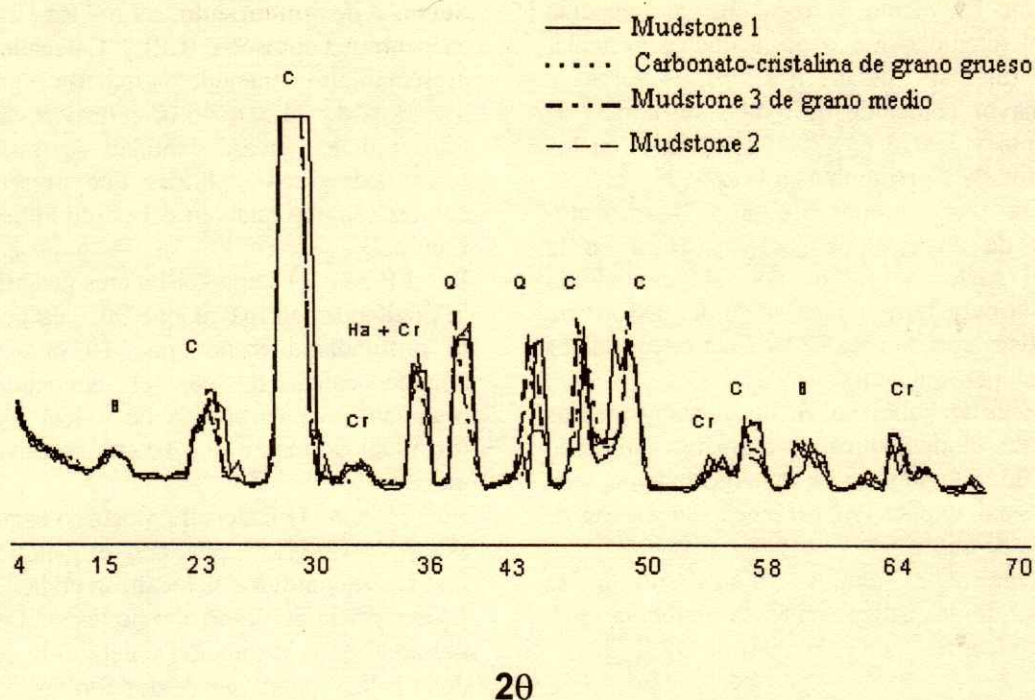


Figura 2. Identificación de los minerales presentes en las rocas y fragmentos de caliza. B = bohemita, C = calcita, Q = cuarzo, Cr = cristobalita, Ha = halloisita.

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de las calizas.

Características	Roca (Mudstone 1)	Roca (Mudstone 2)	Fragmento de roca (Mudstone 3)	Roca y fragmentos (carbonato cristalina de grano grueso)
	Cristales <0.25 mm	Cristales <0.25 mm	Grano mediano < 10 mm > 0.05 mm	Granos grandes > 10 mm
Localización	Superficie y en el perfil	Parte baja del perfil	Superficie y parte baja del perfil	Superficie
Reacción al HCl	Débil	Muy fuerte	Fuerte	Muy débil
Grado de consolidación	Alto	Muy bajo	Bajo	Alto
SiO <sub>2</sub> (%)	0.19	0.58	1.61	0.59
TiO <sub>2</sub> (%)	0.01	0.01	0.02	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.48	0.49	1.03	0.49
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub> (%)	<0.006	<0.006	0.03	<0.006
MnO (%)	0.005	0.005	0.008	0.003
MgO (%)	0.35	0.59	0.71	0.70
CaO (%)	55.1	54.9	52.8	54.6
Na <sub>2</sub> O (%)	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
K <sub>2</sub> O (%)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.019	0.024	0.035	0.015

Otra roca con microcristales (Mudstone 2) que se localiza en la parte baja de los Calcisoles y bajo la roca en la mayoría de los Leptosoles, es de color blanco a crema, presenta estructura laminar de alta

porosidad, es la roca de menor consolidación; su consistencia es muy semejante al banco de caliza no petrificado.

La calcita de granos medianos. (Mudstone 3) en general se encuentra en la superficie y en la parte baja del perfil, como fragmento de roca que, al romperse por efecto del intemperismo o de la quema agrícola, forma gravas (diámetro de 0.2 a 2 cm), es porosa y presenta el mayor contenido de óxidos insolubles de silicio, aluminio y hierro (2.93%). Es común en los suelos de montículo y predomina en la zona E.

La calcita con granos grandes (carbonato-cristalina) es de color blanco, se encuentra en la superficie del suelo, se rompe con el calor de la quema agrícola para formar piedras de diámetro entre 15 y 25 cm. Este tipo de roca se localiza en los suelos esqueléticos e hiperesqueléticos.

La presencia de halloisita en las rocas y piedras revela que este aluminosilicato, también encontrado en los suelos de la región, no es de neoformación, sino heredado, lo cual explica su presencia en suelos de alta saturación de bases.

El contenido de óxidos totales revela la predominancia de la caliza sobre la dolomita que, además, no se identificó con el análisis de DRX.

### Unidades de Suelo

**Suelos de planicie.** Los suelos localizados en las planicies no presentan fases pedregosas en comparación con los suelos de montículo en los que abundan las piedras (50 a 100%). Los suelos de planicie presentan contenido de materia orgánica de 11.4 a 17.2%, valores menores que en los suelos de montículo que van de 21.3 a 49.9% (Cuadro 3).

En cuanto a la clasificación del suelo, en las planicies del paisaje cárstico del municipio de Hocabá, se encuentran las unidades: 1) Luvisol crómico (LVcr) por la presencia de un horizonte Bt y CIC mayor que 24 cmol(+) kg<sup>-1</sup> de arcilla en todo el perfil; 2) Cambisol epiléptico (CMlep) y Cambisol endoléptico (CMLen) y endoesquelético (CMskn), todos por la presencia del horizonte B cámbico y por la profundidad y pedregosidad, respectivamente; y 3) Leptosol lítico (LPli) por la profundidad inferior a 10 cm (Cuadro 3).

Los suelos de las planicies son la parte de la catena por la que se infiltra la mayor cantidad de agua hacia el acuífero, por esto son los suelos más lavados y con menor contenido de carbonato de calcio en la tierra fina. La secuencia de desarrollo de estos suelos, producto de la disolución de la caliza y de la translocación de arcilla, es del tipo LPli < CM < LV (Figura 3).

La principal restricción para el cultivo es la profundidad efectiva inferior a 10 cm en LPli.

**Suelos de montículo.** En los montículos, se encuentran Leptosoles (LP) y Calcisoles (CL), ambos presentan alto contenido de materia orgánica de 23.5 a 49.9% y de 21.3 a 45.0%, respectivamente. Ambos grupos tienen escasa cantidad de tierra fina por las fases pedregosas y líticas que presentan y son de colores oscuros que van del pardo al negro (Cuadro 4; Figura 4).

Los LP son: 1) Leptosol hiperesquelético (LPshk) por la pedregosidad mayor que 90% en peso; 2) LPli por la profundidad menor que 10 cm; y 3) Leptosol húmico calcárico, por el contenido de materia orgánica y el carbonato de calcio menor que 40% (profundidad mayor que 10 cm, no es réndzico y no es mólico).

Los CL son: 1) Calcisol epipéptico esquelético (CLtp sk) y 2) Calcisol epiléptico esquelético (CLlep-sk). Los CL encontrados se localizan en la zona E.

La secuencia de desarrollo de los suelos de montículo, producto de la disolución y del grado de consolidación de la caliza, puede ser de dos formas: 1) LPli < LPshk en el caso de la caliza consolidada y 2) LP < CL en la caliza de menor consolidación (Figura 4).

En los montículos hay principalmente suelos con problemas de profundidad efectiva. En estos suelos, se dificulta la utilización de maquinaria agrícola, tanto por la pendiente, como por la pedregosidad superficial.

Las propiedades de los suelos, sencillas y económicas, que pueden ser de utilidad para la realización de esquemas de clasificación utilitaria son: posición en el relieve, color, profundidad, pedregosidad o rocosidad, y el contenido de CaCO<sub>3</sub>. Las fases y la posición en el relieve se pueden utilizar como criterio de mecanización potencial, y la profundidad como criterio de extensión radical potencial o profundidad efectiva.

### Catenas y Evolución del Karst

De acuerdo con las características del mesorelieve y el desarrollo de los suelos, se identificaron cuatro grados de evolución, I en la zona PM, II en PM y FG, III y IV en E (Cuadro 5; Figura 5). Las zonas de menor tiempo geológico de formación y con rocas microcristalinas presentaron los menores grados de evolución, como se ha encontrado en otros trabajos realizados en la misma zona de estudio (Pope *et al.*, 1996).

Cuadro 3. Propiedades de los suelos de las planicies.

H	Prof.	Color seco	Estructura	Aren	Arc	Limo	Clase textural	Gravas	Piedras	CaCO <sub>3</sub>	pH	MO	CIC	Ca	Mg	Na	K	CIC (Arc)	SB	
	cm			---	%	---		---	%	---	%	---	---	---	---	---	---	---	---	
LVro	A1	0-6	5YR2.5/3	G-f-a	47.1	25.5	27.5	M	0	0	0.11	7.4	11.4	36.2	21.6	3.6	0.1	1.1	142	73
PR 1	A2	6-20	5YR3/3	Bsa-f-m	48.0	26.0	26.0	M	0	0	0.08	6.6	8.1	25.5	12.6	2.5	0.3	0.3	98	61
	Bt1	20-45	2.5YR3/6	Ba-m-b	40.2	37.7	22.1	M-Arc	0	0	0.08	6.7	3.8	24.9	15.3	0.9	0.2	0.3	66	67
	Bt2	45-85	2.5YR3/6	Ba-m-b	30.4	47.7	22.5	Arcilloso	0	0	0.08	7.0	3.1	19.0	16.2	1.8	0.4	0.3	40	97
	Bt3	85-109	2.5YR4/6	Ba-m-b	36.8	39.2	24.0	M-Arc	0	0	0.08	7.1	3.3	15.1	16.2	1.0	0.3	0.3	39	100
	Bt4	109-150	2.5YR4/6	Ba-m-b	34.3	37.3	28.4	M-Arc	0	0	0.09	7.2	2.7	10.4	14.8	3.2	0.3	0.3	28	100
CMlep	A	0-11	5YR3/3	Bsa-f-a	48.8	20.6	31.4	M	0	0	0.06	7.6	15.8	39.7	31.5	2.7	0.3	0.8	193	89
PR 2	Bw1	11-23	5YR3/3	Bsa-f-a	48.0	19.6	32.4	M	0	0	0.07	7.6	13.8	47.8	31.0	2.9	0.1	4.4	244	81
	Bw2	23-38	5YR3/2	Ba-mf-b	46.1	24.5	29.4	M	0	0	0.09	7.5	11.7	29.2	25.8	3.2	0.2	0.4	119	100
LVcr	A	0-14	5YR4/4	Bsa-f-a	47.0	20.6	32.4	M	0	0	0.41	7.9	12.3	39.5	35.2	8.3	0.1	3.7	192	100
PR 3	Bt1	14-34	5YR4/5	Bsa-mf-m	39.2	30.4	30.4	M-Arc	0	0	0.07	6.8	5.1	11.6	13.0	1.4	0.1	1.3	38	100
	Bt2	34-50	5YR4/5	Ba-mf-m	42.2	32.3	25.5	M-Arc	0	0	0.07	6.8	4.2	20.6	23.4	0.7	0.2	0.6	64	100
	Bt3	50-80	5YR4/3	Ba-mf-m	37.3	37.2	25.5	M-Arc	0	0	0.06	6.9	3.6	24.4	19.1	0.7	0.1	0.4	66	86
CMlen	A1	0-4	5YR4/3	G-f-a	45.1	21.6	33.3	M	5.2	0	0.52	7.4	18.8	46.0	39.0	3.6	0.2	2.3	213	100
PR 4	A2	4-22	5YR4/4	Bsa-mf-m	49.0	19.6	31.4	M	0	0	0.13	7.3	12.3	33.2	38.5	2.3	0.1	1.0	169	100
	Bw1	22-33	5YR3/6	Ba-mf-m	54.9	15.7	25.5	M-Arn	5.3	0	0.13	7.3	8.1	29.0	30.0	2.5	0.1	0.4	185	100
	Bw2	33-55	5YR4/3	Ba-mf-b	61.8	16.5	22.5	M-Arn	3	0	0.39	7.5	9.1	25.5	19.5	1.2	0.1	0.3	155	100
	Bw3	55-75	5YR4/3	Ba-mf-b	51.0	17.5	32.5	M	2.3	0	1.53	7.5	5.5	34.8	35.5	1.0	0.1	0.2	199	100
CMlen	A1	0-5	5YR4/4	Bsa-mf-m	47.0	19.0	34.0	M	1	0	0.14	7.1	15.4	33.9	23.5	11.7	0.1	2.0	178	100
PR 5	A2	5-19	5YR3/3	Bsa-mf-m	51.0	21.6	28.0	MAA	0	0	0.11	6.8	11.0	38.1	26.6	3.4	0.1	0.9	176	82
	Bw	19-32	5YR3/6	Ba-mf-b	57.0	18.0	25.0	M-Arn	0	5	0.08	7.4	7.9	42.0	23.0	5.4	0.1	1.2	233	71
	C	32-54	5YR3/6	Ba-mf-b	65.0	19.0	16.0	M-Arn	0	90	0.11	7.7	6.9	45.5	20.7	12.2	0.1	0.6	239	74
CMlen	A1	0-4	7.5YR3/3	G-mf-m	58.0	18.0	24.0	M-Arn	0	0	0.4	7.0	14.8	53.3	36.2	34.4	0.1	2.1	296	100
PR 6	A2	4-15	7.5YR3/4	Bsa-mf-m	51.0	18.0	31.0	M-Arn	0	0	0.08	6.4	11.6	67.5	25.0	45.6	0.1	0.6	375	100
	Bw1	15-30	5YR4/4	Ba-mf-m	53.0	18.0	29.0	M-Arn	0	0	0.08	6.3	7.7	66.2	33.2	46.6	0.1	0.3	368	100
	Bw2	30-42	5YR4/4	BA-mf-b	52.0	20.0	28.0	M-Arn	0	0	0.08	6.4	9.5	75.4	39.6	51.2	0.1	0.3	377	100
	B/C	42-62	5YR4/4	Ba-mf-b	48.0	20.0	32.0	M	0	0	0.09	6.7	10.9	56.2	26.8	32.2	0.1	0.3	281	100
LPli-ro	A	0-9	5YR 4/4	Bsa-mf-m	43.0	19.0	38.0	M	0	0	0.37	7.4	14.0	47.2	23.6	16.6	0.1	2.8	248	100
CMskn	A1	0-9	5YR3/3	Bsa-mf-m	42.0	26.0	32.0	M	0	0	0.10	7.2	17.2	51.2	32.0	21.4	0.1	0.8	197	100
	A2	9-17	5YR4/4	Bsa-mf-b	50.0	22.0	28.0	M	0	0	0.09	7.0	11.0	49.9	27.8	25.3	0.7	0.6		100
PR 8				mf-b															227	
	Bw1	17-39	5YR4/6	Ba-mf-b	51.0	21.0	28.0	M	0	0	0.06	6.9	10.0	43.2	30.5	15.9	0.1	0.3	206	100
	Bw2	39-56	5YR4/6	Ba-mf-b	58.0	16.0	26.0	M-Arn	0	20	0.08	7.0	6.9	44.1	29.2	18.8	0	0.2	276	100
	C	56-100	5YR4/6	Ba-mf-b	47.0	19.0	33.0	M	23	67	0.09	7.2	7.2	29.2	20.5	12.2	0.1	0.3	154	100

PR = patrón de relieve; M = migajón; M-Arn = migajón arenoso; M-Arc = migajón arcilloso; MAA = migajón arcillo-arenoso. Forma de los agregados (G = granular, Bsa = bloques subangulares, Ba = bloques angulares). Tamaño de agregados (mf = muy fino, f = fino, medio)- Estabilidad (b = baja, m = moderada, a = alta).

La altura y el diámetro de los montículos no tienen relación con el grado y con la evolución, sólo el diámetro de la planicie indica que a mayor grado de evolución del karst, menor tamaño de planicie (25 a 32 m); esto parecería una contradicción con la teoría del karst en ambientes tropicales, en los cuales dominan las formas positivas del relieve y a mayor grado de evolución presentan mayor altura de las formas de relieve (Mateo, 1981; Trudgill, 1985). Sin embargo, como el karst de la zona de estudio se encuentra en su etapa de formación reciente, las formas positivas del relieve (montículos) comienzan a formarse, motivo por el cual la expresión altitudinal es

escasa y los piedemontículo son extensos, lo que reduce el tamaño de las planicies en los mayores grados de evolución.

En las regiones de mayor precipitación pluvial (1047 mm), como en el sur de la península de Yucatán, el relieve y los suelos muestran un mayor grado de evolución del karst, es decir, etapa tardía de relictos caracterizada por la presencia de planicies del doble al triple de tamaño de las encontradas en este estudio y con predominancia de LV (Lugo, 1999).

En este estudio, las planicies de menor tamaño corresponden a las zonas de mayor grado de evolución (IV y V). Por el contrario, en las etapas reciente y



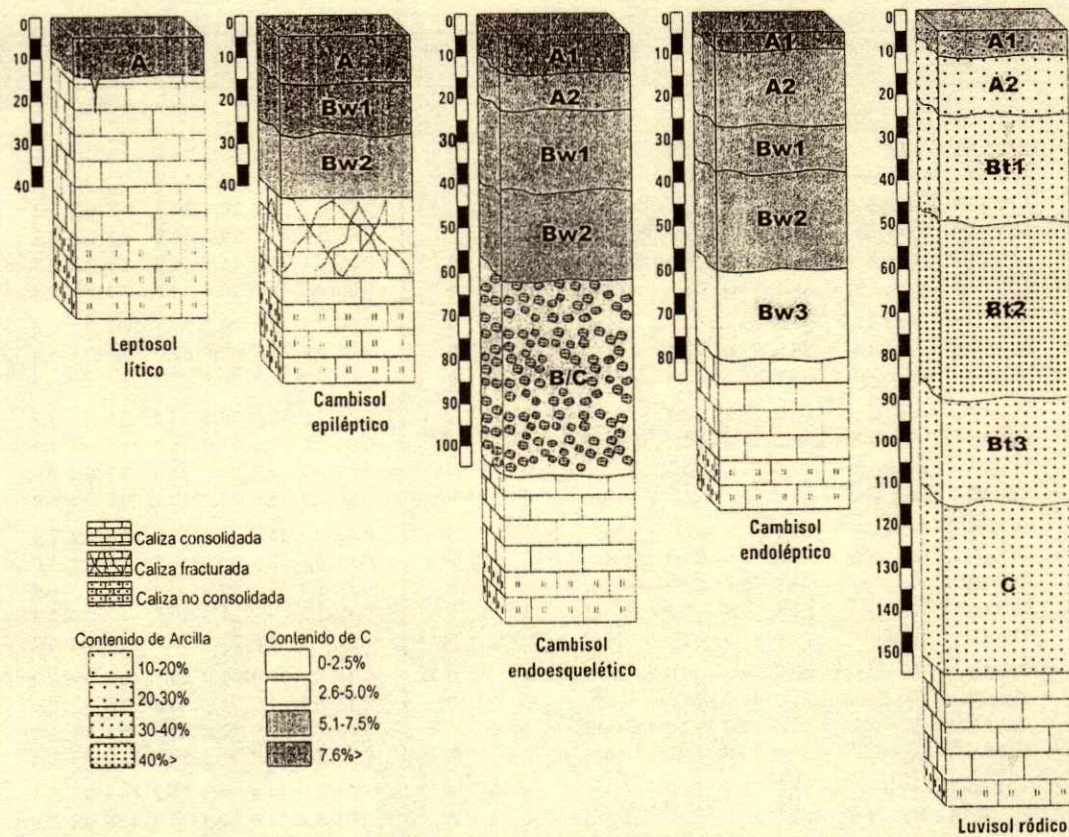


Figura 3. Modelos de la secuencia de desarrollo de los suelos de planicie-

Cuadro 4. Propiedades de los suelos localizados en los montículos.

H	Prof.	Color seco	Estructura	Are	Arc	Limo	Clase textural	Gravas	Piedras	CaCO <sub>3</sub>	pH	MO	CIC	Ca	Mg	Na	K	SB
	cm			%				%				%	cmol+kg <sup>-1</sup>			%		
CLtp-sk PR=2	Ak	0-4 10YR3/3	G-f-a	49.0	19.6	31.4	M	22.1	0	29.6	8.0	21.3	35.5	25.4	4.0	0.3	1.8	100
	Bk1	4-20 10YR4/3	Bsa-f-m	53.9	31.4	14.7	MAA	25.4	15	35.3	8.2	11.3	16.7	14.9	1.1	0.3	1.0	100
	Bk2	20-35 10YR4/1	Bsa-mf-b	52.9	21.6	25.6	MAA	20.4	20	36.4	8.3	12.9	18.2	16.5	1.1	0.3	0.8	100
	Ckm	35-40								<50.0								
LPhsk PR=3	IIAk	40-60 10YR5/1	G-mf-b	59.8	19.6	20.6	M-Arn	22.5	15	37.3	8.6	10.6	14.4	12.1	0.4	0.2	0.5	100
	A	0-1 7.5YR2.5/1	G-mf-m	70.6	15.7	13.7	M-Arn	50.1	30	12.4	8.0	45.0	66.2	54.0	1.8	0.1	3.3	89
LPhsk-rz PR=4	Ak/C	1-45 7.5YR3/1	G-mf-b	58.8	17.6	23.5	M-Arn	67.2	25	4	8.0	36.4	19	19.2	5.4	0.4	3.1	100
	A	0-7 10YR2.5/1	G-f-m	63.7	15.7	20.6	M-Arn	50.9	40	31.5	7.8	34.5	54.1	38.4	12.6	0.2	0.9	100
CLlep-sk PR=5	A/C	7-23 10YR2.5/1	G-mf-m	71.6	13.7	14.7	M-Arn	50.8	45	43.0	7.7	28.6	24.4	39.0	27.0	0.2	1.0	100
	A	0-1 7.5YR2.5/1	G-mf-b	55.0	20.0	25.0	MAA	30.4	10	41.42	8.0	30.6	40.7	38.6	0.7	0.2	2.8	100
	Ak/Ck	1-15 7.5YR4/3	G-mf-m	62.7	13.7	23.5	M-Arn	36.4	17	33.9	8.1	19.4	32.2	35.3	1.1	ND	0.6	100
LPhu PR=6	Ck/Ak	15-50 7.5YR4/3	Bsa-mf-b	62.7	15.7	21.6	M-Arn	33.7	20	42.2	8.0	19.5	26.7	35.3	0.9	0.5	0.6	100
	A	0-3 7.5YR3/1	G-mf-b	65.0	26.0	9.0	MAA	36.6	5	32.8	7.3	31.0	56.2	44.4	34.2	0.2	0.6	100
LPli-rz PR=8	A/C	3-18 7.5YR3/1	Bsa-mf-b	58.0	18.0	24.0	M-Arn	45.2	10	28.3	7.5	24.5	53.2	34.0	25.8	0.2	0.6	100
	Ah	0-10 7.5YR3/1	G-f-m	61.0	14.0	25.0	M-Arn	42.2	0	46.0	7.7	23.5	40.2	23.0	12.3	0.1	0.5	90
LPhsk-hu PR=8	Ak1	0-2 7.5YR2.5/1	G-mf-m	69.0	11.0	20.0	M-Arn	31.0	0	36.5	7.5	49.9	59.9	32.8	34.1	0.1	1.1	100
	Ak2	2-22 7.5YR3.5/1	G-mf-b	67.0	13.0	20.0	M-Arn	0	90	43.6	7.7	42.6	37.6	41.8	22.3	0.1	1.2	100
	C/A	22-80 7.5YR4/1	Bsa-mf-b	71.0	12.0	17.0	M-Arn	0	95	46.4	7.8	18.0	28.6	21.1	8.4	0.1	0.2	100

PR = patrón de relieve; M = migajón; M-Arn = migajón arenoso; M-Arc = migajón arcillosos; MAA = migajón arcillo-arenosos. Forma de los agregados (G = granular; Bsa = bloques subangulares; Ba = bloques angulares). Tamaño de agregados (mf = muy fino; f = fino); Estabilidad (b = baja; m = moderada; me = media; a = alta).

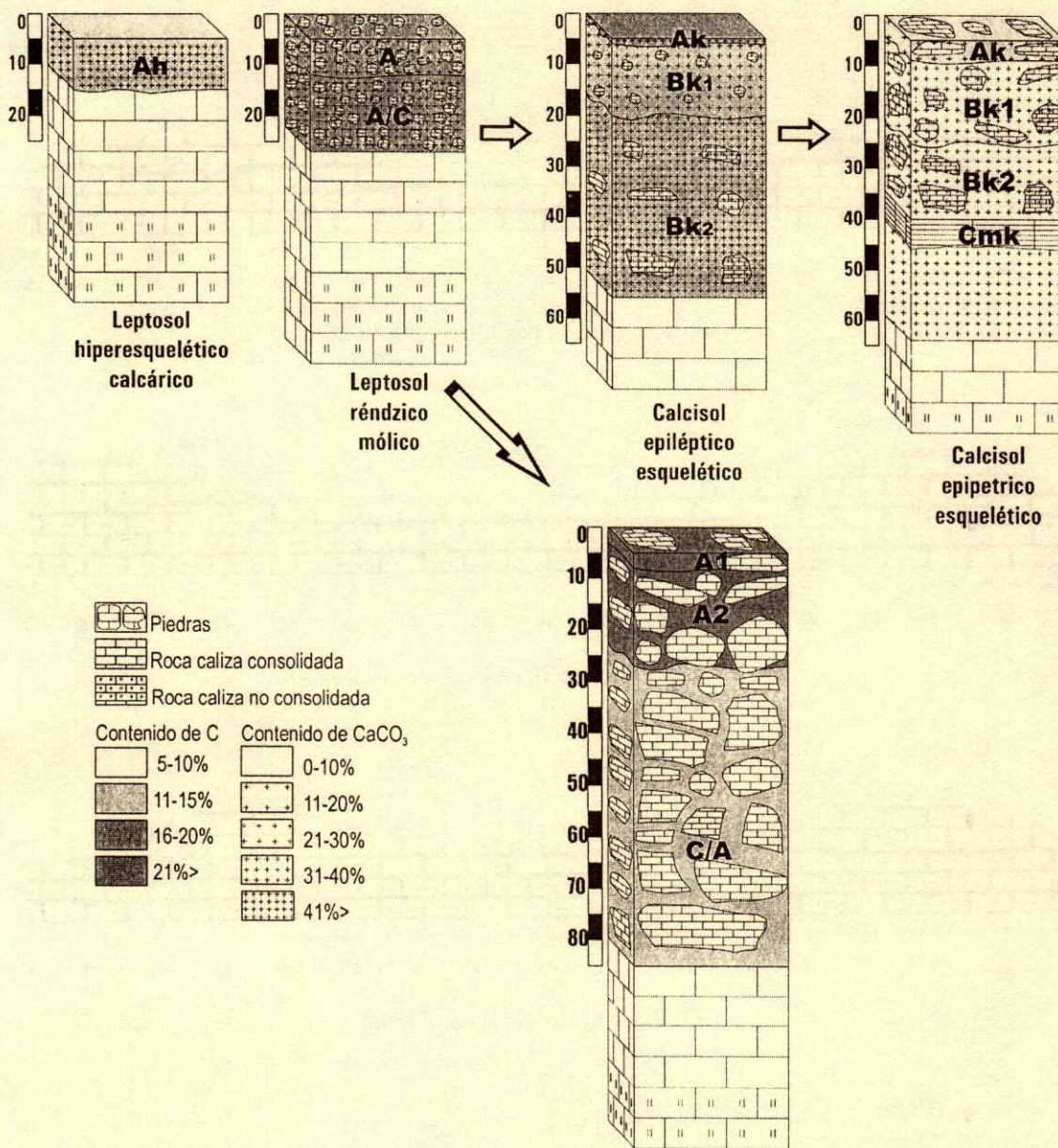


Figura 4. Modelos de la secuencia de desarrollo de los suelos de montículo.

tardía de relictos, se presentan planicies grandes en comparación con las formas positivas del relieve (Cvijic, 1918; Mateo, 1981).

En la zona de estudio, el contraste es claro entre las dos zonas, presentándose catenas de menor desarrollo en PM, del tipo LP-LP y LP-CM, en comparación con las catenas del E en las que hay suelos de mayor desarrollo pedogénico, tanto en montículos, como en planicies del tipo CL-CM y LP-LV (Cuadro 5).

### CONCLUSIONES

- En la zona PM, la relación mesorelieve-suelos presenta los menores grados de evolución, por lo contrario, en la zona E se localizan los grados de evolución mayores dentro del paisaje cárstico. A mayor grado de evolución, el diámetro de las planicies es menor y los suelos son de mayor desarrollo.
- La variabilidad sistemática de los suelos en los sistemas geopedológicos estudiados revela que, en la

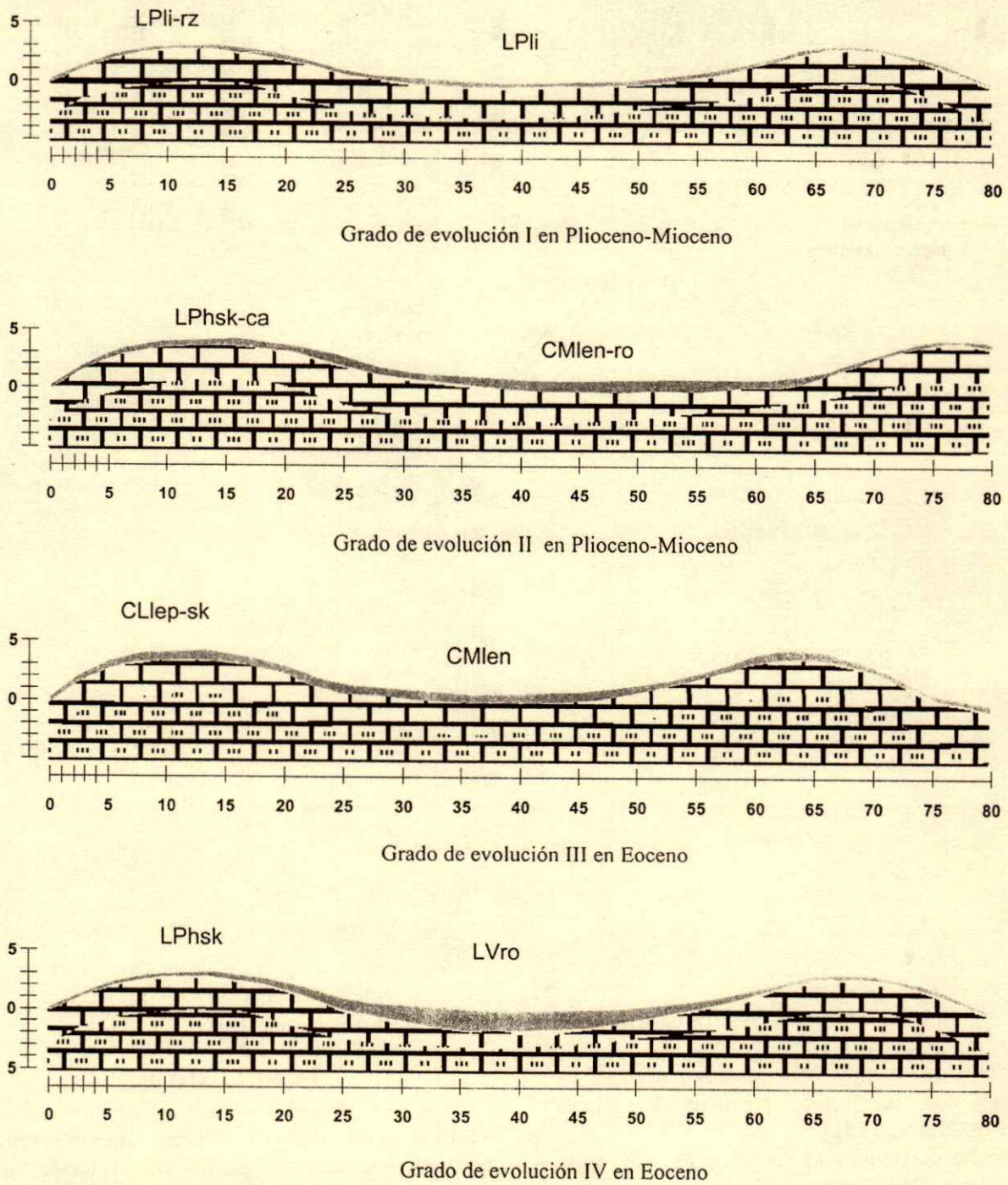


Figura 5. Modelos de los grados de evolución de los geosistemas cársticos con base en los patrones de relieve y las catenas.

**Cuadro 5. Grados de evolución de las catenas.**

Grado de evolución	Geología	Suelos montículo-planicie
I	PM	LPli-rz y LPli
II	PM	LPhsk-hu y CMskn
II	PM	LPhu-ca y CMlen
II	FG	LPhsk-ca y CMlen
III	E	CLptp y CMlep
III	E	CLlep-sk y CMlen
IV	E	LPhsk y LVcr
IV	E	LPhsk y LVro

PM = plioceno-mioceno; FG = frontera geológica; E = eoceno.

zona PM y en la FG en las que se encuentran los menores grados de evolución del karst, se presentan catenas del tipo LP-LP y LP-CM. En la zona de mayor grado de evolución, la secuencia de suelos de las catenas son CL-CM y LP-LV. La variabilidad al azar en el suelo se debe: a) al tipo de roca predominante en el caso del grupo LP; b) a la profundidad y a la presencia de roca y/o piedras en el grupo CM; y c) a la dinámica de los carbonatos de calcio en el caso del grupo CL.

- Las propiedades de los suelos que pueden ser utilizadas en la realización de levantamientos rápidos con fines utilitarios son: profundidad, cantidad y profundidad de los fragmentos de roca, acumulación de carbonato de calcio y acumulación de arcilla en el horizonte B.

### AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de maestría del segundo autor. Al CONACyT (Clave R31624-B) y al American Institute for Global Change Research por el financiamiento. Al Dr. A. J. Zinck por la revisión del manuscrito y a los revisores anónimos.

### LITERATURA CITADA

- Arnold, R.W. y L.P. Wilding. 1991. The need to quantify spatial variability. pp. 1-8. *In: Mausbach, M.L. y L.P. Wilding (eds.). Spatial variabilities of soils and landforms. Special Publication 28. Soil Science Society of America. Madison, WI.*
- Barrera-Bassols, N. y A.J. Zinck. 2000. Ethnopedology in a worldwide perspectives: An annotated bibliography. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science. Enschede, The Netherlands.
- Bautista-Zúñiga, F., H. Estrada-Medina, C. Delgado-Carranza y M. Sosa-Padilla. 2000. Propuesta metodológica para el levantamiento de terrenos en zonas cársticas de la Península de Yucatán. *Jaina* 10: 7-9.
- Bautista-Zúñiga, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro-Alberto, A. Manu y R. Lozano. 2003. icorelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra* 21: 1-11.
- Caamal-Maldonado, A., J. Jiménez-Osornio, A. Torres-Barragan y A. Anaya. 2001. The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. *Agron. J.* 93: 27-36.
- Cipra, J., E. Kelly, S. Lynn, L. Neve, M. Petersen, T. Wheeler y S. Blecker. 2003. Use of geostatistics and remotely sensed data in conducting the soil survey of rocky mountain national park. *Soil Survey Horizons* 44: 9-15.
- Cvijic, J. 1918. "Hydrographie souterraine et évolution morphologique du karst". *Rev. Trab. Inst. Geog. Alpine* 6(4): 375-426.
- Duch, J. 1988. La conformación territorial del estado de Yucatán: Los componentes del medio físico. Centro Regional de la Península de Yucatán (CRUPY), Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Duch, J. 1991. Fisiografía del estado de Yucatán: Su relación con la agricultura. Centro Regional de la Península de Yucatán (CRUPY), Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México, México.
- Eastman, R.J. 1997. Idrisi para Windows 2.0. Clark University Graduate School of Geography. Worcester, MA.
- FAO. Food and Agricultural Organization. 1998. Topsoil characterization for sustainable land management. Land and Water Development Division. Rome, Italy.
- Flores, S. e I. Espejel. 1994. Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. Etnoflora yucatanense, Fascículo 3. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- Geisert, D.K. 2000. La cartografía morfoedafológica: Un método integral para la evaluación del recurso suelo. pp. 1-14. *In: López-Olguín, J.F., A. Aragón y M.A. Valera (eds.). Métodos de investigación en las ciencias ambientales. Publicación Especial. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.*
- Gerrard, J. 1992. *Soil Geomorphology: An integration of pedology and geomorphology.* Chapman y Hall. London, UK.
- Gile, L.H., F.F. Peterson y R.B. Grossman. 1966. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulations in desert soils. *Soil Sci.* 101: 347-354.
- Hall, G.F. y C.G. Olson. 1991. Predicting variability of soils from landscape models. pp. 9-24. *In: Mausbach, M.L. y L.P. Wilding (eds.). Spatial variabilities of soils and landforms. Special Publication 28. Soil Science Society of America. Madison, WI.*
- Hartung, S.L., S.A. Scheinost y R.J. Ahrens. 1991. Scientific methodology of the national cooperative soil survey. pp. 39-49. *In: Mausbach, M.L. y L.P. Wilding (eds.). Spatial variabilities of soils and landforms. Special Publication 28. Soil Science Society of America. Madison, WI.*
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1983. Carta geológica 1:250 000. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D.F.
- Isphording, W.C. 1975. Chemical differentiation of temperate and tropical limestone derived clays. *Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc.* 29: 252-256.

- Isphording, W.C. 1984. The clays of Yucatán, Mexico. pp. 59-73. *In*: Singer, A. y E. Galan (eds.). Palygorskite-Sepiolite: Occurrences and uses. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Lean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. pp 199-224. *In*: Page, A.L., R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). Methods of soil analysis. Part 2. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Lugo, J. y M.T. García. 1999. Geomorfología. pp. 159-162. *In*: Chico, P.P. (ed.). Atlas de procesos territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Yucatán, Mérida, México.
- Lugo, J., J.F. Aceves-Quezada y R. Espinosa-Pereño. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán. Universidad Nacional Autónoma de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 10(2): 143-150.
- Magier J. e I. Rabina. 1984. Rock fragments and soil depth as factor in land evaluation of terra Rossa. Special Public. Soil Sci. Soc. Am. 13: 13-30.
- Mateo, J. 1981. Morfología cárstica. Ministerio de Educación Superior. La Habana, Cuba.
- Nash, D. 1980. Forms of bluffs degraded for different lengths of time in Emmet County. Earth Surface Processes 5: 331-383.
- Nelson, D.W. y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp 535-577. *In*: Page, A.L., R.H. Miller y D.R. Keeney. Methods of soil analysis. Part 2. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Okalebo, R., K.W. Gathua y P.L. Woomer. 1993. Laboratory methods of soil and plant analysis: A working manual. Tropical Soil Biology and Fertility Program. Nairobi, Kenya.
- Orellana, L.R., M. Balam, I. Bañuelos, E. Miranda, J. González-Iturbe, F. Herrera y J. López. 1999. Evaluación climática. pp. 164-166. *In*: Chico, P.P. (ed.). Atlas de procesos territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- Ortiz, C., D. Pájaro y V. Ordaz. 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.
- Pope, O., A. Ocampo, G.L. Kinsland y R. Smith. 1996. Surface expression of the Chicxulub crater. Geology 24(6): 527-530.
- SEMARNAP. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2000. Proyecto de norma oficial mexicana PROY-NOM-023-RECNAT-2000, que establece las especificaciones técnicas que deberá contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de los inventarios de suelo. México, D.F.
- SICS-ISRIC-FAO. 1999. Base referencial mundial del recurso suelo. World Soil Resources Report 84. Roma, Italia.
- Siebe, C., R. Jahn y K. Stahr. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación Especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, estado de México.
- Trudgill, S. 1985. Limestone geomorphology. Geomorphology texts. Longman, New York.
- USDA. United States Department of Agriculture. 1996. Soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigations report 42, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center. Washington, DC.
- Wagenet, R.J., J. Bouma y R.B. Grossman. 1991. Minimum data sets for use of soil survey information in soil interpretative models. pp. 161-182. *In*: Mausbach, M.L. y L.P. Wilding (eds.). Spatial variabilities of soils and landforms. Special Publication 28. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Weisbach, C, H. Tiessen y J. Jiménez-Osornio. 2002. Soil fertility during shifting cultivation in the tropical karst soils of Yucatán. Agronomie 2: 253-263.
- Zinck, J.A. 1990. Soil survey epistemology of a vital discipline. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC). Enschede, The Netherlands.

# MORFOGÉNESIS DE SUELOS CON CAPAS ENDURECIDAS DE LA SIERRA DE GUADALUPE, MÉXICO

## Morphogenesis of Soils with Hardened Layers of the Sierra de Guadalupe, Mexico

Gilberto Vela-Correa<sup>1†</sup> y David Flores-Román<sup>2</sup>

### RESUMEN

La Sierra de Guadalupe es un complejo volcánico, que forma parte del Área de Conservación Ecológica de la Ciudad de México, que está sujeta a un gran deterioro, por el cambio de uso del suelo, destrucción de la vegetación nativa y el establecimiento de especies sin un previo conocimiento de sus características edáficas. Por lo anterior, se realizó este trabajo con el propósito de caracterizar, a partir de sus propiedades morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas, los suelos con presencia de capas endurecidas y determinar los procesos de formación de los suelos y de las capas endurecidas en la zona en estudio. Este conocimiento puede servir en la elaboración de propuestas que permitan la restauración y conservación de una de las escasas áreas verdes al norte de la Ciudad de México. En general, los suelos con presencia de capas endurecidas se encuentran, en su mayoría, sobre laderas con pendientes mayores que 10%, son poco profundos, pedregosos y sus horizontes superficiales se caracterizan por ser ligeramente ácidos, ricos en materia orgánica, con un valor alto de capacidad de intercambio catiónico (CIC) y un elevado porcentaje de saturación de bases. El material endurecido del Perfil 2 se consideró como un fragipán con presencia de arcillas de tipo esmectítico. Las capas endurecidas de los Perfiles 1 y 3 corresponden a tobas poco alteradas de origen andesítico-basáltico. Los suelos se formaron a partir de diversos materiales volcánicos de tipo piroclástico que se consolidaron y se estratificaron en el momento de su depósito.

**Palabras clave:** Suelos volcánicos, fragipán, tobas.

<sup>1</sup> Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Calzada del Hueso 1100, Colonia Villa Quietud, 04960 Coyoacán, Distrito Federal, México.

<sup>†</sup> Autor responsable (gvla@cueyatl.uam.mx)

<sup>2</sup> Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, 04510 Distrito Federal, México.

Recibido: Julio de 2002. Aceptado: Abril de 2004.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 255-265.

### SUMMARY

The Sierra de Guadalupe is a volcanic complex that is a part of the Ecological Conservation Area of Mexico City. It is subjected to a high degree of deterioration because of the change in land use, destruction of native vegetation, and the establishment of plants without knowledge of edaphic properties. The objectives of this work were to characterize soils with indurated layers and to determine the formation processes of soils and indurated layers. This knowledge can be useful in programs aimed to restore and to conserve one of the rare green areas in the north of Mexico City. In general, soils with indurated layers can be found mainly on slopes of more than 10%. They are shallow and rocky, and their surface horizons are slightly acid, rich in organic matter, with high percentages of CEC and saturation of bases. The hardened material of Profile 2 was considered to be a fragipan with smectite type clays. The hardened layers of Profiles 1 and 3 are considered to be tuffs. Different pyroclastic type volcanic materials formed these soils and they were consolidated and stratified when deposited.

**Index words:** Volcanic soils, indurated layers, fragipan, tuffs.

### INTRODUCCIÓN

En muchos suelos de origen volcánico es común la presencia de capas endurecidas, mismas que pudieron formarse a partir de materiales piroclásticos que se estratificaron y se consolidaron en el momento de su depósito y de las cuales sus propiedades físicas y químicas derivan de sus componentes mineralógicos y del entorno pedogenético en el que se encuentran, lo que determina la evolución de los suelos que las sobreyacen (Shoji *et al.*, 1993). El estudio de los suelos que presentan estos materiales es importante, ya que estas capas pueden limitar el crecimiento de las raíces de las plantas y dificultan el desarrollo de las actividades agrícolas y el establecimiento de las

plantaciones forestales (Pimentel, 1992; Quantin *et al.*, 1993).

La Sierra de Guadalupe es un complejo de origen volcánico que forma parte del Área de Conservación Ecológica de la Ciudad de México, la cual está sujeta a un gran deterioro, por el cambio de uso del suelo, debido a que los suelos forestales se han convertido en terrenos agrícolas y, en el peor de los casos, se han ocupado por asentamientos humanos irregulares, siendo éstos evidentes en la mayoría de sus laderas, que se encuentran casi totalmente urbanizadas. Es importante indicar que, con la información generada a partir de estudios recientes, se puede ayudar en la elaboración de propuestas que permitan la restauración y conservación de esta zona que se encuentra altamente alterada, más aún si se trata de una de las escasas áreas verdes al norte de la Ciudad de México. Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: (1) caracterizar a partir de sus propiedades morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas los suelos con presencia de capas endurecidas y (2) determinar los procesos de formación de las capas endurecidas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización de la Zona en Estudio

La Sierra de Guadalupe se localiza entre 19° 30' y 19° 35' N y 99° 05' y 99° 10' O, con una altitud de 2240 a 2950 m, siendo la superficie en estudio 2163 ha, que son administradas por el Gobierno de la Ciudad de México (Figura 1).

La Sierra es un complejo montañoso de origen volcánico constituido por lavas andesíticas, dacíticas y rocas piroclásticas, las cuales se encuentran sobre un núcleo basáltico formado por estratovolcanes, calderas y domos del Plioceno (Mosser, 1977, 1990). El clima, con base en Köppen, modificado por García (1988), es C(wo)(w) templado con lluvias en verano, siendo la precipitación total anual de 584.7 mm y la temperatura media anual de 16 °C. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática reportó que los suelos dominantes corresponden a la asociación de Litosoles + Feozem háplicos, con una fase lítica y dúrica (INEGI, 1982). Con relación a la vegetación, Vela y Flores (2000) mencionaron que, aunque se encuentran *Quercus* sp., *Prosopis* sp. y *Opuntia* sp., predomina un bosque artificial, producto de las diversas reforestaciones que se han efectuado

con *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp., *Schinus molle* y *Casuarina equisetifolia*.

### Trabajo en Campo

La ubicación de los sitios de muestreo se determinó a partir de un muestreo aleatorio estratificado, mediante el análisis de fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro a escala 1:20 000, apoyándose con diversos recorridos por el área. En total se describieron 12 perfiles con presencia de capas endurecidas y se seleccionaron, a partir de sus características morfológicas, los tres más representativos: el Perfil 1 "Zacatenco" (P-1), el cual se localiza en la parte alta del cerro del mismo nombre; el Perfil 2 "Las Caballerizas" (P-2), se encuentra en la zona conocida como "Loma pelada"; y el Perfil 3 (P-3), ubicado al norte del cerro El Chiquihuite en el paraje conocido como "Tlalpexco". La descripción morfológica de los perfiles de suelo se realizó con base en Cuanalo (1990) y los horizontes de diagnóstico se designaron de acuerdo con Soil Survey Staff (1999).

### Trabajo en Laboratorio

Se determinaron, para cada horizonte y capa, el color en seco y húmedo, densidad aparente, densidad real, textura, análisis granulométrico, capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH en agua relación 1:2.5, materia orgánica (MO) y bases intercambiables a partir de las técnicas descritas en Klute (1986) y Sparks (1996). En las capas endurecidas se calculó su resistencia a la compresión simple inconfundida, en núcleos labrados a mano, que se expusieron a peso incrementante dentro de un marco de carga, de acuerdo con Head, (1984); los óxidos totales de acuerdo con Verbeek *et al.* (1982) y la cuantificación de las pérdidas y ganancias de óxidos totales entre el material parental y los horizontes intemperizados, se aplicó la constante de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> propuesta por Krauskopf (1979); la cuantificación de los óxidos libres de todos los horizontes y capas se realizó a partir de Mehra y Jackson (1960). Asimismo, para la identificación del agente cementante en las capas endurecidas, se efectuó la inmersión de fragmentos de cada estrato en agua y, posteriormente, en KOH caliente a 30% de concentración, como lo estipula Soil Survey Staff (1999). Se observaron cortes delgados para el análisis micromorfológico de capas endurecidas, mediante el

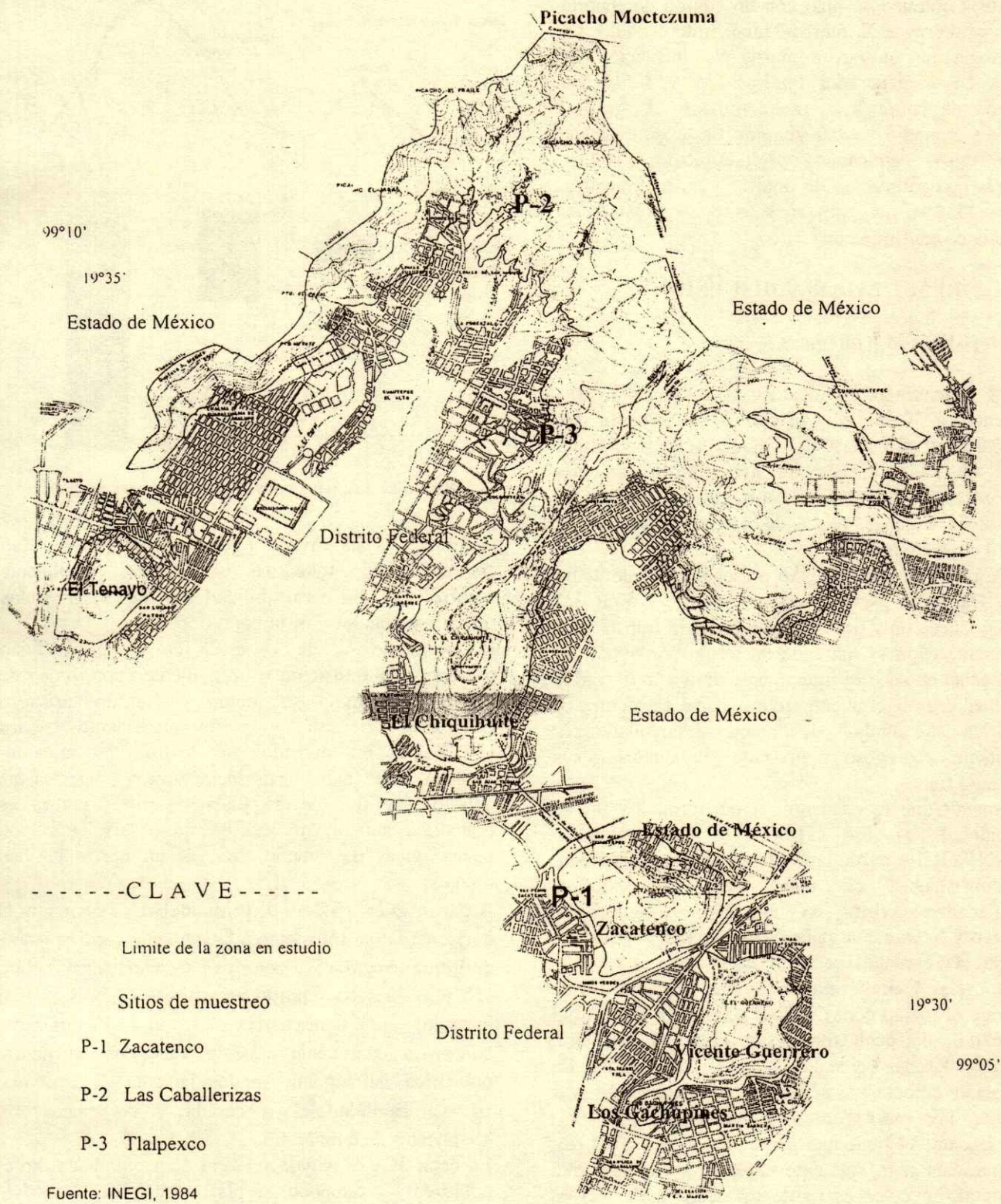


Figura 1. Ubicación de la zona en estudio.



microscopio electrónico de barrido JEOL JMS-35c y su análisis químico se hizo con un equipo de energía dispersiva de rayos X, marca Tracor (microsonda). La mineralogía se obtuvo a partir de difracción de rayos X en un generador Phillips PW 1130/96 con radiación de cobre K $\alpha$ , monocromador de grafito, filtro de Vanadio y condiciones de excitación de 30 KV-20mA, aplicando pretratamientos a las muestras con saturación de potasio y calentamiento a 350° y 550 °C, y, posteriormente, se realizó la evidencia de confirmación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características Morfológicas

**Perfil 1. Zacatenco.** Se localiza en la cima del cerro Zacatenco, a 30 m hacia el sur de la mojonera que divide al Distrito Federal del Estado de México a una altitud de 2475 m. Es un área reforestada con *Pinus radiata* y sobre el terreno se encuentran distribuidas algunas rocas de origen andesítico de 20 a 30 cm de diámetro.

En este perfil, el horizonte Ah presenta una coloración 10YR 4/2 pardo grisáceo oscuro en seco y 5YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro en húmedo; la transición a la siguiente capa es marcada de forma horizontal; su consistencia en seco es ligeramente dura y muy friable en húmedo; es ligeramente adhesivo; su estructura es poliédrica subangular, débilmente desarrollada; es ligeramente pedregoso y presenta abundantes raíces de tamaño fino.

La capa 2Cqm se encuentra a partir de 29 cm de profundidad; su color es 10YR 4/2 pardo pálido en seco y 10YR 4/4 pardo amarillento oscuro en húmedo; su consistencia es muy dura en seco y extremadamente firme en húmedo; es ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; se consideró como un material con características dúricas (Figura 2).

**Perfil 2. Las Caballerizas.** Este sitio se encuentra en el paraje conocido como "Loma pelada", a una altitud de 2620 m, la pendiente es de 10%, en este sitio dominan las tobas volcánicas y andesitas alteradas. La vegetación característica de este sitio es *Cupressus lindleyi*, *Eucalyptus globulus* y *Schinus molle*.

El Horizonte A1 tiene una profundidad de 0 a 14 cm; la separación a la siguiente capa es tenue de forma horizontal; su color es pardo grisáceo (2.5Y 5/2) en seco y pardo oscuro (7.5Y 3/2) en húmedo; la textura es migajón arenoso; la consistencia en seco es dura;

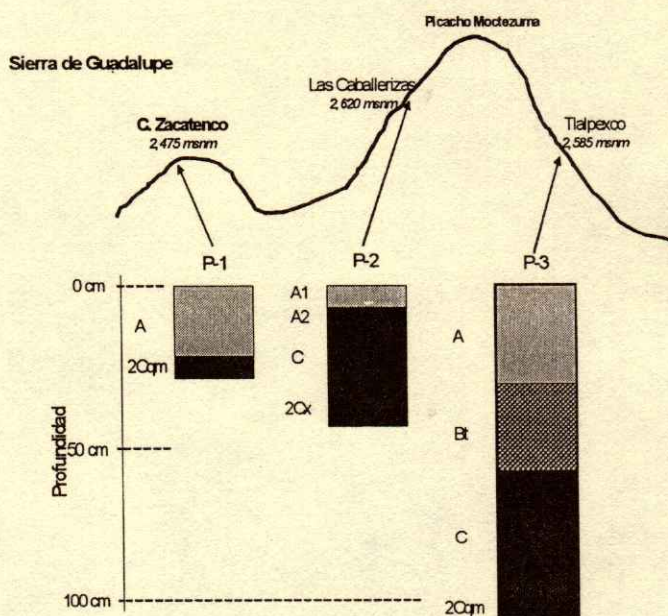


Figura 2. Esquema morfológico de los tres perfiles.

ligeramente adhesivo; ligeramente plástico; su estructura es poliédrica subangular, débilmente desarrollada; la permeabilidad es moderada y las raíces son comunes, de tamaño fino.

El Horizonte A2 de 14 a 28 cm de profundidad presenta una transición a la siguiente capa, tenue de forma horizontal; su color es pardo grisáceo (2.5Y 5/2) en seco y pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; su textura es migajón-arenoso; tiene una consistencia dura; es ligeramente adhesivo; y ligeramente plástico; su estructura es poliédrica subangular, débilmente desarrollada; con pocas raíces de tamaño fino, es un horizonte bien drenado.

A partir de 28 a 42 cm de profundidad, se encuentra el horizonte C; su transición a la siguiente capa es tenue, de forma irregular; su color es pardo amarillento claro (5Y 6/3) en seco y pardo amarillento (2.5YR 5/4) en húmedo; su consistencia es dura; ligeramente adhesivo; ligeramente plástico; tiene una estructura poliédrica subangular, moderadamente desarrollada; su permeabilidad es moderada y las raíces son abundantes de tamaño fino.

La capa 2Cx es mayor a 42 cm de profundidad; no es adhesivo; tampoco plástico; es masivo; moderadamente permeable; con pocas raíces, de tamaño fino; bien drenado.

**Perfil 3. Tlalpexco.** Este sitio se ubica aproximadamente a 500 m de la entrada principal por el camino que une el cerro del Chiquihuite con el Arenal; la pendiente es de 30% y el material parental está constituido principalmente por tobas. La vegetación se conforma por *Pinus radiata* y *Cupressus lindleyi*.

En total se describieron cuatro horizontes, donde el horizonte A presentó un espesor de 0 a 34 cm de profundidad; con una transición marcada de forma horizontal con la siguiente capa; su textura es franco-arcillosa; la consistencia en seco es ligeramente dura y friable en húmedo; su color en seco es pardo oscuro (10YR 3/3) y pardo grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2); la estructura es granular, débilmente desarrollada; con raíces comunes de tamaños delgado y medio.

El horizonte Bt con un espesor de 34 a 60 cm de profundidad presenta una transición marcada de forma horizontal con la siguiente capa; su textura es arcillosa; la consistencia es ligeramente dura en seco y muy firme en húmedo; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; el color en seco es pardo oscuro (10YR 4/3) y pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; su estructura es granular, débilmente desarrollada; las raíces son comunes de tamaño delgado y medio.

La capa C tiene un espesor de 60 a 110 cm de profundidad; presenta una transición media de forma horizontal con la siguiente capa; su textura es franco-limosa; la consistencia en seco es ligeramente dura y en húmedo friable; es ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; su color en seco es gris rosáceo (7.5YR 6/2) y pardo oscuro (7.5YR 4/4) en húmedo; la permeabilidad es lenta y las raíces son comunes de tamaño delgado.

El horizonte endurecido, considerado como 2Cqm, se encuentra a una profundidad mayor que 110 cm; la consistencia en seco es ligeramente dura y en húmedo friable; es ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; el color en seco es pardo (10YR 5/3) y pardo oscuro (7.5YR 4/4) en húmedo.

### Propiedades Físicas

El análisis granulométrico, realizado en cada uno de los tres sitios, indica que las arcillas (< 0.002 mm) dominan en los horizontes superficiales debido a que están sujetos a una mayor alteración por los agentes climáticos del lugar, mientras que las arenas finas (0.25 a 0.10 mm) y limos gruesos (0.05 a 0.02 mm), se incrementan con la profundidad, presentando las

partículas formas muy angulares y angulares con un bajo porcentaje de esfericidad, posiblemente atribuidas a que se trata de discontinuidades litológicas, a la poca agresividad climática y al escaso transporte o acarreo que han tenido estos suelos (Cuadro 1). La clase textural dominante es franco-arcillosa en el horizonte A del P-1; arcillo-limosa en los horizontes A1 y A2 del P-2; y franco-arcillosa en el horizonte A y arcillosa en particular en el horizonte Bt del P-3, disminuyendo drásticamente con la profundidad. La densidad aparente aumentó con la profundidad, en particular en los horizontes superiores, donde los valores se aproximaron a la unidad; mientras que, en las capas inferiores, fueron de 1.11 Mg m<sup>-3</sup> en el horizonte 2Cx del P-2 y de 1.77 Mg m<sup>-3</sup> para el horizonte 2Cqm del P-3. Situación similar presentó la densidad real, que se incrementó con la profundidad hasta 2.31 Mg m<sup>-3</sup> en los horizontes inferiores, indicando una alta consolidación y compactación de estos materiales (Cuadro 1). Estos valores se encuentran dentro de lo reportado para minerales de origen volcánico (Peña y Zebrowski, 1992; Quantin, 1992; Flores *et al.*, 1996; Acevedo y Flores, 2000).

Para la identificación del agente cementante presente en las capas endurecidas de los tres perfiles, se realizó la inmersión de fragmentos del tamaño de un puño, en agua y posteriormente en KOH caliente a 30% de concentración, en el cual los materiales de los horizontes Cqm y 2Cqm de los perfiles P-1 y P-3, respectivamente, no se colapsaron al sumergirlos en agua, pero al tratarlos con KOH se colapsaron en muy poco tiempo, por lo que se deduce que se trató de materiales tobáceos poco alterados. En particular, la horizonte 2Cqm del P-1 es una toba poco intemperizada y su consolidación se atribuye a la presencia de sílice y, en el caso del horizonte 2Cqm del P-3, se trata de una toba tipo duripán, por presentar cantidades importantes de arcillas, que contribuyen a su compactación, además de la presencia de sílice que favorece los procesos de consolidación. El material del horizonte 2Cx del P-2 se fragmentó rápidamente cuando éste se sumergió en agua, por lo que, se trata de un fragipán. Por otra parte, al realizar la prueba de resistencia a la compresión no confinada en núcleos labrados de los horizontes Cqm del P-1 y 2Cqm del P-3, éstos resistieron una fuerza de 14 y 19 kg cm<sup>-2</sup>, respectivamente. El núcleo del horizonte 2Cx del P-2 soportó una fuerza de 28 kg cm<sup>-2</sup>, siendo mayor que la reportada en P-1 y P-3 como se muestra en la

Cuadro 1. Propiedades físicas de los suelos estudiados.

Profundidad cm	Horizonte	Densidad		Arena	Limo	Arcilla	Redondez <sup>†</sup>			Esfericidad <sup>†</sup>	
		aparente	real				ma	a	sa	A	B
		Mg m <sup>-3</sup>		%							
Perfil 1 Zacatenco											
0-29	A	1.01	1.87	27.87	42.93	29.18	15	50	35	20	80
> 29	Cqm	0.98	2.21	-	-	-	35	60	5	20	80
Perfil 2 Las Caballerizas											
0-14	A <sub>1</sub>	0.89	1.75	6.60	41.54	51.84	80	20		25	75
14-28	A <sub>2</sub>	0.99	1.64	13.38	42.61	43.99	85	15		40	60
28-42	C	1.01	1.69	26.63	54.30	19.07		95	5	25	75
>42	2Cx	1.11	1.71	-	-	-		100		15	85
Perfil 3 Tlalpexco											
0-34	A	0.99	2.08	21.63	38.73	39.64	100			20	80
34-60	Bt	1.04	2.29	24.00	16.23	59.75	80	20		15	85
60-110	C	1.07	2.20	16.05	65.31	16.64	100			15	85
>110	2Cqm	1.77	2.31	-	-	-	100			20	80

<sup>†</sup> ma = muy angular; a = angular; sa = subangular. <sup>†</sup> A = alta; B = baja.

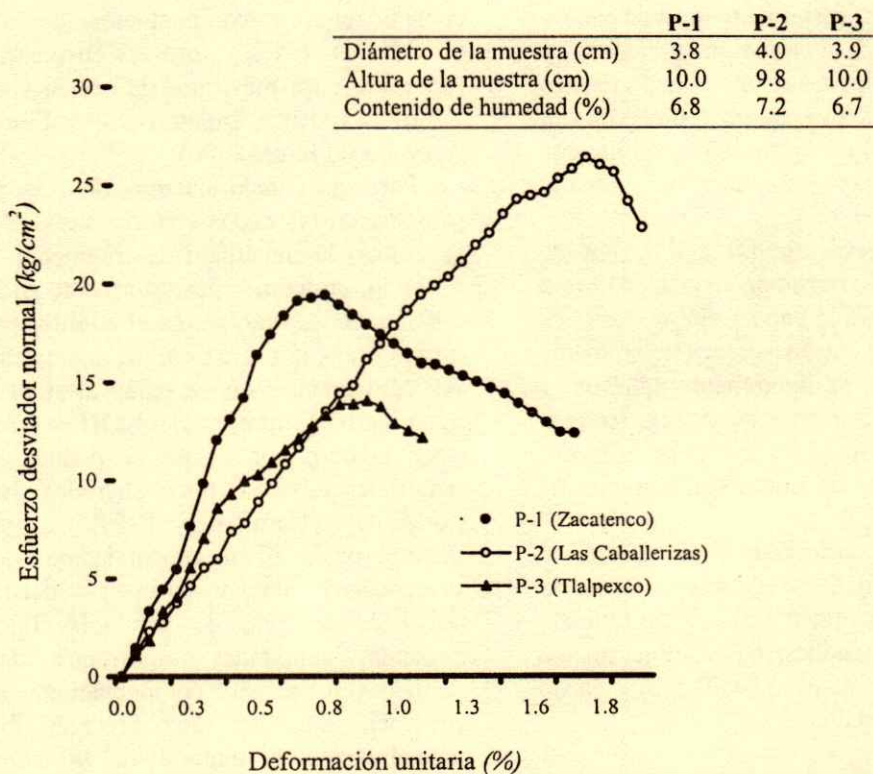


Figura 3. Resistencia a la compresión no confinada de las capas endurecidas.

Figura 3. Se estima que esta resistencia en seco es debido a que es un material que presenta en su matriz un empaquetamiento muy cerrado, provocado por una elevada compactación por arcillas y una cementación escasa o nula, atribuible esto por su fácil colapsamiento en agua y KOH.

### Propiedades Químicas

El pH en los tres sitios es medianamente ácido y la alcalinidad se incrementa con la profundidad; los valores más ácidos se presentaron en los horizontes superficiales (Cuadro 2). Los horizontes Cqm de los

perfiles P-1 y P-3 son ligeramente alcalinas en comparación con los horizontes superficiales, atribuible al intemperismo de los feldespatos cálcicos y sódicos, como observaron Etchevers *et al.* (1992) y Acevedo y Flores (2000) en otras situaciones. El contenido de materia orgánica en los horizontes superficiales de los tres perfiles puede considerarse como medianamente rico, debido a los constantes aportes de la vegetación que se encuentra en el lugar, sin embargo, disminuye con la profundidad hasta valores considerados como muy pobres, en particular en los materiales endurecidos.

Los tres perfiles presentan valores muy altos de CIC, debido a la materia orgánica y al alto contenido de arcillas, destacando el P-2, en el cual se determinó la presencia de esmectitas de tipo montmorillonítico, las cuales duplican la CIC con relación a los otros perfiles. Existe también un predominio de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , por lo que el complejo de saturación está ocupado por estos iones, en especial en los horizontes superficiales, lo que indica un proceso incipiente de lixiviación, dada la estacionalidad y escasa precipitación que se presenta en la sierra.

### Pérdidas y Ganancias de Óxidos Totales

En los tres perfiles, el impacto por intemperismo no es muy severo, con base en las cantidades que se determinaron de óxidos totales ya que, en los horizontes superficiales, la cantidad de  $\text{SiO}_2$  es muy elevada en comparación con la de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El orden y la abundancia de los óxidos fue  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3$ , aunque se reportan trazas de óxidos de Fe y Mg y un ligero incremento de CaO en el P-2 atribuible a la

alteración de minerales ferromagnesianos y feldespatos cálcicos, productos de los aportes recientes de materiales volcánicos (Cuadro 3). A partir de lo anterior y con los datos texturales, se estima que los horizontes y capas de los tres perfiles son discontinuidades litológicas, dado que su origen se atribuye a diversos materiales piroclásticos, depositados durante eventos volcánicos, por lo que no pueden darse pérdidas o ganancias significativas entre un estrato y otro (Acevedo *et al.*, 2003).

### Mineralogía

El análisis mineralógico demostró que la haloisita es la arcilla dominante en los tres perfiles, siendo resultado de los procesos de intemperismo que presentan el vidrio volcánico, los feldespatos y los aluminosilicatos (Quantin, 1992). El segundo mineral en importancia son las esmectitas principalmente de tipo montmorillonítico, en especial en el perfil P-2 donde el material parental de tipo tobáceo se está intemperizando, no endureciéndose, sino formando arcillas, en particular de tipo 2:1 y óxidos de Fe y Mg favorecido esto por procesos de formación *in situ*, por las condiciones de drenaje y lavado moderadas que se presentan en este sitio (Duchaufour, 1984; Flores *et al.*, 1992) (Cuadro 4).

### Análisis de las Capas Endurecidas

A partir del análisis realizado con la microsonda, se confirma que el material de las capas endurecidas de los Perfiles 1 y 3 se encuentra poco intemperizado, ya que los resultados muestran cantidades muy

Cuadro 2. Propiedades químicas de los suelos estudiados.

Perfil	Profundidad	Horizonte	pH 1:2	MO <sup>†</sup>	C <sup>‡</sup>	CIC <sup>§</sup>	Bases intercambiables				PSB <sup>¶</sup>
							Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	
				---	%	---	cmol(+) kg <sup>-1</sup>				%
Perfil 1 Zacatenco	0-29	A	6.6	2.37	1.37	21.60	20.30	9.10	1.93	1.24	100
	> 29	Cqm	7.2	0.73	0.42	27.87	21.70	15.40	2.26	1.57	100
Perfil 2 Las Caballerizas	0-14	A1	6.8	3.66	2.12	48.05	13.0	27.0	0.7	2.3	89
	14-28	A2	7.4	1.90	1.12	42.76	8.0	24.0	0.8	1.4	80
	28-42	C	7.3	1.09	0.63	37.95	6.0	25.0	1.1	0.5	86
	> 42	2Cx	6.7	0.45	0.26	42.76	9.0	21.0	1.6	0.3	75
Perfil 3 Tlalpexco	0-34	A	5.9	4.18	2.42	18.26	12.6	1.1	3.5	0.7	98
	34-60	Bt	6.6	1.39	0.80	23.05	7.7	1.5	9.8	1.3	88
	60-110	C	6.8	0.27	0.15	23.06	8.4	1.2	7.0	1.4	78
	> 110	2Cqm	7.5	0.20	0.11	27.80	14.0	1.3	8.4	1.8	92

<sup>†</sup> MO = materia orgánica; <sup>‡</sup> C = carbono; <sup>§</sup> CIC = capacidad de intercambio catiónico; <sup>¶</sup> PSB = porcentaje de saturación de bases.

Cuadro 3. Óxidos totales y pérdidas o ganancias por intemperismo.

Horizonte	Óxidos totales								
	SiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
	%								
Perfil 1 Zacatenco									
A (0-29)	58.36	3.95	2.17	19.22	0.12	0.56	0.11	3.89	0.08
Cqm (>29)	54.56	3.63	1.99	21.67	0.46	0.40	0.01	3.82	0.01
A(K)* Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	65.95	4.46	2.45	21.72	0.14	0.51	0.12	4.40	0.09
Pérdidas o ganancias									
A	3.80	0.32	0.18	-	-0.34	0.05	0.10	0.07	0.07
Perfil 2 Las Caballerizas									
A1 (0-14)	55.72	3.82	2.10	13.40	0.10	2.12	0.33	2.27	1.05
A2 (14-28)	56.48	4.32	3.39	14.75	0.09	2.07	0.11	2.91	1.21
C (28-42)	54.54	4.19	2.30	17.84	0.10	2.37	0.31	3.27	1.68
2Cx (>42)	53.79	4.92	2.70	19.89	0.16	0.27	0.50	2.41	1.74
A1(K) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	82.47	5.65	3.11	19.83	0.15	3.14	0.49	3.36	1.55
A2(K) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	76.25	5.83	4.58	19.91	0.12	2.79	0.15	3.93	1.63
C(K) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	59.99	4.61	2.53	19.62	0.11	2.61	0.34	3.60	1.85
Pérdidas o ganancias									
A1	28.68	0.73	0.41	-	-0.01	2.87	-0.01	0.95	-0.19
A2	22.46	0.91	1.88	-	-0.04	2.52	-0.04	1.52	-0.11
C	6.20	-0.31	-0.17	-	-0.05	2.34	-0.02	1.19	0.11
Perfil 3 Tlalpexco									
A (0-34)	57.51	3.64	1.89	19.78	0.15	0.30	0.02	3.85	0.67
Bt (34-60)	56.39	3.67	2.18	20.54	0.14	0.18	-	2.23	0.78
C (60-110)	59.92	3.85	1.94	20.55	0.14	0.08	-	1.00	1.07
2Cqm (>110)	58.83	3.54	2.06	20.92	0.12	0.19	0.02	1.89	0.87
A(K) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60.96	3.86	2.01	20.97	0.16	0.32	0.02	4.08	0.71
AC (K) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57.52	3.75	2.23	20.96	0.14	0.18	-	2.28	0.80
A2C (K) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61.12	3.93	1.97	20.96	0.14	0.08	-	1.02	1.09
Pérdidas o ganancias									
A	2.13	0.32	-0.05	-	0.04	0.13	-	2.19	-0.16
Bt	-1.13	0.20	0.17	-	0.03	-	-0.02	0.39	-0.07
C	2.30	0.38	-0.08	-	0.02	-0.11	-0.02	-0.87	0.22

La constante de aluminio (K) se obtiene de dividir el porcentaje de aluminio de la roca inalterada (Cqm) entre el porcentaje de aluminio de la roca alterada (AC, A<sub>12</sub>, A<sub>11</sub> ó A). Esta constante se multiplica por cada uno de los óxidos de los horizontes alterados. Los resultados se comparan con la roca alterada y por sustracción se obtienen las pérdidas (-) o ganancias (+) (Krauskopf, 1979).

elevadas de SiO<sub>2</sub> más que de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Cuadro 5). Asimismo, se considera que estos materiales se consolidaron a partir de procesos diagénicos, más que de pedogénicos, al no existir evidencias de iluviación de sílice en ambos horizontes, como lo muestran las micrografías tomadas con el microscopio electrónico de barrido (Figura 4), en las cuales se aprecia una matriz muy compacta, con rasgos de escasa alteración, así como la nula iluviación de sílice y arcillas por lo que estos materiales corresponden genéricamente a una toba de origen dacítico y andesítico.

Por otra parte, debido a las condiciones de drenaje existentes en el terreno, el P-2 presentó un desarrollo de haloisita a montmorillonita en sus horizontes inferiores y manifestó mayor compactación que

cementación; se caracterizó por haberse formado a partir de procesos pedogénicos, posiblemente como el relleno de los poros por arcillas que contribuyeron a la formación de un fragipán.

### Clasificación de Suelos

Los suelos se clasificaron, con base en la Taxonomía de Suelos del Soil Survey Staff (1999), como Entisoles a los Perfiles 1 y 2 los cuales pertenecen a un Typic Ustipsamments y Typic Ustorthents, respectivamente, y el P-3 a un Inceptisol Typic Fragiochrets. Los Perfiles 1 y 2 corresponden, de acuerdo con la Base Referencial Mundial (FAO, 1999), a un Leptosol éutrico y a un Leptosol háplico, mientras que el Perfil 3 a un Phaeozem háplico.

**Cuadro 4. Análisis mineralógico de la fracción arcilla.**

Profundidad cm	Horizonte	Mineral <sup>†</sup>		
		C	E	H
Perfil 1 Zacatenco				
0-29	A	+		(+)
> 29	2Cqm			+
Perfil 2 Las Caballerizas				
0-14	A1		++	+
14-28	A2		++++	
28-42	C		++++	
> 42	2Cx		++++	
Perfil 3 Tlalpexco				
0-34	A	+		+
34-60	Bt	(+)		++++
60-110	C			++++
> 100	2Cqm			+++

<sup>†</sup> C = caolinita; E = esmectita; H = haloisita. Fase: +++++ = predominante; ++++ = dominante; +++ = media; ++ = baja; + = muy baja; (+) = trazas.

### CONCLUSIONES

- Los suelos con presencia de capas endurecidas en la Sierra de Guadalupe se encuentran, en su mayoría, sobre laderas con pendientes mayores que 10%, son poco profundos, pedregosos y con horizontes superficiales, ligeramente ácidos, ricos en materia orgánica, con un valor alto de capacidad de intercambio catiónico (CIC) y un elevado porcentaje de saturación de bases.

- En estos suelos se presenta un incipiente proceso de lixiviación dada la estacionalidad y la escasa precipitación, por lo que el complejo de saturación

**Cuadro 5. Óxidos totales de las capas endurecidas.**

Profundidad cm	Horizonte	Óxidos totales (%)		
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Perfil 1 Zacatenco				
> 29	Cqm	81.66	12.34	0.62
Perfil 2 Las Caballerizas				
> 42	2Cx	45.93	18.41	7.01
Perfil 3 Tlalpexco				
> 110	2Cqm	67.90	20.98	4.27

está ocupado por Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, en especial en los horizontes superficiales.

- Estos suelos se formaron a partir de diversos materiales volcánicos de tipo piroclástico que se consolidaron y estratificaron en el momento de su depósito, formando tobas de origen dacítico y andesítico, por lo que no presentan una secuencia de alteración, sino sus horizontes y capas se consideran como discontinuidades litológicas.

- El material endurecido del Perfil 2 se consideró como un fragipán (2Cx), ya que, a pesar de su dureza en seco y resistencia a la compresión confinada, se colapsó al contacto con el agua y con el KOH caliente, además de confirmar la presencia de arcillas de tipo esmectítico.

- Las capas endurecidas de los Perfiles 1 y 3 se consideraron como materiales tobáceos, poco alterados aunque, dada la resistencia a la compresión confinada que presentó el horizonte 2Cqm del Perfil 3, se estima que, además de la sílice presente, se

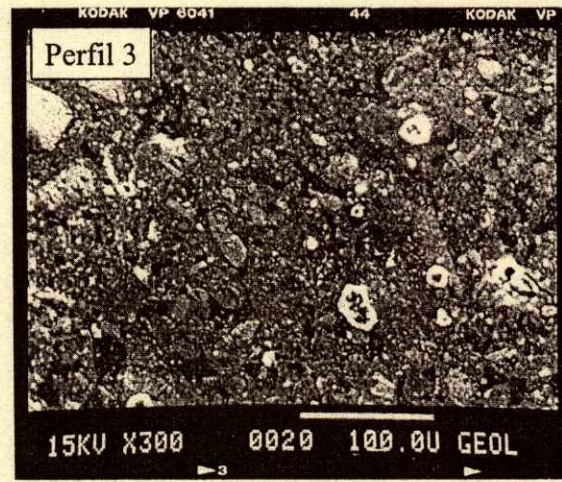
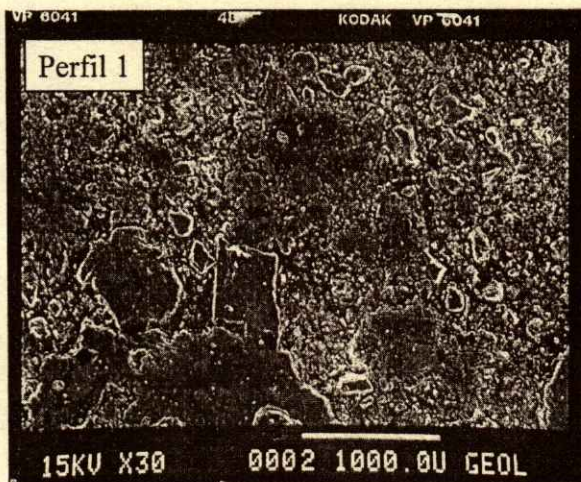


Figura 4. Micrografías de los horizontes 2Cqm del P-1 y P-3; nótese la poca alteración en los bordes de los minerales y lo compacto de la matriz.

encuentran cantidades importantes de arcillas, que le confieren una mayor resistencia al fracturamiento y una mayor dureza.

- La mineralogía de estos suelos está dominada por haloisita, esmectitas y caolinita, predominando esmectitas en los lugares con menos pendiente, donde las condiciones de drenaje favorecen su formación.

### AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo recibido al Proyecto No. 26294-B. Se reconoce la ayuda brindada por Patricia E. Altúzar-Coello, Margarita Reyes-Salas, Héctor Alfredo Legorreta-Cuevas, María de Lourdes Rodríguez-Gamiño y Humberto Núñez-Cardona por su colaboración en los diferentes aspectos de este trabajo. Asimismo, a la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENADER) del Gobierno de la Ciudad de México, en especial al personal de Sierra de Guadalupe.

### LITERATURA CITADA

- Acevedo S., O.A. y D. Flores R. 2000. Genesis of white fragipans of volcanic origin. *Rev. Mex. Ciencias Geológicas* 17: 152-162.
- Acevedo S., O.A., L.E. Ortiz H., D. Flores R., A.S. Velásquez R. y K. Flores C. 2003. Caracterización física y química de horizontes endurecidos (Tepetates) en suelos de origen volcánico del estado de México. *Agrociencia* 37: 435-449.
- Aguilera H., N. 1989. Tratado de edafología de México. Tomo I. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Birkeland, W.P. 1984. Soil and geomorphology. Oxford University Press. New York.
- Cuanalo de la Cerda, H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 3a ed. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- De las Salas, G. 1987. Suelos y ecosistemas forestales: Con énfasis en América tropical. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Duchaufour, P.H. 1984. Edafología I. Edafogénesis y clasificación. Masson. Barcelona, España.
- Etchevers B., J.D., R.M. López R., C. Zebrowsky y D. Peña H. 1992. Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y Tlaxcala, México. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 171-177.
- FAO. Food and Agricultural Organization. 1999. Base referencial mundial del recurso suelo. Informes sobre recursos mundiales de suelos 84. Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (SICS), Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos (ISRIC) y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 94 p.
- Flores R., D., J.R. Alcalá M., A. González V. y J.E. Gama C. 1992. Suelos con fragipán de origen volcánico en clima semicálido y subhúmedo: El caso del noreste del Estado de Morelos, México. *Rev. Inst. Geología* 10-2: 151-163.
- Flores R., D., R.J. Alcalá M., A. González V. y J.E. Gama C. 1996. Duripans in subtropical and temperate subhumid climate of the Trans-Mexico Volcanic Belt. *Rev. Mex. Ciencias Geológicas* 13-2: 228-239.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema climático de Köppen, (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Head, K.H. 1984. Manual of soil laboratory testing: Tome 1. Soil classification and compaction tests. Plymouth Pentech. Press. Londres, UK.
- Hidalgo M., C., P. Quantin y C. Zebrowsky. 1992. La cementación de los tepetates: Estudio de la silificación. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 193-201.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1982. Carta edafológica: Ciudad de México. Escala 1:50 000 Clave E-14:A-39. Aguascalientes, México.
- Klute, A. 1986. Methods of soil analysis. Part 1-Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Krauskopf, K.B. 1979. Introduction to geochemistry. McGraw-Hill. Kogakusha, Japón.
- Mehra, O.P. y M.L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrato system with sodium bicarbonate buffer. pp. 317-327. *In: 7<sup>th</sup> Conf. Clays and clay minerals.* Pergamon Press. New York.
- Mosser, F. 1977. Historia geológica de la Cuenca de México. En *Memorias de las obras del drenaje profundo del Distrito Federal.* Ed. D.D.F. Tomo I México p:7-38.
- Mosser, F. 1990. Estratigrafía y estructuras del Valle de México. pp. 29-36. *In: Ovando Shelley, E. y F. González Valencia (eds.). El subsuelo de la Cuenca de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo.* Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México D.F.
- Peña, D. y C. Zebrowsky. 1992. Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 20-26.
- Pimentel B., L. 1992. Como hacer productivos a los tepetates en México. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 293-301.
- Quantin, P. 1992. L'induration des matériaux volcaniques pyroclastiques en Amérique Latine: Processus géologiques et pédologiques. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 24-33.
- Quantin, P., A. Arias, J. Etchevers, R. Ferrera, C. Oleschko, A. Navarro, G. Werner y C. Zebrowsky. 1993. Tepetates de México: Caracterización y habilitación para la agricultura (Informe científico final del proyecto TS2-A212-CCEE/ORSTOM). *Terra 11 (Número Especial).*
- Shoji, S., M. Nanzyo y R.A. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* 21. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. *Agriculture handbook* 436. 2<sup>nd</sup> ed. United States Department

- of Agriculture and Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.
- Sparks, D.L. 1996. Methods of soil analysis. Part 3-Chemical Methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Vela C., G. y D. Flores R. 2000. Caracterización física, química y mineralógica de algunos suelos de la Sierra de Guadalupe, México. pp. 102-107. *In*: Quintero-Lizaola, R., T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibañez-Huerta y N.E. García-Calderón (eds.). La Edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Tomo 1. Colegio de Postgraduados, Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Autónoma Chapingo. México
- Verbeek, A.A., M.C. Mitchel y A.M. Ure. 1982. The analysis of small samples of rock and soil by atomic absorption and emission spectrometry after a lithium metaborate fusion/nitric acid dissolution procedure. *Analytica Chimica Acta* 135: 215-228.



# CAMBIOS DE USO DE SUELO MEDIANTE TÉCNICAS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN UNA REGIÓN CACAOTERA

## Change of Land Use by Means of Geographical Information Systems in a Cacao Region

Rodimiro Ramos-Reyes<sup>1</sup>, David J. Palma-López<sup>1†</sup>, Carlos A. Ortiz-Solorio<sup>2</sup>,  
Carlos F. Ortiz-García<sup>2</sup> y Gabriel Díaz-Padilla<sup>3</sup>

### RESUMEN

Se analizaron los cambios de uso del suelo en la zona centro-norte de la Región Chontalpa, Tabasco, durante 1972, 1984 y 2000, además de actualizar la cartografía de las unidades de suelos y su potencialidad para el cacao, la cual fue resultado directo de la clasificación por capacidad de uso. La metodología para realizar el análisis se basó en la fotointerpretación y en la comparación histórica de las fotografías aéreas de los años 1972 escala 1:60 000 y 1:75 000; 1984 y 1995, actualizándose este último año el uso del suelo al año 2000, mediante verificaciones de campo. Posteriormente, se utilizó un sistema de información geográfica (SIG), con el cual se elaboraron los mapas, mediante la digitalización de los mismos. Los suelos más aptos para el cacao son los Fluvisoles éutricos. Por otra parte, la agricultura manifestó disminución de 7.5% entre 1972 y 2000 de un área de 1235 ha, manteniéndose como el segundo uso del suelo por su extensión. El uso pecuario tuvo un crecimiento de 4.56% entre 1972 y 2000, siendo su uso en primer lugar de la zona, en cuanto a la velocidad de cambio de uso presentó en los primeros 12 años de análisis una ligera disminución, pero en los últimos 16 años se recuperó. La vegetación natural representó una pérdida muy severa en su superficie, ya que entre 1972 y 2000 ésta disminuyó de 1.98 a 0.28% de un área de 1235 ha. Otros usos como zona urbana e instalaciones petroleras tuvieron cambios de ligero a moderado; las lagunas presentaron recuperación de su superficie. En general, entre 1972 y 2000, la agricultura disminuyó ligeramente su superficie (7.5%), sobre todo la caña y el maíz;

aunque, el cacao y los huertos familiares mostraron un incremento en su área. Los pastizales tuvieron un incremento (4.56%), pero los tipos de vegetación sufrieron, en general, degradación muy severa (1.7%).

*Palabras clave:* Uso del suelo, ARC/INFO, cartografía.

### SUMMARY

In this work the changes of soil use were analyzed in the north-central part of the Chontalpa region, Tabasco, Mexico in 1972, 1984, and 2000. Also, the cartographic information on units of land and their potential for growing cacao were up-dated, which was the direct result of classification by use capacity. The methodology used for the analysis was based on photo-interpretation and the historical comparison of aerial photographs taken in 1972 on a scale of 1:60 000 and in 1984 and 1995 on a scale of 1:75 000 were carried out. From 1995 to 2000, the use was up-dated by means of field verification. Later, a geographical information system (GIS) was used to construct maps by digitization. The results showed that the soils most suitable for growing cacao were the Eutric fluvisols. It was also found that agricultural use decreased by 7.5% between 1972 and 2000 in an area of 1 235 ha but held second place in land use by area (38.23%). Livestock production increased by 4.56% between 1972 and 2000 and was the most extensive activity in the zone. The speed in the change of land use during the first 12 years analyzed decreased slightly, but during the last 16 years it increased. There were severe losses in area of natural vegetation, decreasing from 1.98% in 1972 to 0.28% in 2000 in an area of 1 235 ha. Other uses, such as urban areas and oil drilling, underwent slight to moderate increases in area. Grassland increased (4.56%), and vegetation types in general suffered very severe degradation (1.7%).

<sup>1</sup> Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. 86500 H. Cárdenas, Tabasco, México.

<sup>†</sup> Autor responsable ([dapalma@colpos.mx](mailto:dapalma@colpos.mx))

<sup>2</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Xalapa, Veracruz, México.

## INTRODUCCIÓN

El uso del suelo ocurre cuando éste se manipula físicamente (Richters, 1995), aunque también puede definirse como el proceso de producción de bienes materiales para la alimentación, instrumentos de trabajo y todos aquellos objetos que permitan asegurar al ser humano su supervivencia (INEGI, 1989). Cambio de uso del suelo son los cambios constantes que sufre la superficie terrestre debido, principalmente, a la apertura de nuevas tierras agrícolas, desmontes, asentamientos humanos e industriales, construcción de aeropuertos y carreteras (Soria *et al.*, 1998).

En la actualidad, los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios en la cobertura de suelo y la deforestación son importantes y necesarios, por que proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Van Lynden y Oldeman, 1997).

En la actualidad, existen diversos métodos para la detección de cambios, siendo los más utilizados: comparación posclasificación y cambios detectados mediante álgebra de imágenes (diferencia de bandas o cociente) (Green *et al.*, 1994; Mas, 1999; Tole, 2002).

Una de las actividades de mayor importancia agrícola y forestal en el estado de Tabasco es la cacaotera, cuya superficie equivale a 62 385 ha. De los productores (30 000 aproximadamente), 90% se localizan en la Región de la Chontalpa, representando el área más conglomerada por el cultivo. La problemática actual que enfrenta este cultivo es la disminución de su superficie por la reconversión del uso del suelo a otras actividades, entre las que destaca la ganadería.

Una de las formas de evaluar la dinámica de uso del suelo es la fotointerpretación de imágenes aéreas y el análisis de imágenes de satélite, con los cuales se estima el crecimiento o la disminución de la superficie cultivada (Herrera, 1983). Los cambios de uso del suelo pueden evaluarse a través de la comparación histórica, detectada por el uso de fotografías aéreas de diferentes años (FAO, 1984; Ortiz-Solorio *et al.*, 1994), las cuales se interpretan y se vacía la información en mapas cartográficas que pueden manipularse utilizando sistemas de información geográfica (SIG), como el ARC/INFO o IDRISI. Estos programas computacionales son importantes para realizar evaluaciones de dinámicas de uso del suelo a través de la variable tiempo en años. En

Tabasco, la mayoría de los trabajos de evaluación de tierras (Zavala, 1988, 1990; Larios y Hernández, 1992; Triano, 1999; Palma-López y Cisneros, 2000) se han realizado de manera tradicional, sin el apoyo del SIG, basados en recorridos de campo, lo cual provoca que la información se pierda o deteriore fácilmente, dado que sólo queda almacenada en documentos y no cumple su objetivo de proporcionar el conocimiento de los estudios elaborados.

Lo anterior ubica la importancia del trabajo, ya que lo generado en este estudio permitirá a las instituciones planear el manejo de los recursos, a escala de pequeñas regiones y tener una fuente de información importante sobre el uso del suelo, y así, dar recomendaciones más certeras en cuanto a su aptitud de uso, manejo y planeación del cultivo para la Región Chontalpa, Tabasco. A pesar de los cambios de uso que se le han dado en el Estado al cultivo de cacao, el área de estudio ha sido históricamente la zona más representativa por su extensión (Palma y Cisneros, 2000), por lo tanto el objetivo del presente estudio fue evaluar los cambios de uso del suelo en los periodos 1972, 1984 y 2000, los cuales se seleccionaron por la disponibilidad del material, mediante el SIG ARC/INFO para el área de estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del Área de Estudio

El área de estudio se localiza al norte de Tabasco, abarca parte de los municipios de Comalcalco, Cunduacán, Jalpa de Méndez y Cárdenas. Sus coordenadas geográficas son 18°00'00" y 18°20'40" N, y 93°04'57" y 93°24'31" O. Comprende 62 385 ha y forma parte de la región más productora de cacao en Tabasco. El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, con una temperatura media anual de 26 °C y una precipitación anual de 2000 mm (INEGI, 1986). La misma institución mencionó que forma parte de la región hidrológica Grijalva-Usumacinta (No. 30) que, a su vez, se ubica en el cauce viejo del río Seco de la llanura Costera del Golfo Sur, geológicamente pertenece a la Era Cuaternaria con sedimentos superficiales que corresponden al sistema morfológico denominado llanura fluvial del Reciente, la cual fue edificada por la abundante carga sedimentaria aportada por el antiguo caudal del río Seco (INEGI, 1986; West *et al.*, 1987). El relieve oscila de 4 a 10 msnm. En cuanto a los usos actuales, son cacao, caña de azúcar,

pastizales, maíz y frijol; en la vegetación natural se observan pequeñas áreas de plantas hidrófilas. De acuerdo con Palma-López y Cisneros, 2000), se reportan dos unidades de suelos para la zona: Fluvisoles y Gleysoles.

### Elaboración de los Planos de Uso del Suelo

La metodología utilizada para elaborar los planos de uso del suelo fue:

**Fotointerpretación y cartografía preliminar de uso del suelo.** Los materiales se obtuvieron del INEGI, fotografías aéreas blanco y negro de diferentes años (1972, escala 1:60 000; 1984 y 1995 ambos a escala 1:75 000) y mapas topográficos de uso del suelo, uso potencial de suelo, clases de suelos a escala 1:50 000 del área centro-norte de la Región Chontalpa, Tabasco.

Se interpretó el uso del suelo de las fotografías aéreas de los diferentes años, con base en la técnica de fotointerpretación y con el apoyo de estereoscopia de bolsillo, tomando como referencia los criterios: tono, textura, forma, tamaño y relieve (Olave, 1975; Guerra, 1980; Herrera, 1983; Ortiz-Solorio *et al.*, 1994). Se elaboraron los mapas preliminares de usos del suelo de los años 1972, 1984 y 2000. Posteriormente, se homogeneizaron las escalas con base en la técnica de restitución fotogramétrica, utilizando un Estereo-Skech master modelo SM-19.84 a la escala 1: 50 000, tomando como base los mapas topográficos de INEGI. Este procedimiento permitió obtener mapas de diferentes años con la misma escala. Para el caso del mapa actual (2000), se seleccionaron sitios en gabinete a partir de la fotointerpretación de las fotografías aéreas de 1995, las cuales se verificaron en campo; para el caso de los usos de años anteriores, se realizaron 24 entrevistas a productores encaminadas a obtener información sobre el pasado y presente del uso del suelo. Las encuestas se realizaron al azar y se trató de cubrir la mayor parte del área de estudio; se detuvo el número de entrevistados cuando la información comenzó a ser repetitiva.

**Definición de unidades de suelo.** Se consideró como base el mapa de "Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco" a nivel de subunidades de suelos, según la clasificación FAO (Palma-López y Cisneros, 2000); la cartografía del área se generó con base en interpretación de fotografías aéreas y tomando como criterio la fisiografía del terreno, el límite de usos del suelo y su corroboración en campo por medio de barrenaciones dirigidas hacia los linderos de suelos y

análisis de suelos para verificar las unidades previamente identificadas en el área de estudio.

**Digitalización, corrección, creación de polígonos y etiquetas en ARC/INFO.** Con los mapas corregidos, se procedió a digitalizar en el programa ARC/INFO, el cual consistió en pasar todos los arcos, contactos o contornos de los mapas de usos del suelo de 1972, 1984 y 2000, y las unidades de suelos. Una vez realizado el traslado de los anteriores a los mapas, se corrigieron dentro del Arc Tool, el cual se basó en unir los polígonos y eliminar los linderos restantes. Ya elaborados todos los arcos, se crearon los polígonos, mediante la opción **Build**; en caso de tener errores, se notificaba al ejecutar este comando. Después, se elaboraron las etiquetas mediante la operación **Createlabels** y el nombre del mapa; una mejor descripción de cada uno de estas opciones se encuentra en el manual adjunto del paquete ARC/INFO u otra fuente, como Bosque *et al.* (1994) y Star y Estes (1996).

**Edición de los mapas en ARC/VIEW.** Los mapas obtenidos en ARC/INFO se llevaron al programa ARC/VIEW para poder asignarles los atributos a las tablas, lo cual consistió en proporcionarle el uso o la unidad de suelos a cada uno de los polígonos elaborados de cada mapa. Posteriormente, se editó a cada uno de los mapas de usos o unidades de suelos y se le asignó un achurado para su diferenciación; finalmente, se imprimieron los mapas al igual que sus tablas respectivas.

**Evaluación de la velocidad de cambios de uso del suelo o degradación de la tierra.** Se evaluó la velocidad de degradación de cambios de uso del suelo, para 1972 y 2000, mediante la fórmula adaptada de FAO (1984) y Ortiz-Solorio *et al.* (1994); conjuntamente se aplicaron los indicadores de cambios de uso del suelo (nula, ligera, moderada, severa y muy severa) (Cuadro 1).

$$ID = \frac{(\% \text{ de US del último año} - \% \text{ de US del año anterior})}{\% \text{ de US del último año}} \times 100$$

$$ID \text{ en } \% \text{ por año} = \frac{ID}{\text{Número de años del periodo evaluado}}$$

Donde: ID = incremento de la degradación; US = uso del suelo.

Las clases de cambio de uso del suelo adaptadas de FAO (1984) y Ortiz-Solorio *et al.* (1994), para evaluar

**Cuadro 1. Intervalos de clases para evaluar la velocidad de cambios de uso del suelo.**

Intervalo	Clase
< 0.01	Recuperación (R)
0.0	Nula (N)
0.0 - 2.49	Ligera (L)
2.5 - 4.99	Moderada (M)
5.0 - 7.49	Severa (S)
> 7.5	Muy severa (MS)

Nota: El incremento del uso del suelo urbano, la infraestructura petrolera y los huertos familiares representan degradación de la tierra.

Fuente: FAO (1984).

la velocidad y que se utilizaron en el área de estudio son:

**Recuperación:** La superficie de uso del suelo se incrementa.

**Nula:** La superficie de uso del suelo se mantiene igual.

**Ligero:** Puede tener efecto perjudicial pequeño.

**Moderado:** Los cambios representan un efecto perjudicial.

**Severo:** Tendrán un importante efecto en la disminución de la superficie de uso del suelo.

**Muy severo:** El uso de la superficie de la tierra llega a ser impracticable o antieconómico.

Con base en la clasificación, se calcularon los intervalos para evaluar la velocidad de cambios de uso del suelo, es decir, si el valor cae en el rango menor que 0.01 existe una recuperación del sitio, considerándose positivo el cambio sucedido, y así sucesivamente según el valor obtenido de la ID. Con toda esta información, se elaboró el mapa de velocidad de cambio de uso del suelo, sobreponiendo la información cartográfica de 1972 y 2000, mediante

el apoyo de los programas **ARC/INFO** y **ARC/VIEW**.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Subunidades de Suelo

El estudio de suelos se realizó en el área compacta donde se distribuyen las plantaciones de cacao y de acuerdo con la clasificación FAO-UNESCO (FAO, 1989) destaca la asociación Vertisol éutrico + Gleysol éutrico, con un total de 37.11% de la superficie analizada, siguiendo el Fluvisol éutrico (31.27% del área total), aunque la mayor cantidad de suelos se refiere a la asociación Vertisol éutrico + Gleysol éutrico, se encontró que esta asociación no es muy utilizada para el cacao, ya que el Fluvisol éutrico es el más utilizado para cacao por presentar mejores condiciones físicas para este cultivo (Puebla, 1990; Palma-López y Cisneros, 2000) (Cuadro 2).

Estos suelos presentan pocas restricciones para su uso, razón por la cual son considerados como de primera clase (I), en general son casi planos, no presentaron problemas de erosión, son profundos, bien drenados y fáciles de trabajar, tienen buena capacidad de almacenamiento de agua y responden a la fertilización, con estas características son clasificados como de excelente potencial (IMTA, 1989). Los criterios de aptitud de la tierra para el cultivo de cacao (Cuadro 3) se tomaron en cuenta de acuerdo con las unidades de suelos de la zona y considerándolo de excelente, mediano y no apto como lo maneja la FAO (1976) y, a su vez, por su potencial edáfico de los mismos suelos (Palma-López y Cisneros, 2000). Estos

**Cuadro 2. Subunidades de suelo en la región productora de cacao. Tabasco, México.**

Unidad de suelo	Subunidad de suelo	Símbolo	Superficie	
			ha	%
Vertisol + Gleysol	Éutrico + éutrico	VRe + GLe	23145	37.11
Fluvisol	Éutrico	FLe	19501	31.27
Fluvisol	Gleyi-éutrico	FLeg	14687	23.55
Fluvisol	Areni-éutrico	FLea	1924	3.08
Subtotal			59257	95.01
<b>Otros</b>				
Cauces viejos			1005	1.61
Huertos familiares			174	0.28
Lagunas			47	0.08
Zona urbana			1884	3.02
Total			62,367	100.00

Fuente: Palma-López y Cisneros (2000).

**Cuadro 3. Potencial edáfico de los suelos para la región productora de cacao. Tabasco, México.**

Uso potencial	Subunidad de suelo	Superficie	
		ha	%
Excelente	Fluvisol éútrico	19501	31.27
Mediano	Vertisol éútrico + Gleysol éútrico y Fluvisol gleyi-éútrico	37832	60.66
No apto	Fluvisol areni-éútrico	1924	3.08
	Subtotal	59257	95.01
	Cauces viejos	1005	1.61
	Huertos familiares	174	0.28
	Lagunas	47	0.08
	Zona urbana	1884	3.02
	Total	62 367	100.00

cuadros se obtuvieron a partir de las Figuras 1 y 2, las cuales se elaboraron mediante el programa de sistema de información geográfica ARC/INFO.

### Cambios de Uso del Suelo en el Período 1972-2000

Se clasificaron tres usos principales del suelo: a) Agrícola, que comprende a los cultivos perennes, semiperennes y anuales; b) Pecuario con el uso de pastizales principalmente; c) Vegetación natural representada por la vegetación riparia, secundaria y vegetación enraizada emergente; y d) Otros usos (zona urbana, lagunas, infraestructura petrolera). Los Cuadros 4 y 5, obtenidos de las Figuras 3, 4, 5 y 6, registran la información sobre los cambios de uso del suelo de la zona centro-norte de la Región Chontalpa, Tabasco, correspondientes al período 1972-2000. De acuerdo con Soria *et al.* (1998), los cambios esperados en las propiedades de un determinado paisaje pueden resumirse por una serie de probabilidades de las transiciones de un estado a otro sobre una determinada unidad de tiempo, por lo que los resultados obtenidos en los cambios del suelo reflejan ganancias y pérdidas en cada una de los usos clasificados anteriormente.

El uso agrícola en conjunto tuvo una disminución de 7.5% entre 1972 y 2000, manteniéndose como el segundo uso del suelo por su extensión (38.23%). Entre los cultivos, el cacao mostró una pequeña recuperación de su superficie en 2%. Si bien es cierto que se pierden algunas áreas cultivadas con cacao debido al fraccionamiento de las mejores tierras en la zona, no es afectada su superficie en general, porque se incrementa en otros tipos de suelos del área. Inversamente, la caña de azúcar perdió su área en 55% del total ocupada en 1972; sin embargo, a pesar de tener una velocidad de cambio de uso de recuperación, muy severa y moderada, en los años

analizados con respecto a su superficie sigue manteniéndose como el segundo uso agrícola más importante por su extensión. De igual manera, el cultivo de plátano redujo su extensión en 41.7% en 28 años, teniendo su mayor expansión en 1972; aunque cabe aclarar que el porcentaje perdido en hectáreas no es significativo (67 ha), atribuido a la poca relevancia del cultivo en el área de estudio. El cultivo de maíz se localizó en áreas reducidas, mismas que disminuyeron severamente (54.02%) respecto a 1972, contrario a lo mencionado por Zavala *et al.* (2003) para el campo petrolero Samaria, ya que dicho cultivo se incrementó debido a que las tierras inundadas se vieron favorecidas por las construcciones de drenes en 1988. Durante el período 1972-2000 han existido otros cultivos de menor importancia por sus pequeñas superficies, entre los que se encuentran naranja, mango, coco, papaya y huertos familiares, este último agrosistema ha cobrado importancia por su rápido crecimiento en la zona, paralelo a ello la población sigue incrementándose, lo cual indica que se están perdiendo áreas con potencial productivo, es decir, tierras muy aptas para el uso agrícola, como son los suelos Fluvisoles éútricos.

La pérdida constante del área con cultivo de maíz durante los 28 años de estudio, se debe a la falta de interés en cultivarlo, debido al poco rendimiento que obtienen los productores, ganando mayor importancia el uso pecuario (Palma-López y Cisneros, 2000).

La pérdida de extensión del cultivo de caña de azúcar coincide con las estadísticas de INEGI (1980, 1984b, 1990 y 1999), debido al crecimiento del cultivo en otros municipios, como Tenosique y Tacotalpa. Sin embargo, la superficie cañera en los cuatro ingenios actuales existentes en Tabasco (Benito Juárez, Santa Rosalía, Dos Patrias y Azuremex) han crecido en extensión, pero se han concentrado

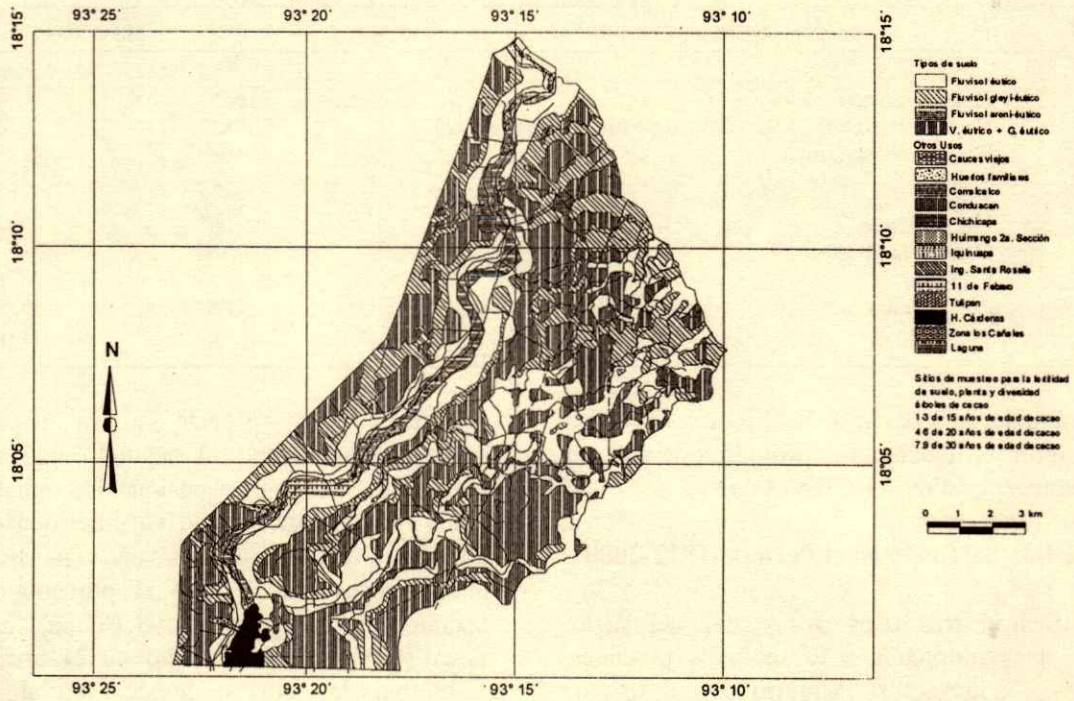


Figura 1. Subunidades de suelo para la región productora de cacao. Tabasco, México.

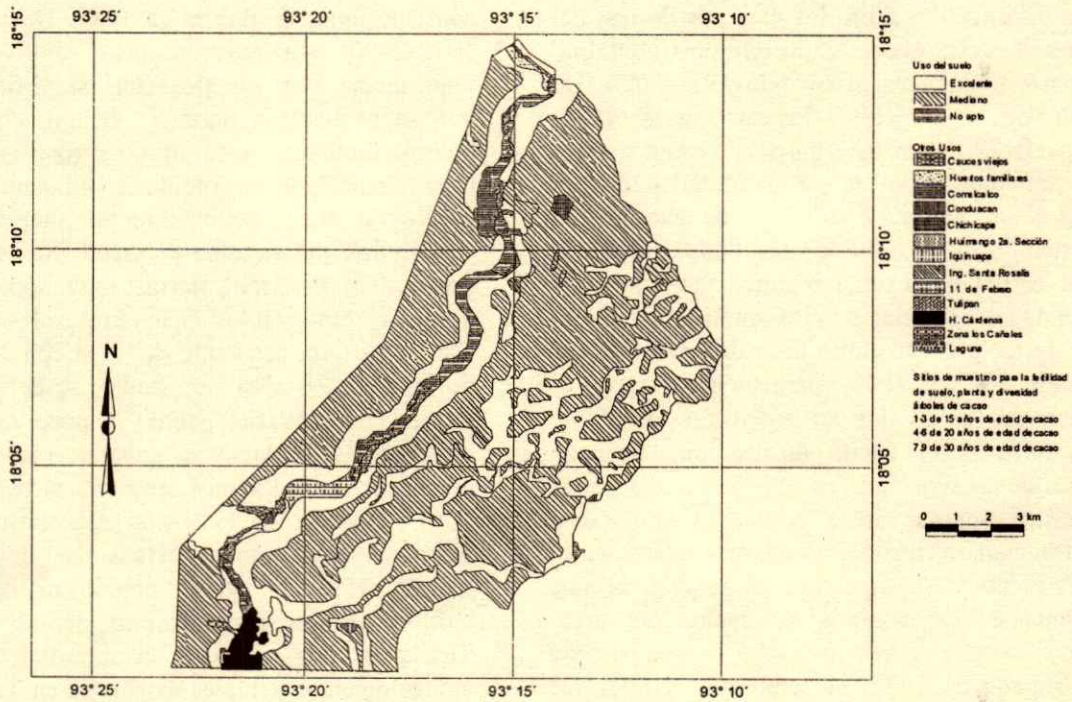


Figura 2. Potencial edáfica en la región productora de cacao. Tabasco, México.

Cuadro 4. Usos del suelo y tipos de vegetación en el periodo 1972-2000 en la región productora de cacao. Tabasco, México.

Uso del suelo	Superficie					
	1972		1984		2000	
	ha	%	ha	%	ha	%
Agrícola						
Cultivos perennes						
Cacao	18380	29.47	18025	28.89	18764	30.07
Naranja	9	0.01	9	0.01	3	0.00
Mango	14	0.02	8	0.01		
Coco	83	0.13	46	0.07	48	0.08
Cultivos semiperennes						
Plátano	152	0.24	20	0.03	85	0.14
Papaya			12	0.02	59	0.10
Caña	4433	7.11	6598	10.58	1994	3.20
Huertos familiares	686	1.11	1186	1.90	1936	3.10
Cultivos anuales						
Maíz	2089	3.35	2012	3.23	962	1.54
Pecuario						
Pastizal	34608	55.49	32139	51.52	36278	58.14
Tipos de vegetación						
Vegetación riparia	137	0.22	29	0.05		
Vegetación secundaria	116	0.19	39	0.06		
Hidrófita enraizada emergente	982	1.57	700	1.12	173	0.28
Otros usos						
Zona urbana	620	1.00	1471	2.36	1886	3.02
Lagunas	14	0.02	19	0.03	80	0.13
Infraestructura petrolera	46	0.07	72	0.12	126	0.20
Total	62369	100.00	62385	100.00	62394	100.00

Fuente: Se obtuvo mediante fotointerpretación de fotografías aéreas de INEGI (1972), Escala 1:60 000; INEGI (1984a, 1995), Escala 1:75 000; y visitas de campo para verificación.

alrededor de la fábrica. El área de estudio se localiza dentro del abastecimiento del ingenio Santa Rosalía y la pérdida del área cañera se debe a las políticas de dicho ingenio, entre las cuales destaca la compactación del área cañera en un diámetro no mayor que 15 km<sup>2</sup> alrededor del ingenio, provocando que una parte de esta área de abastecimiento haya quedado al oeste fuera del sitio de estudio.

El uso pecuario representado por pastizales tuvo un crecimiento de 4.56% entre 1972 y 2000 (Cuadro 4), manteniéndose su uso en primer lugar en el área de estudio, en cuanto a la velocidad de cambio de uso presentó en los primeros 12 años de análisis una ligera disminución, pero posteriormente se recuperó. El rápido crecimiento de los pastizales probablemente se debe al constante mejoramiento de los pastizales mediante la introducción de especies de mejor calidad forrajera y a la seguridad que la producción ganadera ha mostrado en Tabasco (Tudela, 1992; Palma-López y Cisneros, 2000).

Los tipos de vegetación primaria presentaron una pérdida muy severa en su superficie, ya que entre

1972 y 2000 disminuyó 1.7% en el área, (Cuadro 4), aunque para esta región productora de cacao nunca ha sido extensa su superficie. Los relictos de vegetación riparia y secundaria se destruyeron en el periodo 1972-1984; la vegetación hidrófila enraizada emergente (tular y popal) también perdió 82.16% de su área. En 1972, la vegetación hidrófila ocupaba 982 ha y, en la actualidad, se ve reducida a 173 ha; la pérdida de esta vegetación se debió principalmente al incremento de los pastizales en la zona.

Otros usos del suelo, como las áreas urbanas, siempre presentaron un constante incremento y crecieron en el periodo 1972-2000 en 66.89%, ocupando en la actualidad 3.02% de esta región productora de cacao. La expansión de la zona urbana tuvo velocidad de cambio de moderada a ligera en los 28 años analizados (Cuadro 4). Las áreas ocupadas por lagunas de agua dulce se incrementaron a pequeña escala su superficie original, debido al constante incremento de las zonas petroleras, que de 0.07% ocupado en 1972 se incrementaron 65% en la actualidad, llegando a representar 0.20% de la

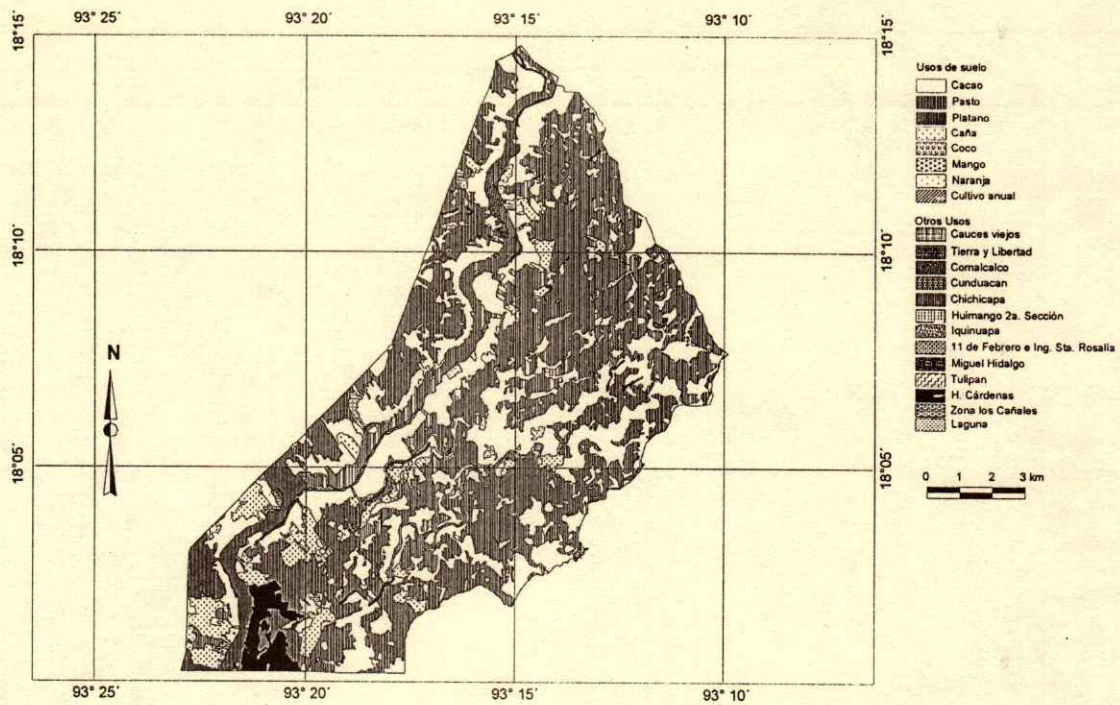


Figura 3. Usos de suelo en 1972 en la región productora de cacao. Tabasco, México.

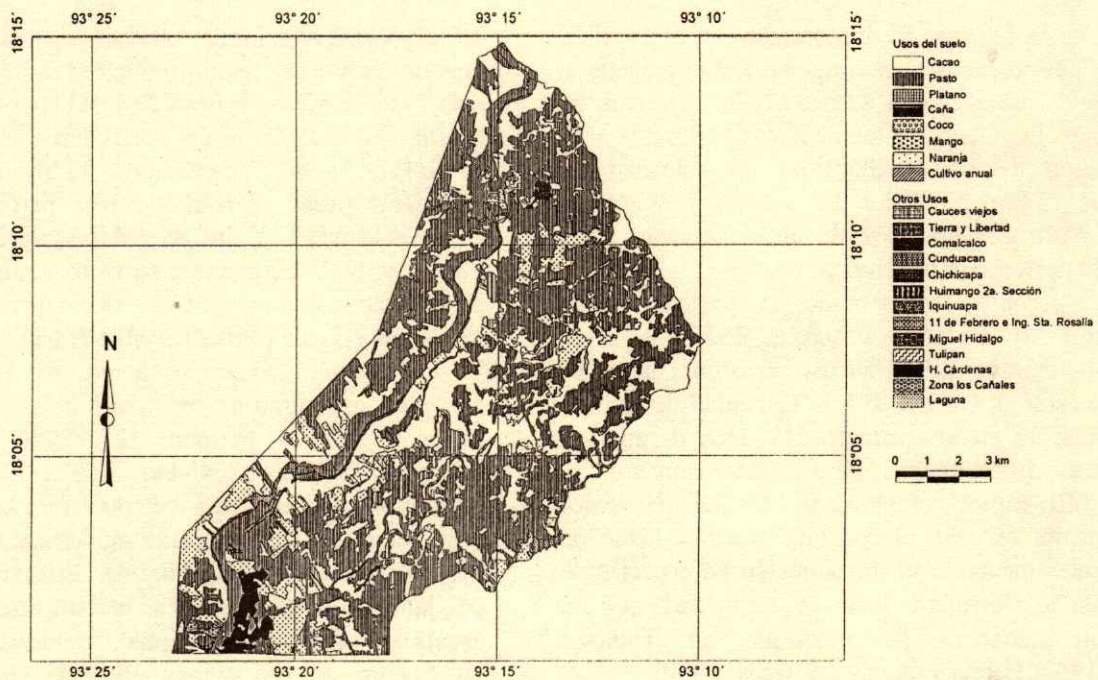


Figura 4. Usos de suelo en 1984 en la región productora de cacao. Tabasco, México.



**Cuadro 5. Evaluación de la velocidad de cambios de usos del suelo en el periodo 1965-2000 en la región productora de cacao. Tabasco, México.**

Usos del suelo	Velocidad de cambio de uso del suelo		
	1972-1984	1972-2000	1984-2000
<b>Agrícola</b>			
Cultivos perennes			
Cacao	0.17 L <sup>†</sup>	0.07 R	0.24 R
Naranja	0.00 N		∞ MS
Mango	8.33 MS	∞ MS	∞ MS
Coco	7.14 S	2.23 M	0.78 R
Cultivos semiperennes			
Plátano	58.33 MS	2.55 M	4.91 R
Papaya		+ 0.35 R	5.00 R
Caña	+ 2.73 R	4.36 M	14.41 MS
Huertos familiares	3.46 M	2.29 L	2.42 L
Cultivos anuales			
Maíz	0.31 L	4.19 M	6.86 S
<b>Pecuario</b>			
Pastizal	0.64 L	+ 0.16 R	0.71 R
<b>Tipos de vegetación</b>			
Vegetación riparia	28.33 MS	∞ MS	∞ MS
Vegetación secundaria	18.05 MS	∞ MS	∞ MS
Hidrófita enraizada emergente	3.35 M	16.45 MS	18.75 MS
<b>Otros usos</b>			
Zona urbana	+ 4.80 M	+ 2.39 L	+ 1.37 L
Lagunas	+ 2.78 R	+ 3.02 R	+ 4.81 R
Infraestructura petrolera	+ 3.47 M	+ 2.32 L	+ 2.50 M

Nota: 1. El incremento del uso del suelo urbano, la infraestructura petrolera y los huertos familiares representan degradación de la tierra.

2. En algunas veces la perdió de naranja y mango, no fue degradación de tierra, porque en la actualidad es otro cultivo agrícola.

<sup>†</sup> Clase de cambio de uso del suelo: R = recuperación; L = ligera; M = moderada; S = severa; MS = muy severa; N = nula; ∞ = cambio de uso infinito o total.

Fuente: FAO (1984).

superficie total, teniendo una velocidad de degradación de ligera a moderada en los años evaluados (Cuadro 5).

La degradación muy severa de la vegetación y el incremento rápido del uso pecuario (pastizales), los asentamientos humanos y la industria petrolera son considerados indicadores de cambios de uso del suelo globales a nivel estatal, nacional e internacional (Pietri y Stern, 1985; Livernash, 1992; Tudela, 1992); datos similares se encontraron en la presente investigación, dando origen a pérdidas de áreas con potencial para la agricultura.

En la región productora de cacao, la pérdida de áreas con vegetación, específicamente la vegetación riparia, secundaria y la vegetación hidrófila, ha significado una degradación muy severa (Cuadro 5), la cual se debió fundamentalmente al impulso de las actividades socioeconómicas, como la ganadería, la agricultura, la industria petrolera, y las zonas con vivienda rural y urbana; estos cambios de uso del

suelo son similares a los reportados por Mondragón *et al.* (1986) y Ortiz-Solorio *et al.* (1997). La destrucción de la vegetación en general conduce a procesos de degradación y/o desertificación de suelos como lo mencionaron Villar *et al.* (1999), sobre todo cuando el suelo no se maneja de manera adecuada y queda desprotegido de una cubierta vegetal amortiguadora del agua de lluvia y la escorrentía superficial. Estos procesos también pueden conducir a la reducción de la fertilidad de los suelos, debido al menor aporte de hojarasca por la pérdida de la cobertura vegetal, lo cual conduce a la disminución de la materia orgánica (FAO y PNUMA, 1984).

En general, las clases de cambios de usos del suelo en la zona de estudio no son tan importantes, ya que en su gran mayoría el área se manifiesta como recuperación, dando un enfoque positivo a toda la región centro-norte de la Chontalpa, Tabasco; sin embargo, no hay que descartar que existen pocas áreas con cambios negativos (Figura 6)

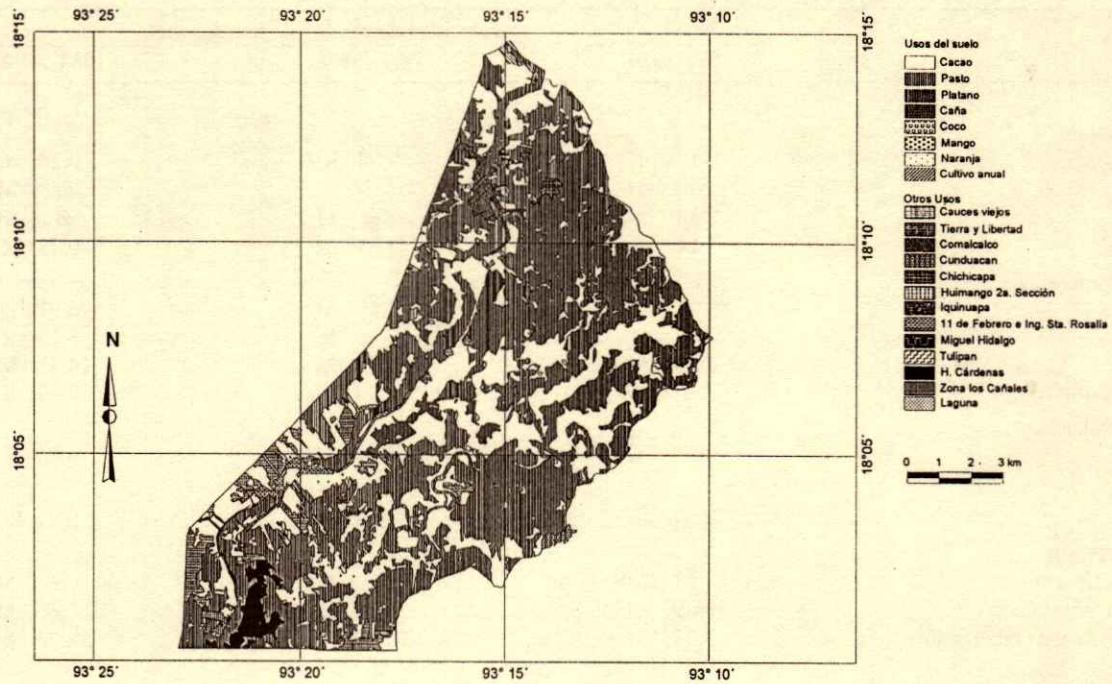


Figura 5. Usos de suelo de 2000 en la región productora de cacao. Tabasco, México.

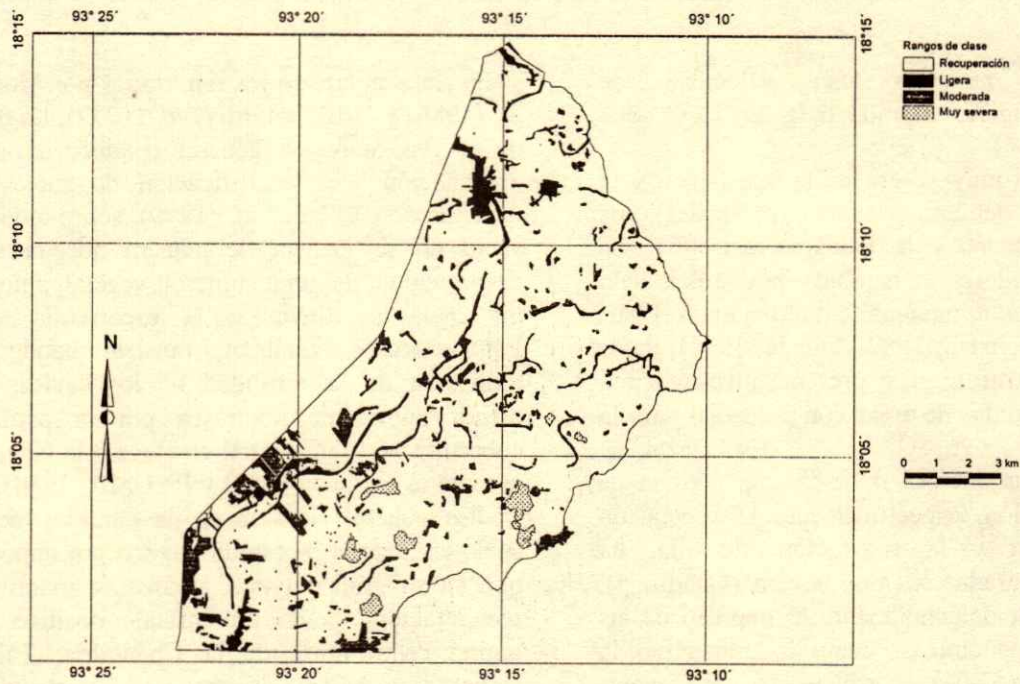


Figura 6. Evaluación de la velocidad de cambios de usos del suelo en el periodo 1972-2000 en la región productora de cacao. Tabasco, México.

## CONCLUSIONES

- Los suelos Fluvisoles éútricos presentaron una superficie de 19 501 ha, clasificándose como suelos de alta aptitud para el cacao, seguido de los Fluvisoles gleyi-éútrico más la asociación Vertisol éútrico + Gleysol éútricos con 37 832 ha clasificados como de mediano potencial edáfico.
- En la región productora de cacao entre 1972-2000, el uso del suelo agrícola disminuyó ligeramente su superficie en 7.5%, sobre todo el cultivo de caña y maíz; en cambio, el cultivo de cacao incrementó su área en 2%, al igual que los huertos familiares.
- La actividad ganadera presentó un incremento de 55.49% en 1972 a 58.14% en 2000 y se ubicó como la principal actividad en la zona de estudio.
- Los tipos de vegetación sufrieron, en general, degradación muy severa, disminuyendo de 1.98% en 1972 a 0.28% en la actualidad, convirtiéndose en áreas para pastizales y, en menor escala, por infraestructura petrolera, zonas rurales y urbanas.
- El crecimiento de las zonas urbanas y de los huertos familiares fracciona los suelos más fértiles, como es el caso de los Fluvisoles, lo cual trae como consecuencia la disminución de las zonas agrícolas, y el encarecimiento de las mejores tierras para cultivos de importancia en la región de la Chontalpa.

## LITERATURA CITADA

- Bosque S., J., F. Escobar M., E. García H. y M. Salado G. 1994. Sistema de Información Geográfica: Prácticas con PC ARC/INFO e IDRISI. Ed. Ra-ma. Addison-Wesley Iberoamericana. Madrid, España.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1976. Esquema para la evaluación de tierras. Roma, Italia.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1984. Metodología provisional para la evaluación y la representación cartográfica de la desertización. Roma, Italia.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1989. FAO/UNESCO: Carte mondiale des sols, légende révisée. Rapport sur les ressources en sols du monde, No. 60. Roma, Italia.
- FAO y PNUMA. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1984. Directrices para la evaluación y la representación cartográfica de la desertificación. Roma, Italia.
- Green, K., D. Kempka y L. Lackely. 1994. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 60: 331-337.
- Guerra P., F. 1980. Fotogeología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Herrera H., B. 1983. Elementos de fotogrametría, uso de los materiales aerofotográficos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1989. Manual de clasificación e interpretación de suelos con base en el sistema de taxonomía de suelos. Cuernavaca, Morelos, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1972. Fotografías aéreas. Zona E15-5. Blanco y negro. Escala 1:60 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1980. Anuario estadístico del estado de Tabasco. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1984a. Fotografías aéreas. Zona E15-5. Blanco y negro. Escala 1:75 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1984b. Anuarios estadísticos del estado de Tabasco. Tomo II. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1986. Síntesis geográfica, nomenclator y Anexo cartográfico del Estado de Tabasco. México, D. F.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1989. Uso potencial del suelo. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1990. Anuario estadístico del estado de Tabasco. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1995. Fotografías aéreas. Zona E15-5. Blanco y negro. Escala 1:75 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1999. Anuario estadístico del estado de Tabasco. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Jensen, J.R. 1996. Introductory Digital Image Processing. A remote sensing perspective. Prentice Hall.
- Larios R., J. y J. Hernández. 1992. Fisiografía, ambientes y uso agrícola de la tierra en Tabasco, México. Universidad Autónoma Chapingo. México, D.F.
- Livernash, R. 1992. Alimentación y agricultura. pp. 107-127. In: Banco Interamericano de Desarrollo (ed.). Recursos Mundiales 1992-1993. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. México, D.F.
- Mas, J.F. 1999. Monitoring land-cover changes: A comparison of change detection techniques, Int. J. Remote Sensing 20: 139-152.
- Mondragón J., C., C. Ortiz S., A. Turrent F. y M. Anaya G. 1986. El cambio de uso de la tierra como proceso de desertificación en el valle de Puebla. Agrociencia 64: 33-47.
- Olave F., D., M. 1975. Metodología para el estudio de vegetación con el uso de fotografías aéreas. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Ortiz-Solorio, C. y H. Cuauhtle de la C. 1978. Metodología del levantamiento fisiográfico: Un sistema de clasificación de tierras. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Ortiz-Solorio, L., M. Anaya G. y J.W. Estrada B. 1994. Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra. Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo y CONACyT. México, D.F.
- Ortiz-Solorio, L., M., C. Ortiz S. y M. Escalona M. 1997. El cambio de uso del suelo en el valle de Puebla-Tlaxcala y su impacto en la producción de maíz y frijol. Agrociencia 31: 231-235.

- Palma-López, D.J. y J. Cisneros A. 2000. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Volumen 1. Fundación Produce Tabasco A. C. Villahermosa, Tabasco, México.
- Pietri, R. y C. Stern. 1985. Petróleo, agricultura y población en el sureste de México. El Colegio de México. México, D.F.
- Richters J., E. 1995. Manejo del uso de la tierra en América Central hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Soria R., J., C.A. Ortiz-Solorio, F. Islas G. y V. Volke H. 1998. Sensores remotos, principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales: Experiencias en México. Publicación Especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Star, J. y J. Estes. 1996. Geographic information systems: An introduction. Prentice Hall. Englewood, NJ.
- Tole, L. 2002. An estimate of forest cover extent and change in Jamaica using Landsat MSS data. *Int. J. Remote Sensing* 22: 91-106.
- Triano S., A. 1999. Estudio nutrimental de las plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la margen derecha del río Seco, Comalcalco, Tabasco. Tesis profesional. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 65 p.
- Tudela, F. 1992. La modernización forzada del trópico: El caso de Tabasco. Proyecto integrado del Golfo. 2a ed. El Colegio de México-Federación Internacional de Institutos de Estudios Avanzados-Instituto de Investigaciones de las Naciones Unidas para Desarrollo Social-Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.
- Van Lynden, G.W.J. y L.R. Oldeman. 1997. The assessment of the human-induced soil degradation in South and Southeast Asia. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Villar S., B., B. Figueroa S., J.L. Oropeza M., L. Landois P. y V. Volke H. 1999. Erosionabilidad de suelos y su impacto en la productividad del maíz en el trópico mexicano. *Agrociencia* 32: 199-207.
- West, R.C., N.P. Psuty y B.G. Thom. 1987. Las tierras bajas de Tabasco en el sureste de México. Gobierno del Estado de Tabasco, Instituto de Cultura de Tabasco. Villahermosa, México.
- Zavala C., J. 1988. Regionalización natural de la zona petrolera de Tabasco. Casos de estudio. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos-División Regional del Estado de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.
- Zavala C., J. 1990. Regionalización natural e impacto petrolero en el distrito Agua Dulce, Tabasco. Colegio de Postgraduados. Cárdenas, Tabasco, México.
- Zavala C., J., R. Ramos R., O. Castillo A. y A.I. Ortiz C. 2003. Cambio de uso del suelo. pp. 33-52. *In*: Zavala C., J., C. Gutiérrez C. y D.J. Palma-López (eds.). Impacto ambiental en las tierras del campo petrolero Samaria, Tabasco. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco-Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Villahermosa, Tabasco, México.

# RELACIONES ENTRE EL MANEJO DEL HUERTO DE NOGAL Y LA POROSIDAD DEL SUELO

## Management of Pecan Orchards as Related to Soil Porosity

Guillermo González-Cervantes<sup>1‡</sup>, Ignacio Sánchez-Cohen<sup>1</sup> y David García-Arellano<sup>1</sup>

### RESUMEN

Se estudió la porosidad del suelo mediante análisis de imagen, en huertas de nogal pecanero (*Karya illinoensis* Koch) con diferentes sistemas de manejo. En cada huerta, se obtuvieron monolitos de suelo no alterados cada 10 cm sobre los primeros 40 cm de profundidad, los cuales se impregnaron con resina poliéster con un pigmento fluorescente. El objetivo fue caracterizar la porosidad del suelo a partir de dos parámetros morfológicos: tamaño y forma de los poros. El análisis de la porosidad muestra claramente que el tráfico de la maquinaria y las prácticas culturales generan cambios en la distribución y morfología de los poros.

**Palabras clave:** *Karya illinoensis* Koch, labranza, morfología de poros, permeabilidad.

### SUMMARY

Soil porosity was studied with image analysis in pecan (*Karya illinoensis* Koch) orchards under different management systems. For each sample site, non-disturbed soil monoliths were obtained every 10 cm depth for the first 40 cm; these were impregnated with a polyester resin and a fluorescent pigment. Soil porosity was characterized according to size and shape of the pores. Analysis shows that machinery traffic and cultural practices affect distribution and shape of the pores.

**Index words:** *Karya illinoensis* Koch, tillage, morphology of pores, permeability.

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria. Apartado Postal 41, 35150 Cd. Lerdo, Durango, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx)

Recibido: Agosto de 2002. Aceptado: Febrero de 2004.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 279-287.

### INTRODUCCIÓN

El norte de México presenta un clima árido a semiárido con una precipitación pluvial de 250 a 600 mm anuales, según la altitud (Estrada, 1999). Con estas condiciones climáticas, el problema de la cantidad, distribución y disponibilidad de agua para la irrigación y explotación comercial de nuez se presenta en términos difíciles. Esto ha impulsado a los productores a utilizar cada vez más el agua del subsuelo y hacer eficiente la distribución y aplicación de este recurso; para ello, han sofisticado los sistemas de riego e implementado prácticas diferentes de manejo con la finalidad de incrementar la infiltración y disponibilidad del agua.

El flujo del agua en el suelo se realiza por los espacios vacíos (porosidad), de ahí que la organización y las características de estos vacíos condicionen el transporte y la disponibilidad del agua para, posteriormente, ser aprovechados por los nogales o alimentar los mantos acuíferos. La relación entre el manejo del huerto y la infiltración del agua se puede obtener mediante la abundancia relativa y distribución espacial del espacio poroso a partir de dos criterios morfológicos: tamaño y forma de los poros y sus variaciones en el perfil. Esto se puede hacer a través de técnicas de análisis de imágenes, procedimiento que cuenta ya con un importante desarrollo en el estudio de la porosidad de los suelos (Bouma *et al.*, 1979; Bullock y Thomasson, 1979; Stengel, 1979; German y Beven, 1981; Bruand, 1986; Curmi, 1988; Grimaldi y Boulet, 1990; Ringrose-Voase, 1996; Hallaire *et al.*, 1997; Beaudet, 1998).

El objetivo de este estudio fue describir los poros del suelo y sus variaciones en el perfil mediante el análisis de imagen, considerando dos criterios morfológicos; tamaño y forma de los poros, en huertas de nogal con manejo diferente en la Comarca Lagunera.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en 1999 en cuatro huertos de nogal pecanero de productores cooperantes: Tierra

Blanca, Chupón, Herradura y Florida, los cuales están situados en la Comarca Lagunera (103° O y 25° N) en los límites de los estados de Coahuila y Durango. La mayoría de las nogaleras están establecidas en suelos calcáreos aluviales profundos del Cuaternario a lo largo de los ríos Nazas y Aguanaval (Loyer y Moriaud, 1996). El Cuadro 1 presenta las prácticas de manejo más utilizadas en las huertas seleccionadas.

### Selección de las Capas del Suelo

La descripción edafológica de dos perfiles en cada huerta permitió seleccionar muestras de suelo a cuatro profundidades cada 10 cm sobre los primeros 40 cm de profundidad en las cuales se realizaron mediciones físicas, como: densidad aparente y conductividad hidráulica a saturación (infiltrómetro Guelph), y químicas, como: textura, pH, materia orgánica y carbonatos totales (Cuadro 2). Posteriormente, se obtuvieron muestras de suelo no alterado para caracterizar la porosidad mediante la metodología de Vergière (Bourrier, 1965). En laboratorio, las muestras se deshidrataron mediante el intercambio de agua por acetona y, a continuación, se impregnaron con una resina de poliéster (Scott-Bader Crystic) conteniendo un pigmento fluorescente (Uvitex) (Murphy *et al.*, 1977) a los rayos ultravioletas. Enseguida, se obtuvieron láminas delgadas de gran

formato (9 x 16 cm) para caracterizar la macro y mesoporosidad y láminas de formato pequeño (1.5 x 3 cm) para la microporosidad.

### Estructura del Suelo

La estructura se describió en el laboratorio con un estereoscopio y microscopio óptico sobre las láminas delgadas de gran formato a partir de la organización vertical y de tres principales macro-estructuras: poliédrica, laminar y masiva; el objetivo fue analizar la morfología estructural y delimitar las zonas de transición de un tipo de organización a otro.

### Análisis de Imagen

Para la obtención de imágenes sobre las láminas delgadas de gran formato, se realizó con la ayuda de una cámara de vídeo CCD donde se iluminó la superficie de éstas con luz ultravioleta, bajo una matriz rectangular de 76.8 x 57.6 mm, o sea 4423.68 mm<sup>2</sup>, y de 7.68 x 5.78 mm (44.39 mm<sup>2</sup>) que corresponde a la macro y meso porosidad visible a 100 y 10 µm, respectivamente. Para el formato pequeño, se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) bajo una matriz rectangular de 0.71 x 0.48 mm, o sea 0.34 mm<sup>2</sup>, que corresponde a los microporos visibles a 1 µm (Cuadro 3).

**Cuadro 1. Prácticas más utilizadas en las huertas de nogal pecanero de la Comarca Lagunera.**

Huerta	Labranza	Frecuencia por año	Incorporación de materia orgánica	Lámina de irrigación	Edad de la huerta	Superficie de la huerta
			t	m	años	ha
Tierra Blanca	discos	20	0	1.8	50	70
Chupón	discos	14	0	1.6	15	10
Herradura	discos	18	20	1.8	30	40
Florida	cero	0	0	1.6	30	20

**Cuadro 2. Características físicas y químicas del suelo de las huertas de nogal en la comarca Lagunera (González, 1998).**

Huerta	Textura	Materia orgánica		pH	Densidad aparente
		Superficie	a 40 cm		
		----- % -----			g cm <sup>-3</sup>
Tierra blanca	Franco-arenoso	1.2	0.2	8 a 8.3	1.6 a 1.2
Chupón	Franco	1	0.2	7.8 a 8.3	1.2 a 1.5
Herradura	Franco-arcilloso	3	0.6	7.9 a 8.1	1.2 a 1.6
Florida	Franco-arcilloso	2.5	0.9	8.3	1.3 a 1.4

**Cuadro 3. Escalas utilizadas para el análisis de imagen.**

Escala	Superficie a analizar m <sup>2</sup>	Resolución	Porosidad
M1	4423.68	100 µm pixel <sup>-1</sup>	Macro
M2	44.39	10 µm pixel <sup>-1</sup>	Meso
M3	0.34	1 µm pixel <sup>-1</sup>	Micro

El análisis de las imágenes se realizó con la ayuda de un analizador NOESIS VISILOG sobre una mesa de trabajo SUN en el laboratorio de Sciences du Sol, Rennes, Francia.

### Características de los Poros

La caracterización de los poros se realizó a partir de parámetros morfológicos: 1) tamaño, expresado por el área de su sección sobre la imagen descrita por la Ecuación 1 (Coster y Chermant, 1985) y que agrupa tres clases de tamaño T1 (pequeños), T2 (medianos), T3 (grandes) (Cuadro 4):

$$T = 4\pi \times \text{área} \quad (1)$$

y 2) forma, por un índice de alargamiento (Ia) que considera el aire y perímetro de la sección de cada poro en la imagen y que se describe con la Ecuación 2 (Coster y Chermant, 1985; Hallaire *et al.*, 1997) y que agrupa tres clases de formas: F1 (redondos: Ia < 5), F2 (alargados o fisuras Ia entre 5 y 10) y F3 (irregulares Ia > 10):

$$F = (\text{perímetro})^2 / 4\pi \times \text{área} \quad (2)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 5 presenta los resultados de la conductividad hidráulica a saturación (ksat) para las cuatro huertas. Los valores de ksat presentan una variación importante a 10 cm de profundidad (de 8 a 68 mm h<sup>-1</sup>), enseguida se reducen a 20 cm de profundidad (de 3 a 9 mm h<sup>-1</sup>), y se incrementan a

30 cm de profundidad (de 15 a 26 mm h<sup>-1</sup>). Con base en lo anterior, pueden distinguirse dos grupos: las huertas que presentan una conductividad hidráulica baja (Tierra Blanca y Chupón) y las huertas con una conductividad hidráulica elevada (Herradura y Florida).

Estas variaciones de la conductividad hidráulica conllevan a analizar la morfología estructural y a describir y caracterizar la porosidad del suelo por análisis de imagen, para relacionar, posteriormente, la conductividad hidráulica a saturación con las características de los poros, considerando el tipo de manejo del huerto (Intensivo para las huertas Tierra Blanca y Chupón, intensivo más incorporación de materia orgánica para la huerta Herradura y de conservación para la huerta Florida).

### Arreglos estructurales

El análisis de las láminas delgadas de gran formato permitió establecer la morfología estructural para las cuatro huertas (Figura 1). La huerta Tierra Blanca presenta una estructura masiva con pequeños canales aislados y agregados compactos. La huerta Chupón, mostrada en la misma figura, presenta una estructura poliédrica con un desarrollo incompleto de 10 a 30 cm de profundidad, después cambia a laminar a partir de 35 cm de profundidad; además, se observó actividad biológica mediante pequeños canales conectados de 20 a 30 cm de profundidad. Por su parte, huerta Herradura muestra una estructura cambiante de poliédrica completa (de 10 a 20 cm), pasa a laminar (de 20 a 30 cm) y después a poliédrica con un desarrollo incompleto (de 30 a 40 cm); resalta la orientación horizontal de las fisuras observadas de 20 a 30 cm de profundidad. La huerta Florida presenta una variación de la estructura de poliédrica completa (de 10 a 30 cm) y pasa a poliédrica incompleta (35 cm).

Lo anterior permite relacionar el manejo del huerto con la agregación del suelo. Así, para un manejo intensivo, la tendencia de la estructura es de

**Cuadro 4. Clases del tamaño de los poros.**

	Escala		
	M1	M2	M3
Clasificación por tamaño del poro	T7: < 2 mm <sup>2</sup> T8: 2 a 10 mm <sup>2</sup> T9: > 10 mm <sup>2</sup>	T4: < 0.02 mm <sup>2</sup> T5: 0.02 a 0.1 mm <sup>2</sup> T6: > 0.1 mm <sup>2</sup>	T1: < 0.0002 mm <sup>2</sup> T2: 0.0002 a 0.001 mm <sup>2</sup> T3: > 0.001 mm <sup>2</sup>

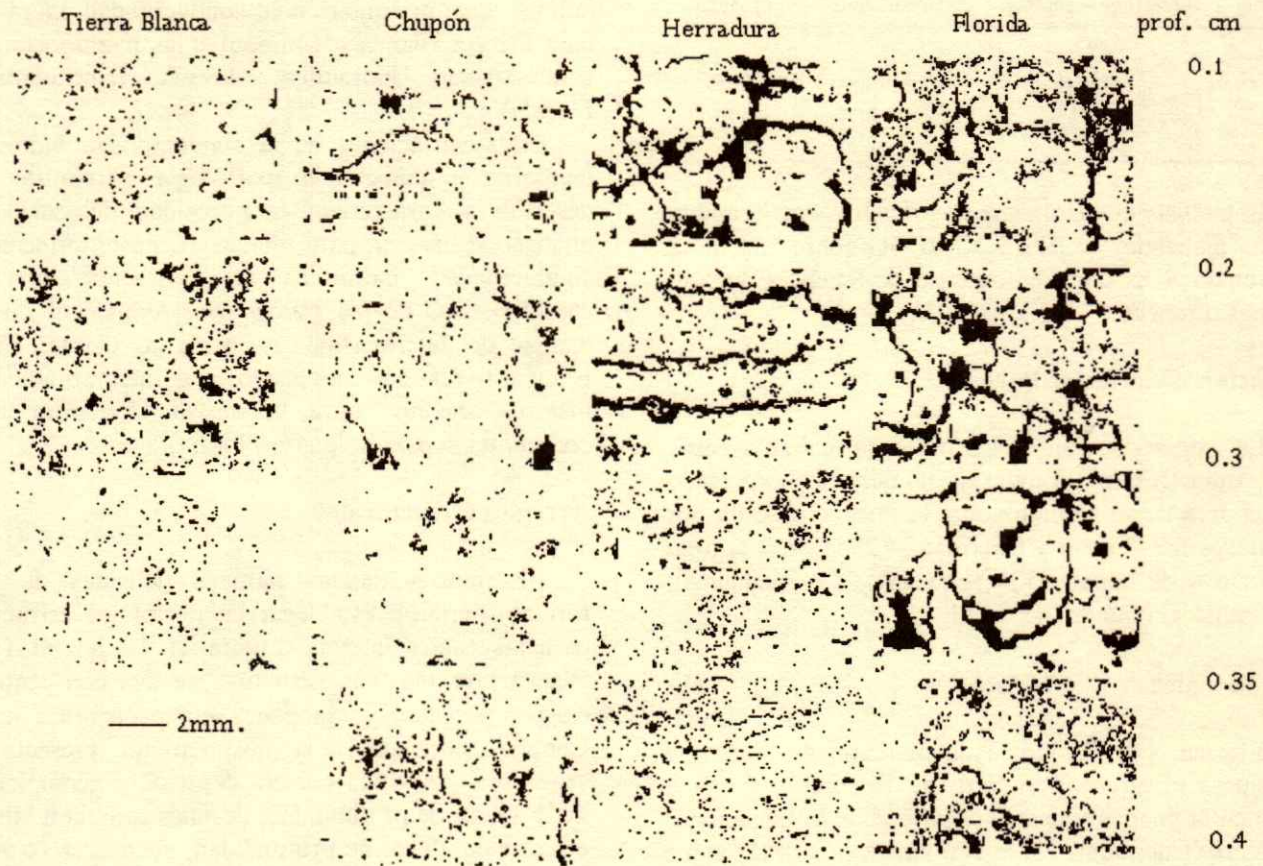


Figura 1. Morfología de las cuatro huertas de nogal pecanero.

poliédrica incompleta (Chupón, 15 años) a masiva (Tierra Blanca, 50 años) a diferencia de un manejo intensivo con incorporación de materia orgánica (Herradura) donde resalta la orientación horizontal de las fisuras producto de la labranza. La labranza de conservación (Florida, últimos 5 de 30 años) muestra una estructura poliédrica dominante en el perfil.

#### Distribución de la Porosidad

La descripción de los perfiles de porosidad para cada huerta se muestra en la Figura 2. La porosidad total se estableció a partir de valores de densidad aparente ( $\rho_d$ ), valores obtenidos mediante un cilindro de volumen conocido ( $18 \text{ cm}^3$ ) y que se expresan en la Ecuación 3 y de su partición en cuatro grupos a partir de los datos obtenidos por el analizador de imagen:

$$\rho_d = M_s / V \quad (3)$$

Para el cálculo de la porosidad total se utilizó la ecuación:

$$\eta = 1 - (\rho_d / \rho_r) \quad (4)$$

Donde:  $\eta$  es la porosidad total,  $\rho_d$  es la densidad aparente y  $\rho_r$  es la densidad real ( $2.65 \text{ g cm}^{-3}$ ), valor reportado en la literatura. Los poros visibles a la escala M1 (clase T7, T8, T9), los poros visibles a la

Cuadro 5. Conductividad hidráulica a saturación para las cuatro huertas.

Profundidad	Conductividad hidráulica			
	Tierra Blanca	Chupón	Herradura	Florida
cm	----- mm h <sup>-1</sup> -----			
0.1	8	11	68	18
0.2	4	3	6	9
0.3	23	20	26	15



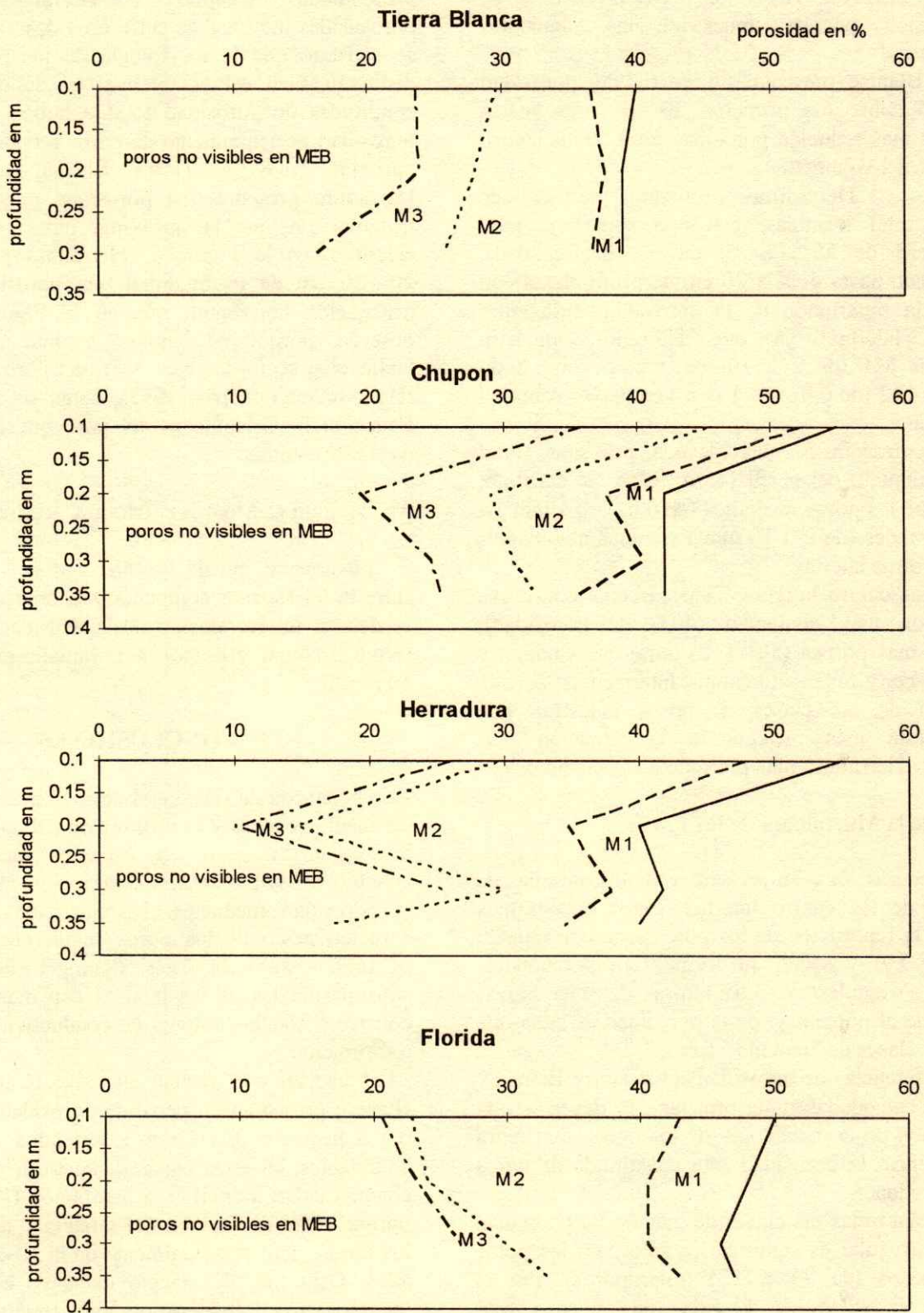


Figura 2. Variación de la porosidad en profundidad para cada huerto.

escala M2 (clase T4, T5, T6), los poros visibles a la escala M3 (T1, T2, T3) y los poros no visibles en MEB. Estos perfiles muestran las siguientes características:

a) Tierra Blanca presenta un perfil de porosidad homogéneo sobre los primeros 30 cm, esta huerta presenta la más reducida porosidad total de los cuatro sitios (40% del volumen).

b) Chupón y Herradura presentan perfiles de porosidad total idénticas, con una superficie muy porosa (más de 55% a 10 cm de profundidad), disminuyendo hasta 40% a 20 cm de profundidad; sin embargo, la repartición de la porosidad varía entre esas dos huertas, ya que Herradura muestra macroporos M1 (de 2 a 10 mm<sup>2</sup>) pero sobre todo mesoporos M2 (de 0.02 a 0.1 mm<sup>2</sup>) en mayor cantidad que Chupón.

c) Florida presenta la más elevada porosidad total sobre el conjunto del perfil (45 a 50%). Se constató, además, que los poros medianos (de 0.02 a 0.1 mm<sup>2</sup>) y los más grandes (de 2 a 10 mm<sup>2</sup>) son más abundantes que en las otras huertas.

De estas cuatro huertas, Tierra Blanca constituye la situación más compacta (40% de porosidad), Florida la más porosa (50%), en tanto que Chupón y Herradura constituyen situaciones intermedias; pero la repartición de las clases de poros muestran que Chupón está más próximo a la situación más compacta y Herradura más próximo a la más porosa.

### Análisis de la Morfología de los Poros

Las Figuras 3a y 3b presentan los histogramas de porosidad de las cuatro huertas. Estos histogramas presentan la repartición de los poros según su tamaño (de T1 a T9) y según su forma (poros redondos, fisuras e irregulares). La altura de las barras corresponde al porcentaje de la porosidad de cada una de esas 27 clases de "tamaño - forma".

Las diferencias de porosidad entre Tierra Blanca y Florida, mencionadas anteriormente, se deben a una modificación de la morfología de los poros. Así, para Tierra Blanca, la porosidad está constituida de poros de forma redonda.

Para casi todas las clases de tamaño, la porosidad de forma irregular es significativa sólo para los poros más pequeños (de T1 a T3) (microporos). Por el contrario, el suelo de Florida más poroso está principalmente constituido por poros irregulares, para las clases de tamaño mediano (de T4 a T6), siendo

estos poros abundantes entre 10 y 20 cm de profundidad. Chupón y Herradura presentan porosidades intermedias entre esos dos extremos, pero se constató que la morfología de los poros permite distinguir bien estas dos huertas, aunque presenten similitudes de porosidad total. Chupón presenta una porosidad principalmente de poros redondos, lo que la aproxima más a Tierra Blanca, mientras que Herradura presenta una porosidad mayoritariamente irregular, lo que la aproxima más a Florida. Sin embargo, en la Figura 2, Herradura presenta entre 20 y 30 cm de profundidad una porosidad con una orientación horizontal, que en la Figura 3b no se observa, porque se requiere estimar el ángulo de inclinación según los ejes X, Y del poro en la imagen (Hallaire y Cointepas, 1993), como se describe en la Ecuación 5. Orientación del poro que no se calculó para este estudio.

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg (2.Mom XY / Mom X^2 - Mom Y^2) \quad (5)$$

Finalmente, puede establecerse que la diferencia entre la huerta más compacta y la huerta más porosa, se debe a un incremento de la densidad de poros de forma irregular y de poros de tamaño grande (de 2 a 10 mm<sup>2</sup>).

### CONCLUSIONES

- La búsqueda de relaciones entre el manejo del huerto de nogal pecanero y la infiltración del agua a partir de la caracterización de los espacios vacíos del suelo condujo a establecer una descripción morfológica de la porosidad mediante el análisis de imagen. Esta caracterización de los poros según tamaño y forma permitió establecer una tipología de las capas subsuperficiales de las huertas con manejo diferente, coherente con los valores de conductividad hidráulica a saturación.

- Las huertas con manejo intensivo (Chupón y Tierra Blanca) presentan un perfil de porosidad reducido con poros pequeños (0.02 mm<sup>2</sup>), redondos y, en general, abundantes; en estas capas de suelo, los valores de la conductividad hidráulica a saturación ( $K_{sat}$ ) son bajos porque están en función del tamaño y de la forma de los poros, pero principalmente de la no-conexión entre ellos. Otro tipo de manejo intensivo es mediante la incorporación de materia orgánica (huerta Herradura). Esta huerta muestra diferencias de porosidad muy contrastantes, es decir, en la superficie el suelo es muy

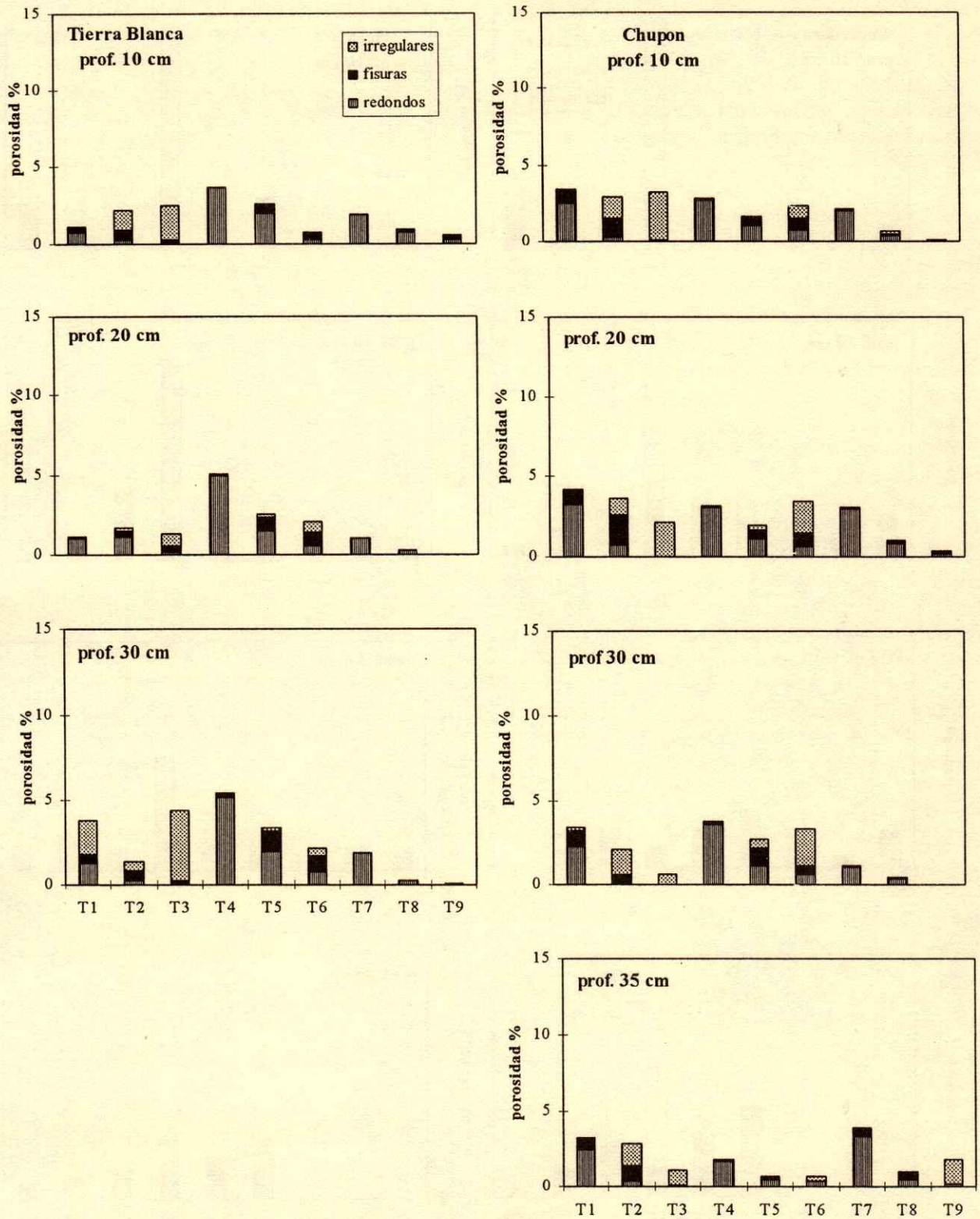


Figura 3a. Histogramas de clases de poros para las huertas Tierra Blanca y Chupón.

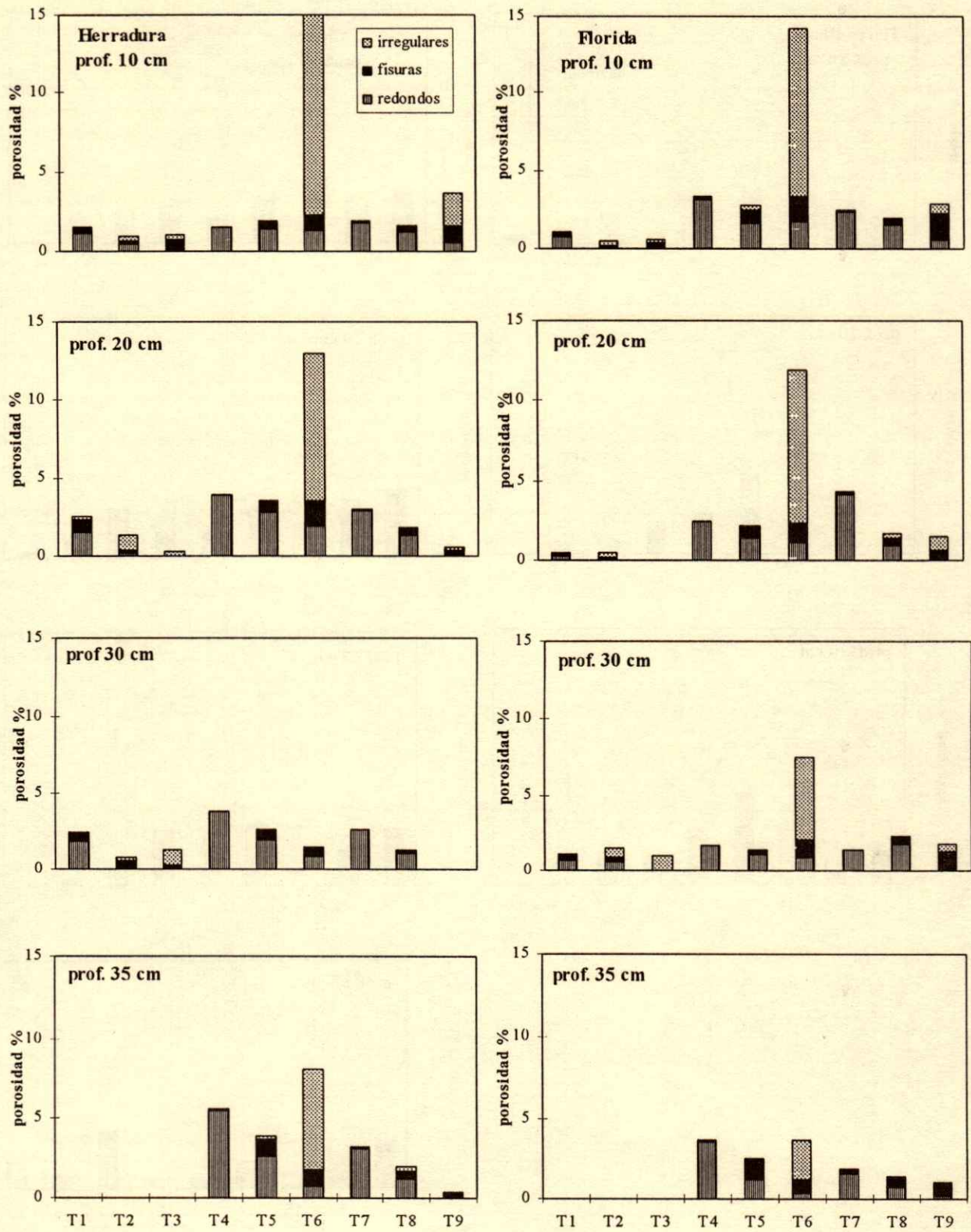


Figura 3b. Histogramas de clases de poros para las huertas Herradura y Florida.

poroso (más de 55%) constituido de poros medianos (de 0.02 a 0.1 mm<sup>2</sup>) a grandes (de 2 a 10 mm<sup>2</sup>) e irregulares con valores de  $K_{sat}$  elevados (68 mm h<sup>-1</sup>), efecto debido al almacenamiento orgánico (3%), pero esta porosidad disminuye hasta 40% a 20 cm de profundidad donde los poros son de forma de fisura con una particularidad en la orientación horizontal. Esta disminución y orientación de la porosidad muestra el impacto negativo de la labranza sobre la morfología de los poros y la permeabilidad (6 mm h<sup>-1</sup>).

- En huertas con labranza de conservación (Florida), se puede recuperar la estructura del suelo y sostener la tasa de materia orgánica a valores importantes (2.5%), lo que genera poros de tamaño medianos (de 0.02 a 0.1 mm<sup>2</sup>) a grandes (de 2 a 10 mm<sup>2</sup>), con una distribución homogénea en el perfil, como lo manifiestan los valores de  $k_{sat}$ ; en estos horizontes, el movimiento del agua depende principalmente del tipo de tamaño y forma de los poros (alargada e irregular) y a la continuidad que existe entre ellos.

- La comparación de los valores de la densidad aparente no permite relacionar las diferencias encontradas entre las huertas de manejo intensivo y de conservación, por el contrario, el tamaño y la forma de la porosidad permiten describir el movimiento del agua para estas huertas.

### LITERATURA CITADA

- Beaudet, L. 1998. Organisation et fonctionnement hydrodynamique de mélanges limon argileux - tourbe blond. Essais mécaniques sous chargements répétés. Thèse doctoral. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes. Rennes, France.
- Bouma, J., A. Jongerius y D. Schoonderbeek. 1979. Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay using micromorphometric data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 261-264.
- Bourrier, J. 1965. Bulletin technique du Génie rural 73. La mesure des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode Vergière. Cahier ORSTOM. Montpellier, France.
- Braud, A. 1986. Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. *Sci. Sol* 24: 351-362.
- Bullock, P. y A.J. Thomasson. 1979. Rothamsted studies of soil structure. II Measurement and characterisation of macroporosity by image analysis and comparison with data from water retention measurements. *J. Soil Sci.* 30: 391-413.
- Coster, M. y J.L. Chermant. 1985. Précis d'analyse d'image. Centre National de Recherche Scientifique. Paris, France.
- Curmi, P. 1988. Structure, espace poral du sol et fonctionnement hydrique. Analyse de quelques cas concrets. *Sci. Sol* 26: 203-214.
- Estrada A., J. 1999. Importance fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord Mexique. Thèse doctoral. Université de Montpellier II. Montpellier, France.
- German, P. y K. Beven. 1981. Water flow in soil macropores. I. An experimental infiltration. *J. Soil Sci.* 32: 1-13.
- González C., G. 1998. Influences des pratiques culturales sur la structure des couches supérieures de quatre vergers de noyer pecan (*Karya illinoensis*, Koch) irrigués de la Comarca Lagunera (Mexique). Thèse Diplôme d'Etude Approfondi (DEA). National de Science du Sol. Rennes, France.
- Grimaldi, M. y R. Boulet. 1990. Relation entre l'espace et le fonctionnement hydrodynamique d'une couverture pédologique sur socle de Guyane française. *Cah. ORSTOM, sér. Pédologie XXV-3*: 275-263.
- Hallaire, V. y J.P. Cointepas. 1993. Caractérisation de la macroporosité d'un sol de verger par analyse d'image. *Etude et Gestions des Sols* 13: 155-164.
- Hallaire, V., P. Curmi y Widiatmaka. 1997. Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé. Cas des horizons d'un système pédologique armoricain. *Etude et Gestions des Sols* 4: 115-126.
- Loyer, J.Y. y S. Moriaud. 1996. Topología de las unidades de paisaje en la Región Hidrológica 36. Uso y manejo del Agua en las Cuencas Hidrográficas del Norte de México. Proyecto CENID RASPA y ORSTOM. Folleto Científico 6. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-ORSTOM. Gómez Palacio, Durango, México.
- Murphy, C.P., P. Bullock y R.H. Turner. 1977. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. *J. Soil Sci.* 28: 498-518.
- Ringrose-Voase, A.J. 1996. Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant Soil* 183: 27-47.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1999. Anuario estadístico de la producción agrícola. México, D.F.
- Stengel, P. 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol *in situ*. *Ann. Agron.* 30: 27-51.

# EVOLUCIÓN DE LAS FRACCIONES HÚMICAS DE SUELOS EN LA ZONA CHINAMPERA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Evolution of Humic Fractions from Soils in the Chinampa Zone from Mexico City

Amada Laura Reyes-Ortigoza<sup>1†</sup> y Norma Eugenia García-Calderón<sup>1</sup>

## RESUMEN

En las fracciones húmicas de tres suelos de chinampa, dos no salinos y uno salino sódico (conductividad eléctrica 23 dS m<sup>-1</sup>), se evaluaron la distribución de carbono y el contenido total de metales pesados con la finalidad de conocer el grado de polimerización y evolución del humus para promover estrategias de conservación y recuperación de la zona. Con base en profundidad, color, características edáficas y medio circundante dentro del perfil, se estudiaron tres horizontes: el superficial (A<sub>ht</sub>), el álbico (A<sub>ab</sub>) y el profundo (A<sub>tr</sub> o H<sub>tr</sub>). Los porcentajes de carbono en las sustancias húmicas [ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas (H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>)], los contenidos totales de metales pesados (Al, Co, Fe, Cr, Cd, Ni, Zn, Cu), los análisis electroforéticos en AH y la salinidad de cada uno de los suelos definieron que la evolución del humus depende más de las características antrópicas (manejo agrícola y adición de materiales orgánicos) y edáficas (contenido de carbono, metales totales y arcilla) que de las condiciones ambientales (nivel freático-humedad) y contenido de sales. La evolución del humus, expresada en la relación: Horizonte superficial (A<sub>ht</sub>) ≥ horizonte profundo (H<sub>tr</sub> o A<sub>tr</sub>) > horizonte álbico (A<sub>ab</sub>) se relacionó con la profundidad y con las características edáficas de cada horizonte del perfil.

**Palabras clave:** *Substancias húmicas, metales pesados.*

## SUMMARY

In the humic fractions of three soils, two non-saline and one sodic-saline (electrical conductivity 23 dS m<sup>-1</sup>), the distribution of carbon and the total

content of heavy metals were evaluated to determine the degree of polymerization and evolution of the humus with the aim of promoting conservation strategies and recovery of the area. Based on depth, color, edaphic characteristics, environmental conditions, and surrounding area, in the soil profile, three horizons were studied: top soil (A<sub>ht</sub>), albic (A<sub>ab</sub>), and deep (A<sub>tr</sub> or H<sub>tr</sub>). Percentage of carbon in the humic substances [humic acids (AH), fulvic acids (AF) and humines (H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>)], total content of heavy metals (Al, Co, Fe, Cr, Cd, Ni, Zn, Cu), electrophoresis analysis in AH and salinity of each one of the soils defined that the evolution of humus depends more on anthropic (agricultural manage and addition of organic materials) and edaphic characteristics (content of carbon, total metals, and clay) than on environmental conditions (groundwater level-humidity) and content of salts. The evolution of humus, expressed in the relationship: superficial horizon (A<sub>ht</sub>) ≥ deep horizon (H<sub>tr</sub> or A<sub>tr</sub>) > albic horizon (A<sub>ab</sub>) was related with depth and edaphic characteristics of each horizon of the profile.

**Index words:** *Humic substances, heavy metals.*

## INTRODUCCIÓN

Las chinampas fueron construidas en la época prehispánica entre los años 900 y 902 AC por los indígenas nahuatlacas (Xochimilcas, Chalcas y Tlahuicas), formaban islotes artificiales por amontonamiento de tiras de plantas acuáticas de entre 5 y 10 m de ancho y hasta 100 m de largo, que cubrían con lodo extraído del fondo del lago y las anclaban con estacas de ahuejote (*Salix bonplandiana*), después agregaban constantemente abonos orgánicos (Código Ramírez, 1944; West y Armillas, 1950; Coe, 1964; Rojas, 1984).

Las características de construcción y de manejo ubican a los suelos de chinampa dentro de la unidad taxonómica de los Antrosoles. Éstos son suelos modificados por actividades humanas, con horizontes originales irreconocibles o enterrados debido a remoción, disturbio, cortes, rellenos y adición de

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510 México, D.F.

<sup>†</sup> Autor responsable (alro@hp.ciencias.unam.mx)

materiales orgánicos o riego (FAO-UNESCO-ISRIC, 1988; ISSS-ISRIC-FAO, 1998).

La zona de chinampas está ubicada al SE de la ciudad de México, D.F. En la actualidad, las áreas Xochimilco-Tláhuac se consideran como relicto ecológico del México Prehispánico y patrimonio cultural de la humanidad por la FAO-UNESCO (Reza, 1990; Vera, 1991; Ramos-Bello *et al.*, 2001).

Los suelos chinamperos están perturbados por la proximidad del área urbana y el manejo irracional a que se someten, debido al riego con aguas contaminadas y residuales y la aplicación excesiva de abonos orgánicos (estiércol y composta) con manejo deficiente (Flores, 1990; López y Reyes, 1990). Estos materiales, junto con desechos, como arena, grava, cieno, sales minerales, partículas de alimentos y basura, dificultan el proceso de mineralización de los materiales orgánicos y promueven su acumulación, ya que el tamaño de partícula y las grasas limitan la transformación; esto disminuye el número y la producción de las cosechas y ha generado contaminación con sodio, sales y metales pesados deteriorando, además de la productividad, el valor recreativo en la zona (Reza, 1990; Reyes *et al.*, 1997, 1997; Ramos-Bello *et al.*, 2001).

La humificación de materiales orgánicos en las chinampas debe estudiarse, ya que la continua agregación de estiércoles y la variabilidad en el grado de salinidad modifican constantemente la dinámica bioquímica. Caracterizar el tipo de humus conduce a manejar adecuadamente las adiciones periódicas de estiércol y la dinámica de la materia orgánica, así como aprovechar al máximo las condiciones físicas y químicas que confiere el material orgánico a los suelos chinamperos.

El objetivo del trabajo fue evaluar la distribución de carbono y el contenido total de metales pesados en las fracciones húmicas de los horizontes superficial ( $A_{ht}$ ), álbico ( $A_{ab}$ ) y profundo ( $A_{tr}$  ó  $H_{tr}$ ), de suelos chinamperos salinos y no salinos con la finalidad de conocer el grado de polimerización y evolución del humus para promover estrategias de conservación y recuperación de la zona.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de Estudio

Los suelos son de origen volcánico en las partes altas y aluvial lacustre en las bajas (Lot y Quiroz, 1979).

La distribución de suelos de chinampas con características semejantes (horizontes, manejo antrópico con aplicación anual de estiércol bovino en dosis de 20 a 30 t ha<sup>-1</sup>), así como la salinidad y el pH diferentes definieron que se trabajara en tres áreas chinamperas: San Gregorio Atlapulco (19°13'43" N y 99°00'00" O), San Luis Tlaxialtemalco (19°15'00" N y 99°01'30" O) y Tláhuac (19°16'06" N y 99°00'16" O) (Figura 1).

El clima en la zona es Cb(W<sub>1</sub>)(W)(i') templado húmedo con lluvias en verano, precipitación media anual de 600 a 800 mm y temperatura media anual entre 15.1 °C y 18.9 °C, con temperaturas máximas entre 29.8 °C y 31.7 °C y mínimas entre -2.2 °C y -5.5 °C, heladas en los meses de noviembre hasta febrero (García, 1988).

La vegetación en el área de estudio consta principalmente de ahuejotes (*Salix bonplandiana* y *Salix humboldtiana*) y en el lago predominan las plantas acuáticas como las ninfáceas y lemnáceas; se cultiva maíz, hortalizas (coiflor, rábano, espinaca, betabel, acelga, calabaza, huazontle, cilantro, romeritos, apio) y flores (pincel, cempoaxochitl, rosa, crisantemo, clavel, petunia).

### Muestreo

En tres suelos, dos no salinos y uno salino-sódico, se determinaron pH en agua destilada y solución salina (KCl 1M pH 7) con relación 1:5, salinidad a través de la conductividad eléctrica en el extracto de la pasta de saturación, pH del extracto de la solución del suelo, calcio y magnesio solubles e intercambiables por el método volumétrico y su valoración con versenato (EDTA 0.02 N) (Cheng y Bray, 1951), sodio y potasio solubles e intercambiables por flamometría (Jackson, 1982), cloruros por el método de Mohr (Jackson, 1982), sulfatos por gravimetría (Bower y Huss, 1948), carbonatos y bicarbonatos por el método volumétrico (Jackson, 1982), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y relación de capacidad de intercambio total de sodio (RAS) (Richards *et al.*, 1985). Esta caracterización (Cuadro 1) definió a los suelos de San Gregorio Atlapulco y San Luis Tlaxialtemalco como no salinos y al suelo de Tláhuac como salino sódico. En los horizontes, se evaluó el contenido

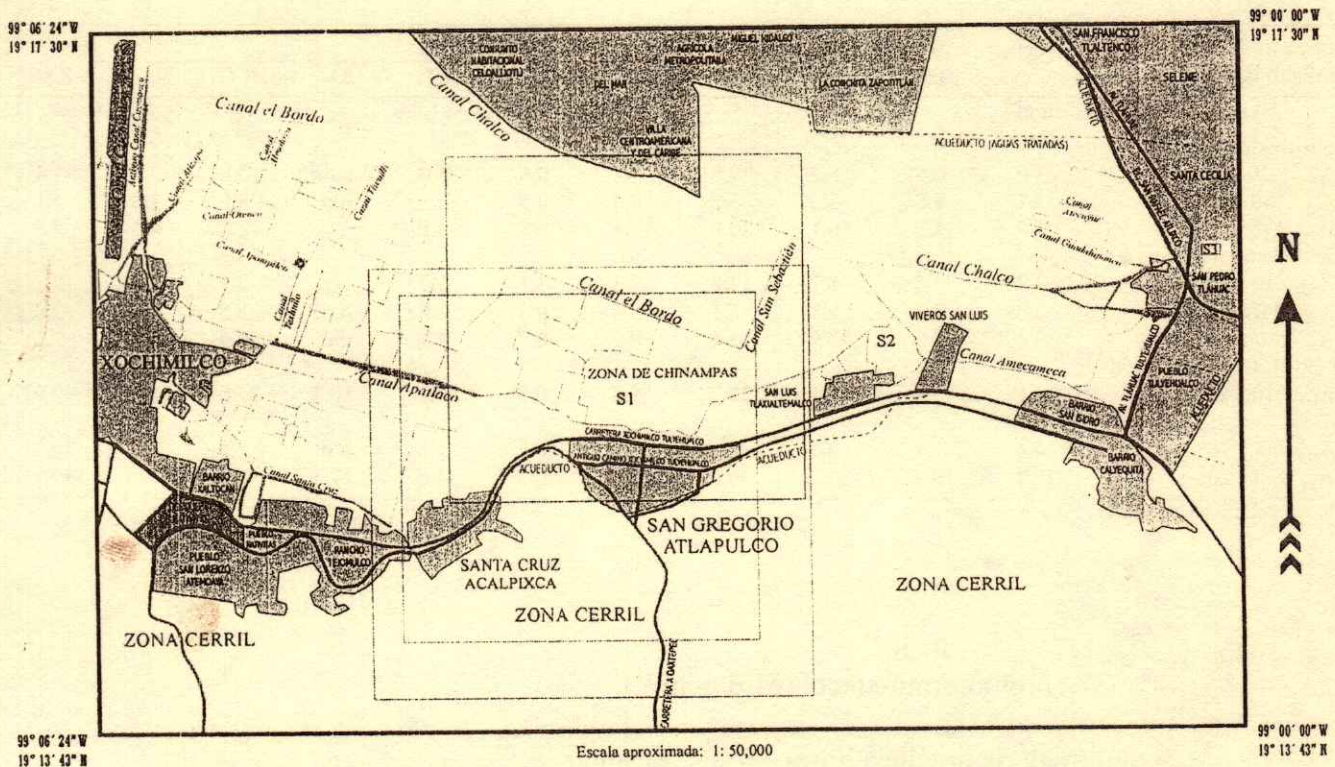


Figura 1. Localización de los suelos estudiados (S1 = Suelo no salino ácido, S2 = Suelo no salino neutro, S3 = Suelo salino-sódico).

total de silicio por espectroscopia de fluorescencia de rayos X (ISRIC-FAO, 2002) (Cuadro 2).

### Extracción de Fracciones Húmicas

Con base en el contenido de materia orgánica del suelo (Cuadro 2), determinado por el método de Walkley y Black (1934), las fracciones húmicas se extrajeron de 25 ó 50 g de suelo según el esquema de proceso presentado en la Figura 2.

### Electroforesis y Metales Totales en la Fracción de Ácidos Húmicos

El análisis de electroforesis consistió en aplicar 5  $\mu$ L de AH a tiras de papel Whatman No. 1 y correr la muestra a una intensidad de 200 V durante 30 min en una cubeta "Desaga". La gráfica se hizo a través de un densitómetro Gelman DCD 16 y la medición del área porcentual con planímetro; esta última permitió calcular las fracciones móviles (poco polimerizadas) e inmóviles (muy polimerizadas) (Dorado *et al.*, 1972).

En los AH, se cuantificó el contenido de metales totales (Al, Co, Fe, Cr, Cd, Ni, Zn y Cu) con un

aparato de emisión de plasma Perkin Elmer, modelo 2000, por la técnica de Alloway (1990).

### Evolución de las Fracciones Húmicas

El contenido de carbono orgánico se determinó con tres réplicas por muestra en 0.5 g de suelo sin fraccionar ("carbono total"), en las muestras secas de  $H_2$  y en las diversas fracciones húmicas en alícuotas (10 a 50 mL) para los extractos de AH, AF y  $H_1$  por el método de Walkley y Black (1934). En las fracciones de mol y  $H_3$  se registró el peso seco y se multiplicó por los factores utilizados en el análisis de fraccionamiento de humus, correspondientes a 0.2831 y 0.309, respectivamente (Almendros y González-Vila, 1987).

Se calcularon las relaciones carbono orgánico/carbono total [ $\%C_{ot} = \%C$  de cada fracción  $\%C$  total (100)] y carbono orgánico/carbono de la fracción humificada [ $\%C_{oh} = \%C$  de cada fracción  $\%C$  moh (100)].

La evolución del humus se clasificó con el contenido de carbono orgánico encontrado en cada fracción, con las sumas de porcentajes de carbono de



Cuadro 1. Características de salinidad de los suelos.

Horizonte Profundidad cm	CE <sup>†</sup> dS m <sup>-1</sup>	pH pasta	Iones solubles								
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	RAS (mol L <sup>-1</sup> ) <sup>‡</sup>
Suelo ácido no salino											
A <sub>ht</sub> , 10 a 20	3.6	6.4	6.2	9.8	9.7	0.6	5.0	n.d. <sup>‡</sup>	10.0	5.3	3.4
A <sub>ab</sub> , 140 a 42	3.1	4.8	3.2	5.2	8.4	0.5	3.1	n.d.	8.6	3.6	4.1
H <sub>tr</sub> , 190 a 200	3.9	4.5	16.1	20.9	11.4	0.9	5.5	n.d.	12.5	4.5	2.6
Suelo neutro no salino											
A <sub>ht</sub> , 10 a 20	2.7	7.6	8.7	12.8	7.3	1.1	3.7	n.d.	7.5	4.0	2.2
A <sub>ab</sub> , 80 a 90	2.0	7.2	2.1	6.1	5.4	0.5	2.8	n.d.	5.5	2.9	2.6
A <sub>tr</sub> , 180 a 190	3.4	7.6	10.9	13.1	9.2	0.7	4.7	n.d.	9.4	5.0	2.6
Suelo alcalino salino-sódico											
A <sub>ht</sub> , 10 a 20	14.5	9.8	19.5	22.7	59.1	0.8	27.1	10.7	25.0	45.87	12.9
A <sub>ab</sub> , 86 a 96	4.6	7.2	3.5	5.12	22.5	0.2	8.6	n.d.	7.9	10.7	10.9
A <sub>tr</sub> , 190 a 200	23.2	10.4	27.2	30.6	102.9	0.5	44.6	17.1	40.0	73.4	19.2

† CE = conductividad eléctrica; ‡ n.d. = no detectado.

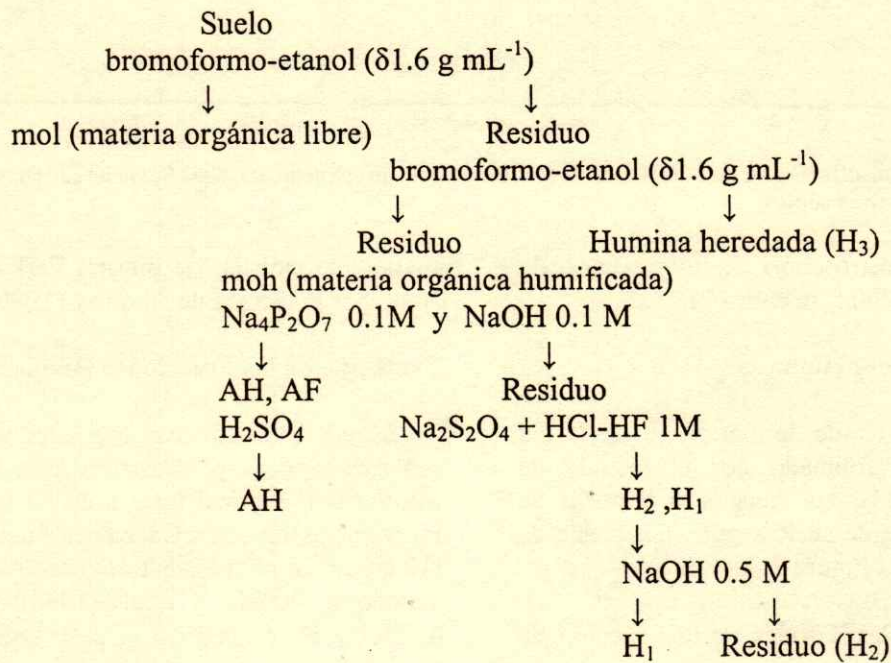


Figura 2. Proceso de extracción de humus.

las fracciones AH+H<sub>1</sub>+H<sub>2</sub> y AF+H<sub>3</sub>, con los porcentajes de área de los análisis electroforéticos y con los cálculos del índice de las fracciones inmóvil/móvil (I/M) realizados en AH.

Almendros (1980) y Kononova (1982) sugirieron que los mayores valores de carbono de la fracción AH+H<sub>1</sub>+H<sub>2</sub>, en área electroforética inmóvil e índice

I/M indican mayor polimerización y estabilidad del humus y menor degradación del material orgánico.

El contenido de metales, los porcentajes de carbono (%C), de mol, moh, AH, AF, el índice AH/AF, las sumas de AF+H<sub>3</sub> y AH+H<sub>1</sub>+H<sub>2</sub> y los valores de las fracciones inmóviles, móviles y el índice I/M se evaluaron por triplicado y se sometieron

Cuadro 2. Características edáficas de los suelos.

Horizonte Profundidad	Arena	Limo	Arcilla	Iones intercambiables								
				SiO	MO <sup>†</sup>	pH KCl 1:5	pH H <sub>2</sub> O 1:5	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	PSI
cm	%			cmol(+)/kg <sup>-1</sup>								%
Suelo ácido no salino												
A <sub>ht</sub> , 10 a 20	23.8	38.3	37.8	23	14.9	5.8	6.1	15.0	30.0	0.3	4.4	8.2
A <sub>ab</sub> , 140 a 42	32.5	47.7	19.8	60	9.4	4.4	4.7	7.0	14.0	0.2	3.2	8.5
H <sub>tr</sub> , 190 a 200	21.9	47.2	30.8	35	31.0	4.1	4.3	23.0	28.0	0.4	8.3	13.4
Suelo neutro no salino												
A <sub>ht</sub> , 10 a 20	30.7	47.3	21.9	18	11.5	7.1	7.3	18.7	26.1	0.7	3.1	6.3
A <sub>ab</sub> , 80 a 90	32.7	43.4	23.8	75	2.7	6.8	7.0	10.1	16.3	0.3	2.7	8.6
A <sub>tr</sub> , 180 a 190	34.6	40.3	25.1	42	6.7	6.7	7.4	12.1	17.2	0.5	4.9	12.7
Suelo alcalino salino-sódico												
A <sub>ht</sub> , 10 a 20	18.8	54.1	27.2	21	11.5	8.6	9.3	15.0	19.0	0.7	14.9	30.4
A <sub>ab</sub> , 86 a 96	31.7	41.3	26.9	80	4.6	7.8	8.3	8.7	10.4	0.2	7.2	25.3
A <sub>tr</sub> , 190 a 200	41.1	36.0	22.9	39	11.3	8.8	10.0	16.0	19.2	0.4	23.2	38.8

<sup>†</sup> MO = materia orgánica.

a análisis de varianza; cuando resultó significativa, se realizó el análisis de comparaciones múltiples de medias con la prueba de Tukey,  $P < 0.05$ . Con el contenido de metales se estableció una correlación de Pearson.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Porcentaje de Carbono en las Fracciones Húmicas

Los Cuadros 3, 4 y 5 presentan los porcentajes de carbono de las fracciones húmicas de los suelos no salinos y salino-sódicos. El contenido de carbono de todas las fracciones analizadas mostró diferencia significativa entre horizontes debido al manejo antrópico y a su ubicación dentro del perfil del suelo. En el horizonte A<sub>ht</sub> superficial es más favorable la mineralización por los procesos de laboreo, así como

por la incorporación de abonos orgánicos, la actividad microbiana y la aireación. En el horizonte álbico A<sub>ab</sub>, el clima con ciclos de sequía (marzo-junio)-inundación (julio-septiembre) a lo largo del tiempo de su formación, que debe ser menor que el de la existencia de las chinampas, promovió la fluctuación del nivel del agua del lago, la acumulación de diatomeas y formación de biominerales tipo ópalo a profundidades variables del perfil. La presencia de diatomeas, junto con la pobreza en contenido de carbono, el hidromorfismo y la anaerobiosis, aceleró la mineralización y atenuó la humificación. En el horizonte profundo (A<sub>tr</sub> o H<sub>tr</sub>), la cercanía del manto freático promovió inundaciones en el suelo, anaerobiosis, actividad microbiana disminuida y, en el suelo de Tláhuac, problemas de contaminación sódico-salina que alteraron los procesos de humificación-mineralización.

Cuadro 3. Porcentajes de carbono de las fracciones del humus del suelo ácido no salino.

Horizonte Profundidad	Carbono total	N	mol <sup>†</sup>	moh <sup>‡</sup>	C <sub>p</sub> <sup>§</sup>	H <sub>3</sub>	AF	AH	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	AH/AF	H <sub>3</sub> +AF	AH+H <sub>1</sub> +H <sub>2</sub>
cm	%												
A <sub>ht</sub> 10-20	8.6 a	0.8 a	0.1 a	7.1 a	A	0.2 a	1.6 a	1.3 a	0.9 a	3.1 a	0.8 a		
			1.2	82.5	C	2.3	18.6	15.1	10.5	36.0			
					D	2.8	22.5	18.3	12.7	43.7			
A <sub>ab</sub> 140-142	5.5 b	0.5 b	0.2 b	1.8 b	A	0.2 a	0.6 b	0.5 b	0.01 b	0.5 b	0.8 a	25.3 a	74.7 a
			3.6	32.7	C	3.6	10.9	9.1	0.2	9.1			
					D	11.1	33.3	27.7	0.5	27.7			
H <sub>tr</sub> 190-200	31 c	2.1 c	0.5 c	28.2 c	A	0.3 b	9.4 c	14.3 c	0.9 a	3.3 c	1.5 b	44.4 b	55.9 b
			1.6	90.9	C	1.0	30.3	46.1	2.9	10.6			
					D	1.1	33.3	50.7	3.2	11.7			
											34.4 c	65.6 c	

<sup>†</sup> mol = materia orgánica libre; <sup>‡</sup> moh = materia orgánica humificada; <sup>§</sup> C<sub>p</sub> = cálculos proporcionales de carbono, A = porcentaje de carbono con respecto al peso, C = carbono orgánico con respecto al carbono total, D = carbono orgánico con respecto al carbono de la fracción humificada. Valores con distinta letra en una sola columna difieren significativamente, Tukey ( $P < 0.05$ ).

Cuadro 4. Porcentajes de carbono de las fracciones del humus del suelo neutro no salino.

Horizonte Profundidad	Carbono total	N	mol <sup>†</sup>	moh <sup>†</sup>	C <sub>p</sub> <sup>‡</sup>	H <sub>3</sub>	AF	AH	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	AH/AF	H <sub>3</sub> +AF	AH+H <sub>1</sub> +H <sub>2</sub>
cm	%												
A <sub>ht</sub> 10-20	6.7 a	0.7 a	0.7 a	5.9 a	A	0.3 a	1.9 a	1.6 a	1.1 a	1.0 a	0.8 a		
			10.4	88.0	C	4.5	28.3	23.9	16.4	14.9			
			D	5.0	32.2	27.1	18.6	16.9					
A <sub>ab</sub> 80-90	1.6 b	0.4 b	0.4 b	1.0 b	A	0.3 a	0.4 b	0.2 b	0.03 b	0.1 b	0.5 b	37.2 a	62.6 a
			25.0	62.5	C	18.7	25.0	12.5	1.9	6.2			
			D	30.0	40.0	20.0	3.0	10.0					
A <sub>tr</sub> 180-190	3.9 c	0.6 c	0.5 c	3.4 c	A	0.4 b	0.9 c	1.0 c	0.5 c	0.6 c	1.1 c	70.0 b	33.0 b
			12.8	87.1	C	10.2	23.1	25.6	12.8	15.4			
			D	11.8	26.5	29.4	14.7	17.6					
												38.3 c	61.7 c

<sup>†</sup> mol= materia orgánica libre; <sup>†</sup> moh= materia orgánica humificada; <sup>‡</sup> C<sub>p</sub> = cálculos proporcionales de carbono, A = porcentaje de carbono con respecto al peso, C = carbono orgánico con respecto al carbono total, D = carbono orgánico con respecto al carbono de la fracción humificada. Valores con distinta letra en una sola columna difieren significativamente, Tukey (P < 0.05).

Los horizontes álbicos tuvieron mayores porcentajes de carbono en materiales húmicos poco evolucionados (AF+H<sub>3</sub>), mientras que en horizontes profundos y superficiales A<sub>ht</sub>, A<sub>tr</sub> y H<sub>tr</sub> predominaron las fracciones más polimerizadas (AH+H<sub>1</sub>+H<sub>2</sub>).

La moh se acumuló más en los horizontes superficiales (A<sub>ht</sub>), debido a que durante los ciclos de cultivo se adicionaron estiércoles con compuestos fenólicos que actuaron como precursores de sustancias húmicas, como: ligninas, catecol, resorcinol, vanillina, hidroxibenzaldehído y fenilpropanos (Given y Dickinson, 1975).

Todos los horizontes siempre presentaron porcentajes de carbono de mol menores que los de moh, debido a que no existió un aporte natural de hojarasca. Los horizontes profundos mostraron diferencias estadísticas con respecto a los restantes horizontes (A<sub>ht</sub>, A<sub>ab</sub> y A<sub>tr</sub>) al retener más carbono en la fracción de mol; esto indicó menor evolución del

humus atribuida en los horizontes A<sub>tr</sub> y H<sub>tr</sub> a las condiciones anaeróbicas promovidas por el manto freático cercano y, en el suelo salino sódico, además a la salinidad.

El mayor contenido de carbono en AH de horizontes superficiales A<sub>ht</sub> coincidió con la abundancia de grupos funcionales cetona y carboxilo, reportados por Reyes (1997) en espectros de infrarrojo; dichos grupos inducen la formación de cadenas orgánicas complejas que polimerizan y forman parte de las sustancias húmicas. Es probable también que el porcentaje de la fracción arcilla (Cuadro 2) influyera en la polimerización de ácidos húmicos, como lo señaló Tate (1992).

Todos los horizontes superficiales A<sub>ht</sub> y profundos A<sub>tr</sub> o H<sub>tr</sub> tuvieron porcentajes altos de carbono en AF. Sus diferencias fueron significativas (P < 0.05) con respecto a los horizontes álbicos (A<sub>ab</sub>).

Cuadro 5. Porcentaje de carbono de las fracciones del humus del suelo salino-sódico.

Horizonte Profundidad	Carbono total	N	mol <sup>†</sup>	moh <sup>†</sup>	C <sub>p</sub> <sup>‡</sup>	H <sub>3</sub>	AF	AH	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	AH/AF	H <sub>3</sub> +AF	AH+H <sub>1</sub> +H <sub>2</sub>
cm	%												
A <sub>ht</sub> 10-20	6.7 a	0.6 a	0.2 a	6.4 a	A	0.2 a	1.5 a	1.4 a	0.8 a	2.5 a	0.9 a		
			3.0	95.5	C	3.0	22.4	20.9	11.9	37.3			
			D	3.1	23.4	21.9	12.5	39.1					
A <sub>ab</sub> 86-96	2.7 b	0.3 b	0.3 b	2.3 b	A	0.4 b	0.6 b	0.6 b	0.1 b	0.6 b	1.0 b	26.5 a	73.5 a
			11.1	85.1	C	14.8	22.2	22.2	3.7	22.2			
			D	17.4	26.1	26.1	4.3	26.1					
A <sub>tr</sub> 190-200	6.6 c	0.6 a	0.5 c	5.4 c	A	0.3 c	1.3 c	1.3 c	0.6 c	1.9 c	1.0 b	43.5 b	56.5 b
			7.6	81.8	C	4.5	19.7	19.7	9.1	28.8			
			D	5.5	24.1	24.1	11.1	35.2					
												29.6 c	70.4 c

<sup>†</sup> mol= materia orgánica libre; <sup>†</sup> moh= materia orgánica humificada; <sup>‡</sup> C<sub>p</sub> = cálculos proporcionales de carbono, A = porcentaje de carbono con respecto al peso, C = carbono orgánico con respecto al carbono total, D = carbono orgánico con respecto al carbono de la fracción humificada. Valores con distinta letra en una sola columna difieren significativamente, Tukey (P < 0.05).

**Cuadro 6. Electroforegramas de los ácidos húmicos de los suelos en porcentaje de área para las fracciones móviles e inmóviles.**

Horizonte Profundidad	Suelo <sup>†</sup>								
	ácido no salino		neutro no salino		alcalino salino sódico				
A <sub>ht</sub> 10-20 cm	I = 31.3	M = 18.2	I/M = 1.7	I = 18.3	M = 49	I/M = 0.3	I = 10.5	M = 43.4	I/M = 0.2
A <sub>ab</sub> 140-42, 80-90, 86-96 cm	I = 22.8	M = 49.1	I/M = 0.4	I = 15.2	M = 74.6	I/M = 0.2	I = 8.7	M = 87.0	I/M = 0.1
A <sub>tr</sub> o H <sub>tr</sub> 190-200, 180-190, 190-200 cm	I = 29.2	M = 37.7	I/M = 0.7	I = 8	M = 54	I/M = 0.1	I = 3.9	M = 56.9	I/M = 0.07

<sup>†</sup> Las profundidades de los horizontes álbico y profundo, se encuentran en el orden: Suelo ácido, neutro y alcalino. I = inmóvil, M = móvil.

Índices AH/AF (1 a 1.5), reportados para suelos cultivados en Estados Unidos, son semejantes a los encontrados (Cuadros 3, 4 y 5). Valores altos en los índices definen mayor estabilidad del carbono (Skłodowski, 1996).

La humina heredada (H<sub>3</sub>), en suelos no salinos mostró diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) con mayor contenido en horizontes profundos A<sub>tr</sub> o H<sub>tr</sub> (Cuadros 3 y 4).

Las diferencias estadísticas con porcentajes de carbono mayores en huminas (H<sub>1</sub> y H<sub>2</sub>) de horizontes superficiales (Cuadros 4 y 5) confirmaron la complejidad del humus asociada al manejo antrópico.

En los electroforegramas de horizontes álbicos, las fracciones móviles fueron mayores e indicaron menor polimerización de AH. (Cuadro 6). Su evolución se asoció a la presencia de sílice, diatomeas y biominerales tipo ópalo, y menores porcentajes de carbono.

El horizonte superficial A<sub>ht</sub> del suelo ácido no salino mostró diferencias estadísticas con respecto a los demás horizontes; el valor I/M de 1.7 (Cuadro 6) indicó presencia de AH con estructura compleja y mayor estabilidad. Los resultados se asociaron al manejo agrícola, ya que numerosas aplicaciones de estiércol y residuos de cosecha aumentan el peso molecular de los AH (Piccolo *et al.*, 1992).

Con los resultados encontrados se observó que existe diferenciación en la evolución del humus a diversas profundidades. Las diferencias estadísticas en el contenido de carbono de las fracciones húmicas entre los horizontes superficial (A<sub>ht</sub>), álbico (A<sub>ab</sub>) y profundo (A<sub>tr</sub> o H<sub>tr</sub>) fueron significativas ( $P < 0.05$ ) (Cuadros 3, 4 y 5).

Horizontes superficiales y profundos de todos los suelos mostraron los rangos: de carbono AH de 1 a 1.6%, AF de 0.9 a 1.9%, huminas en todos los suelos y horizontes valores entre 0.2 y 0.4%, para H<sub>3</sub>, de 0.01 a 1.1 % en H<sub>1</sub> y de 0.1 a 3.3% en H<sub>2</sub>. La principal diferencia se encontró en las fracciones de los

horizontes álbicos con rangos de carbono en AH que oscilaron de 0.2 a 0.6% y de 0.4 a 0.6% para AF.

### Evolución del Humus

En todos los suelos estudiados, existe un desequilibrio entre los procesos de humificación y mineralización, definido por el menor contenido de carbono en las fracciones AF+H<sub>3</sub> y mol, así como por los mayores porcentajes asociados a AH+H<sub>1</sub>+H<sub>2</sub> y moh. La respuesta se atribuyó al manejo antrópico con laboreo e incorporación de mejoradores orgánicos o residuos de cosecha que modifican la biomasa autóctona y limitan la mineralización.

Wander y Yang (2000) y Whalen *et al.* (2000) señalaron que la perturbación disminuye la mineralización y disponibilidad de nutrientes. Angers *et al.* (1997) mencionaron el efecto estimulante del laboreo sobre la mineralización del carbono. En los suelos de chinampa es probable que disminuya la mineralización tanto por el manejo (residuos orgánicos y riego) y perturbación, como por el exceso de humedad proporcionado por el agua del lago.

La descripción en campo y las diferencias estadísticas encontradas entre los horizontes del perfil en distribución de carbono dentro las fracciones húmicas (Cuadros 3, 4 y 5) establecieron que la dinámica bioquímica en los horizontes superficiales es afectada por los períodos de lluvia intensos, el exceso de riego y el mal drenaje del suelo que produce inundaciones.

En los horizontes álbicos, el menor contenido de carbono se asoció tanto al predominio de diatomeas, biominerales y fitolitos que contribuyen a los altos porcentajes de sílice (60 a 80%), como al bajo contenido de hierro (Cuadro 7) que impiden la polimerización de los precursores fenólicos y disminuyen la complejidad estructural de AH (Boyd y Mortland, 1990) (Cuadros 3, 4 y 5).

Las características analíticas definieron todos los horizontes superficiales, álbicos y profundos como humus tipo mull, excepto el álbico del suelo neutro no salino que fue moder. El origen antrópico, las condiciones ambientales, el hidromorfismo y los procesos bioquímicos ubicaron a todas las muestras dentro del tipo **anmoor** (Duchaufour, 1984; Haider, 1992).

Con base en las diferencias estadísticas encontradas en los contenidos de carbono de las fracciones húmicas entre horizontes (Cuadros 3, 4 y 5), se puede señalar que el contenido de sales, los valores de pH del suelo (Cuadros 1 y 2), el nivel freático y la humedad no influyeron en la evolución del humus, mientras que las características edáficas (porcentajes de carbono y arcilla), el contenido de metales totales y la profundidad sí.

El contenido total de metales fue alto en los horizontes superficiales y profundos (Cuadro 7), esto se relacionó con mayor contenido de carbono en fracciones evolucionadas del humus (AH+H<sub>1</sub>+H<sub>2</sub>).

Los horizontes superficiales y profundos con contenido de carbono mayor tuvieron fracciones húmicas más polimerizadas que los álbicos (Cuadros 3, 4 y 5).

### Contenido de Metales en AH

La abundancia de metales fue definida por el contenido encontrado; en todos los suelos, el Al y Fe

fueron los metales predominantes, el Zn, Cu y Ni de distribución intermedia y el Co, Cd y Cr los de menores concentraciones (Cuadro 7).

Algunos coeficientes de correlación entre metales fueron positivos: el Al se asoció con Co (0.547), Fe (0.627) y Cd (0.619); el Co con Fe (0.907), Cd (0.791), Ni (0.692) y Zn (0.451); el Fe con Cd (0.929) y Ni (0.717), el Cr con Ni (0.462); el Cd con Ni (0.701); el Ni con Cu (0.669) y el Zn con Cu (0.721). Las correlaciones superiores a 0.5 son estadísticamente significativas (Steel y Torrie, 1988).

La asociación entre Fe y Co, Al y Co, Co y Ni, Co y Zn, Fe y Ni, Cr y Ni, Cd y Ni, Ni y Cu, Zn y Cu en los AH de los suelos estudiados se observó principalmente en los horizontes superficiales (Cuadro 7). Esto se relacionó con mayor contenido de carbono en fracciones evolucionadas del humus (AH+H<sub>1</sub>+H<sub>2</sub>) (Cuadros 3, 4 y 5).

El contenido total de metales fue alto en los horizontes superficiales (A<sub>ht</sub>) y menor en los horizontes álbico (A<sub>ab</sub>) y profundo (A<sub>tr</sub> o H<sub>tr</sub>). Sin embargo, en el suelo no salino ácido Al, Cu y Zn se acumularon más en el horizonte H<sub>tr</sub>, atribuido al porcentaje de materia orgánica (31%) (Cuadro 2) y a la alta humedad, las cuales pudieron promover la retención de metales de estas capas, ya que la acumulación del Zn y Cu se ha asociado a mayores porcentajes de humedad (Han y Banin, 1999).

Cuadro 7. Metales totales en ácidos húmicos de los suelos.

Suelo	Horizonte	Al	Co	Fe	Cr	Cd	Ni	Zn	Cu
----- mg kg <sup>-1</sup> -----									
Ácido no salino	A <sub>ht</sub> 10 a 20 cm	2115	4	2659	3	5	18	21	12
	A <sub>ab</sub> 140 a 142 cm	729	2	800	2	2	10	12	8
	H <sub>tr</sub> 190 a 200 cm	6445	2	1212	2	3	10	79	20
Neutro no salino	(A <sub>ht</sub> ) 10 a 20 cm	1725	3	1194	4	2	18	56	28
	A <sub>ab</sub> 80 a 90 cm	217	0	203	2	0	7	19	13
	A <sub>tr</sub> 180 a 190 cm	524	0	315	3	2	15	25	25
Alcalino salino sódico	(A <sub>ht</sub> ) 10 a 20 cm	419	0	749	4	2	12	12	8
	A <sub>ab</sub> 86 a 96 cm	95	0	117	3	1	6	9	2
	A <sub>tr</sub> 190 a 200 cm	102	0	194	3	1	5	10	6

En suelos enmendados con estiércol, el Cu se ha asociado a la fracción orgánica en porcentajes que varían de 39 a 53%, debido a que el Cu está muy relacionado con la formación de complejos organo-minerales por la capacidad de los ácidos húmicos y fúlvicos de estabilizarlos (Han y Banin, 1997; Li *et al.*, 1997; Han *et al.*, 2001).

En los suelos chinamperos estudiados, la abundancia de Fe y Al se relacionó con la presencia de arcillas tipo montmorillonita y caolinita, y con minerales ferromagnesianos, como los anfíboles (hornblenda) y el olivino que son abundantes en la fracción arena (Aguilera y Fuentes, 1951.).

El Cd fue el único metal presente en rangos tóxicos mayores que  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  según la NOM-001 (SEMARNAT, 2003). La concentración de los metales Co, Cr, Pb, Ni, Zn y Cu se clasificó como no tóxica (Alloway, 1990). El contenido de Cd se ha relacionado, en varias ocasiones, con los porcentajes de hierro y arcilla, así como con el material parental, esto ocurre en los suelos estudiados de chinampa, en el suelo ácido en el horizonte superficial hubo mayor contenido de arcilla (38%), hierro y cadmio (Cuadro 7).

### CONCLUSIONES

- Los porcentajes de carbono en las fracciones húmicas analizadas mostraron diferencias significativas entre horizontes, por las características edáficas, el manejo antrópico y la ubicación dentro del perfil.

- Los horizontes superficiales y profundos con mayor contenido de carbono, metales totales y arcilla tuvieron fracciones húmicas polimerizadas.

- Los horizontes álbicos con contenido de sílice de 60 a 80%, diatomeas y presencia de biominerales del tipo del ópalo se asociaron a humus con fracciones poco polimerizados.

- El nivel freático, la salinidad y el pH no influyeron en la evolución del humus; los suelos salino sódicos y no salinos tuvieron contenido de carbono semejante en las fracciones húmicas al igual que los horizontes superficial y profundo con diferente cercanía al agua del lago.

- En los suelos de chinampa, el mayor contenido de carbono asociado a las fracciones de moh (30 a 90%) sobre el de mol (1 a 25%) definió un predominio del proceso de humificación sobre el de mineralización, atribuido a la adición de mejoradores orgánicos.

### LITERATURA CITADA

- Aguilera H., N. y E. Fuentes. 1951. Estudio fisicoquímico y espectroscópico de la fracción arcilla de 2 micrones de algunos suelos de Xochimilco. *Revista Soc. Mex. Historia Natural* XII: 101-118.
- Alloway, B.J. 1990. *Heavy metals in soils*. John Wiley. New York.
- Almendros M., G. 1980. *Composición y propiedades de la materia orgánica de las principales turberas españolas*. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
- Almendros, G. y F. González-Vila. 1987. Degradative studies on a soil humin fraction-sequential degradation of inherited humin. *Soil Biol. Biochem.* 19: 513-520.
- Angers, D.A., M.A. Bolinder, M.R. Carter, E.G. Gregorich, C.F. Dnory, B.C. Liany, R.P. Boroneg, R.R. Simard, R.P. Donald, R.P. Beyart y J. Martel. 1997. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool humid soils of eastern Canada. *Soil Tillage Res.* 4: 191-201.
- Bower, C.A. y R. Huss. 1948. Rapid volumetric method for estimating gypsum in soil. *Soil Sci.* 66: 199-204.
- Boyd, S.A. y M.M. Mortland. 1990. Enzyme interactions with clay and clay-organic matter complexes. *Soil Biochem.* 6: 1-28.
- Códice Ramírez. 1944. *Relación del origen de los indios que habitaban esta Nueva España, según sus historias*. Ed. Leyenda. México.
- Coe, D.M. 1964. The chinampas of Mexico. *Scientific American* 260: 90-96.
- Cheng, K.L. y R. Bray. 1951. Determination of calcium and magnesium in soil and plant material. *Soil Sci.* 72: 449-458.
- Dorado, E., A. Polo y J. del Río. 1972. Caracterización de los ácidos húmicos por electroforesis y gel filtración. *Anales de Edafología y Agrobiol.* 31: 693-697.
- Duchaufour, Ph. 1984. *Edafología*. J. Masson, S.A. Madrid, España.
- FAO-UNESCO-ISRIC. 1988. *Soil Map of the World. Revised Legend. World Soil Resources Report 60*. Food and Agricultural Organization. Rome, Italy.
- Flores V., C. 1990. Las chinampas: Futuro de la producción agrícola en México. *Rescate* 10: 5-11.
- García M., E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Given, P.H. y C.H. Dickinson. 1975. Biochemistry and microbiology of peats. *Soil Biochem.* 3: 124-211.
- Haider, K. 1992. Problems related to the humification processes in soils of temperature climates. *Soil Biochem.* 7: 55-81.
- Han, F., W. Kingery y H.M. Selim. 2001. Accumulation, redistribution, transport and bioavailability in heavy metals in waste-amended soils. pp. 145-174. *In: Iskandar, I.K. y M.B. Kirkham (eds.). Trace elements in soil: Bioavailability, flux and transfer*. Lewis Publishers. New York.
- Han, F.X. y A. Banin. 1997. Long-term transformation and redistribution of potentially toxic heavy metals in arid zone soils. I: Incubation under saturated conditions. *Water Air Soil Pollut.* 95: 399-423.
- Han, F.X. y A. Banin. 1999. Long-term transformation and redistribution of potentially toxic heavy metals in arid zone

- soils. II: Incubation under field capacity conditions. *Water Air Soil Pollut.* 114: 221-250.
- ISRIC-FAO. 2002. Procedures for soil analysis. 6a ed. Rome, Italy.
- ISSS-ISRIC-FAO. 1998. World Reference Base for Soil Resources. Rome, Italy.
- Jackson, L.M. 1982. Análisis químicos de suelos. Omega. Barcelona, España.
- Kononova, M.M. 1982. Materia orgánica del suelo. Oikos-Tan. Madrid, España.
- Li, M., N.V. Hue y S.K. Hussain. 1997. Changes of metal forms by organic amendments to Hawaii soils. *Commun. Soil. Sci. Plant. Anal.* 28: 381-386.
- López, S. y Y. Reyes. 1990. Historia de un lago. *Rescate* 5: 14-15.
- Lot, H. y F. Quiroz A. 1979. La chinampa: Un sistema agrícola que utiliza plantas acuáticas. *J. Acuatic. Plant. Manage.* 17: 3.
- Piccolo, A., P. Zaccheo y P.G. Genevini. 1992. Chemical characterization of humic substances extracted from organic-waste-amended soils. *Bioresource Techn.* 40: 275-282.
- Ramos-Bello, R., L. Cajuste, D. Flores-Román y N. García-Calderón. 2001. Metales Pesados, sales y sodio en suelos de chinampa en México. *Agrociencia* 35: 385-395.
- Reyes O., A. 1997. Investigación sobre los coloides organominerales en suelos de Xochimilco y su relación con cultivos florícolas. Tesis Doctorado. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Reyes O., A., N. Aguilera-Herrera, N. García-Calderón y P. Velasco. 1997. Caracterización de complejos arcilla-humus y su efecto en el desarrollo de cultivos florícolas. *Edafología* 3: 161-169.
- Reza, E. 1990. Los canales de Xochimilco seguirán sonriendo al mundo. *Rescate* 10: 34-37.
- Richards, L.A., L.E. Allison, L.E. Brown, J.M. Hayward, H.E. Bernstein, L. Fireman y H. Pearson. 1985. Diagnóstico y Rehabilitación. Suelos salinos y sódicos. Limusa. México, D.F.
- Rojas R., T. 1984. La tecnología indígena de construcción de chinampas en la Cuenca de México. México, D.F.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2003. NOM 001. Límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México, D.F.
- Skłodowski, P. 1996. Influence of management on the transformation of organic matter in soils. pp. 107-112. *In: Hayes, M., N. Senesi y S. Griffith (eds.). Humic substances and organic matter in soil and water environments.* International Humic Substances Society. New York.
- Steel, R.G.D. y J.H. Torrie. 1988. Bioestadística. Principios y procedimientos. 2a ed. McGraw Hill. México, D.F.
- Tate, R.L. 1992. Soil organic matter. Biological and ecological effects. Krieger Publishing Company. Melbourne, FL.
- Vera, R. 1991. Xochimilco. Este horizonte chinampero. *México Indígena* 19: 36-47.
- Walén, J.K., J.P. Bottompty y D.D. Myrold. 2000. Carbon and nitrogen mineralization from light- and heavy-fraction addition to soil. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1345-1352.
- Walkley, A. e I.A. Black. 1934. An examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 497-505.
- Wander, M.M. y X. Yang. 2000. Influence of tillage on the dynamics of loose and occluded particulate and humified organic matter fractions. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1151-1160.
- West, R.C. y P. Armillas. 1950. Las chinampas de México: Poesía y realidad de los jardines flotantes. *Cuadernos Americanos* 50: 165-182.

# RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FIBRA DE ALGODÓN EN RESPUESTA AL NÚMERO DE RIEGOS Y DOSIS DE NITRÓGENO<sup>†</sup>

## Cotton Yield and Fiber Quality in Response to Nitrogen Rate and Number of Irrigations

Arturo Palomo-Gil<sup>1‡</sup>, Arturo Gaytán-Mascorro<sup>2</sup>, Rodolfo Faz-Contreras<sup>2</sup>,  
David G. Reta-Sánchez<sup>2</sup> y Emiliano Gutiérrez-del Río<sup>1</sup>

### RESUMEN

Las variedades de algodón cultivadas en México son de ciclo largo y de gran desarrollo vegetativo por lo que requieren de cuatro riegos de auxilio y de una alta inversión en insumos. Este tipo de variedad no es la más idónea en regiones donde el agua para uso agrícola es un recurso muy limitado, como en la Comarca Lagunera, México. La precocidad es una característica que puede ser utilizada para hacer eficiente el uso del agua y de los insumos; por tal motivo, el objetivo del presente estudio fue conocer la respuesta de la variedad precoz Laguna 89 al número de riegos y a la dosis de nitrógeno. Durante tres años consecutivos (1997 a 1999) se evaluaron tres tratamientos de riego consistentes en dos, tres y cuatro riegos de auxilio, aplicándose el último a 80, 100 y 120 días después de la siembra (dds), respectivamente. Las dosis de nitrógeno estudiadas fueron: 0, 40, 80, 120, 160 y 200 kg ha<sup>-1</sup>. Se evaluaron el rendimiento de algodón hueso y pluma (fibra), los componentes del rendimiento (número de capullos por planta, peso del capullo, porcentaje de fibra e índice de semilla) y la calidad de la fibra (longitud, resistencia y finura). Todas las variables estudiadas resultaron afectadas por el año, número de riegos y dosis de nitrógeno; no se detectó ningún tipo de interacción. Con tres y cuatro riegos de auxilio, se obtuvieron los mismos rendimientos de algodón hueso y pluma, los cuales, en promedio, superaron en 65% al rendimiento obtenido con dos riegos. Este último tratamiento también redujo el valor de los componentes del rendimiento y la calidad de la fibra.

La respuesta a la fertilización nitrogenada fue mínima pero significativa, y el mejor rendimiento de algodón hueso y algodón pluma se obtuvo con la dosis de 80 kg ha<sup>-1</sup>. La diferencia de rendimiento entre esta dosis y el tratamiento sin fertilizar fue de 9%.

*Palabras clave:* *Gossypium hirsutum L.*, precocidad, componentes del rendimiento, propiedades de la fibra.

### SUMMARY

The cotton varieties grown in Mexico are late and vegetative growth is abundant. They thus require four irrigations and large investment in inputs. Late varieties are not suitable for regions such as the Comarca Lagunera, Mexico, where water is a limiting factor. Earliness is a characteristic that can be used to make water use more efficient and to reduce investment. The objective of this study was to determine the response of an early cotton variety (Laguna 89) to nitrogen rate and number of irrigations. Three irrigation treatments and six N dosages were evaluated during three consecutive years (1997, 1998, 1999). The irrigation treatments were two, three, and four irrigations. Nitrogen dosages were 0, 40, 80, 120, 160, and 200 kg ha<sup>-1</sup>. Seed and lint cotton yield, yield components (number of bolls plant<sup>-1</sup>, boll weight, lint percentage, and seed index), and fiber quality properties (length, strength, and fiber fineness) were measured. Year, number of irrigations and N rate affected all the characteristics measured, but there was no interaction among them. The three and four postplanting irrigation treatments showed the same seed and lint cotton yields. On the average, these two treatments outyielded the treatment of two irrigations by 65%. This latter treatment also showed the lowest yield components and fiber quality values. The response to N fertilization was low. The best seed and lint cotton yields were obtained with the dosage of 80 kg ha<sup>-1</sup>. Yield difference between the best N rate and the 0 N rate was 9%.

<sup>†</sup> Proyecto CONACYT SIREYES/95/196

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna. Apartado Postal 940, 27054 Torreón, Coahuila, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (apalomog@mexmail.com)

<sup>2</sup> Campo Experimental Laguna, INIFAP. Apartado Postal 247, 27000 Torreón, Coahuila, México.



*Index words:* *Gossypium hirsutum* L., *earliness*, *yield components*, *fiber properties*.

## INTRODUCCIÓN

Por el hábito de crecimiento de la planta de algodón es posible clasificar a algunos cultivares como de hábito de crecimiento determinado y a otros como indeterminado (Quisenberry y Roark, 1976). Los cultivares con crecimiento determinado (precoces) fructifican fuertemente al inicio de su período de crecimiento reproductivo, después de lo cual las yemas terminales entran en dormancia, el crecimiento de las ramas fructíferas declina, la producción de flores disminuye, y la mayoría de las flores que se producen en las últimas semanas de floración son eliminadas por la planta. En cambio, los cultivares de crecimiento indeterminado continúan floreciendo y, en general, no retienen los frutos suficientes para detener su crecimiento.

En México, se cultivan variedades de algodón de crecimiento indeterminado (tardías) y de gran desarrollo vegetativo, por lo que requieren más agua, más nitrógeno y más aplicaciones de insecticida para la manifestación de su potencial productivo. Estos requerimientos aumentan los costos de producción en detrimento de la redituabilidad del cultivo. Las variedades tardías no son las más adecuadas para las regiones algodonerías del norte de México, donde la poca disponibilidad de agua para uso agrícola impone la necesidad de usarla lo más eficientemente posible (Palomo *et al.*, 1999a).

El Programa de mejoramiento genético de algodón del Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), México, ha liberado variedades de algodón con crecimiento determinado (precoces), con menor área foliar y de ramas fructíferas más cortas que las que poseen las variedades cultivadas en la actualidad. Bhatt y Appukuntan (1971) reportaron que las necesidades nutrimentales de las variedades de ramas fructíferas cortas son menores que en las variedades de ramas fructíferas largas y de gran desarrollo vegetativo, y que esto no se refleja en mayores rendimientos.

El crecimiento y el rendimiento de algodón, al igual que la mayoría de las especies cultivadas, muestran alta dependencia al nitrógeno y al agua durante su ciclo biológico. Resultados de estudios sobre riegos señalan que la precocidad es muy importante en la producción y retención de órganos fructíferos, en el rendimiento y en la eficiencia del uso

de agua (Murray y Verhalen, 1970). Cuando no hay deficiencias de humedad, los genotipos precoces son más eficientes en el uso de agua que los tardíos, en cambio, con deficiencias hídricas sucede lo contrario (Quisenberry y Roark, 1976).

El N es el nutrimento más crítico en un programa de fertilización en virtud de que es esencial para un desarrollo óptimo del cultivo, pero hay que evitar excesos que puedan ocasionar serios problemas de manejo del cultivo y pérdidas en la producción. McConnell *et al.* (1989) y Boquet *et al.* (1991) enfatizaron que la sobrefertilización produce plantas con gran crecimiento vegetativo, sin que esto se refleje en el rendimiento, además de que se incrementan las probabilidades de que se pierda el N del sistema suelo-planta. La dosis óptima de N está determinada por muchas variables ambientales, como clima, tipo de suelo, cultivar, fertilidad residual, humedad disponible y plagas (Gaylor *et al.*, 1983; McConnell *et al.*, 1989).

Pocos trabajos han incluido juntos láminas de riego y dosis de nitrógeno. Grimes *et al.* (1969) encontraron efectos aditivos entre el nitrógeno y el agua, y observaron que el nitrógeno puede sustituir una falta de agua y *viceversa*. Hearn (1975) encontró interacción significativa entre agua y nitrógeno. El incremento en la dosis de nitrógeno aumentó la eficiencia del uso de agua, siendo ésta mayor cuando se elevó la cantidad de ambos. Por ello, los objetivos del presente estudio fueron conocer la respuesta de la variedad de algodón precoz Laguna 89 al número de riegos y a la dosis de fertilización nitrogenada, y si la dosis de N puede aumentar la eficiencia en el uso del agua.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se realizó entre 1997 y 1999 en el Campo Experimental Laguna del INIFAP, situado en Matamoros, Coahuila, en la "Comarca Lagunera", localizada entre 24° 30' y 27° 00' N y entre 102° y 105° O a una altitud de 1120 m. El clima es seco, la temperatura media mensual durante el ciclo del cultivo (abril a agosto) es de 25 °C, con precipitación media anual de 220 mm. En los tres años, el estudio se llevó a cabo en el mismo sitio experimental cuyo suelo es de textura arcillosa, con bajo contenido de materia orgánica (0.36%), pH de 8.0 y un contenido de nitrógeno total de 0.11%. En comparación con las variedades comerciales, la variedad utilizada, Laguna 89, es de siete a 10 días

más precoz, de ramas fructíferas más cortas y de hoja más pequeña (Palomo *et al.*, 1993). Se evaluaron tres tratamientos de riego: dos, tres y cuatro riegos de auxilio y seis dosis de fertilización nitrogenada: 0, 40, 80, 120, 160, y 200 kg ha<sup>-1</sup>, los que se distribuyeron en un arreglo de parcelas divididas con la parcela mayor (riegos) en bloques completos al azar y cuatro repeticiones. Los tratamientos de nitrógeno se aplicaron en la siembra con una dosis uniforme de 40 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. En todos los tratamientos de riego, los dos primeros se aplicaron a 60 y 80 días después de la siembra (dds), calendario que a la vez correspondió al tratamiento de dos riegos de auxilio, donde el primer riego se aplicó al inicio de la floración y el segundo y último riego al inicio de la cuarta semana de floración. En el tratamiento de tres riegos, el último se aplicó a 100 dds, cuando el cultivo iniciaba la séptima semana de floración. En el tratamiento de cuatro riegos, el último se aplicó a 120 dds, cuando las plantas emitían sus últimas flores. El calendario de riegos se basó en resultados de investigación de Palomo *et al.* (1990). En el riego de presiembra, se aplicó una lámina de 20 cm y, posteriormente, en cada riego de auxilio se aplicó la lámina necesaria para llevar a capacidad de campo el perfil del suelo hasta 0.90 m de profundidad, para lo cual cada año se utilizó el método gravimétrico para cuantificar en cada tratamiento, en tres repeticiones y dos veces por semana, el contenido de humedad en el suelo hasta una profundidad de 90 cm, con incrementos de 30 cm. Esta información se utilizó para calcular la cantidad de agua evapotranspirada por estrato y total. La evapotranspiración real se consideró como la pérdida de humedad en el suelo por evaporación directa desde la superficie más la extracción del cultivo, y se calculó con la ecuación:

$$\text{Etr} = (\text{H1} - \text{H2}) (\text{DA}) (\text{Pr})$$

Donde: Etr = evapotranspiración real (cm); H1 = humedad anterior (%); DA = densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>); Pr = profundidad de cada estrato muestreado (cm).

La siembra se efectuó en el sistema de producción de surcos estrechos (distancia de 0.70 m entre surcos) dejando una distancia de 17 cm entre plantas para obtener una densidad de 83 000 plantas ha<sup>-1</sup>. La parcela menor consistió de seis surcos de 8 m de largo y la parcela útil, para cuantificar rendimiento, fue de dos surcos de 6 m de largo. Para conocer la cantidad de unidades calor (UC), disponibles durante

el ciclo de crecimiento del cultivo, que comprende de abril a agosto, éstas se calcularon considerando los límites de temperatura para el algodón propuestos por Krieg (citado por Mauney, 1991) y que son: temperatura base mínima de 15.5 °C y temperatura máxima de 38 °C.

Se evaluó el rendimiento de algodón en hueso y en pluma. En componentes del rendimiento, se cuantificaron el número de capullos por planta, el peso del capullo, el porcentaje de fibra y el índice de semilla (peso de 100 semillas). Para obtener el rendimiento por planta, se dividió el rendimiento parcelar entre el número de plantas cosechadas, y el número promedio de capullos por planta resultó de dividir el rendimiento por planta entre el peso del capullo. Para obtener los valores de los componentes del rendimiento restantes y de la calidad de la fibra, se tomó una muestra aleatoria de 20 capullos por parcela y se pesó. El peso del capullo se obtuvo al dividir el peso de la muestra entre el número de capullos. Después se separó la fibra de la semilla y se pesó. El porcentaje de fibra es la proporción que representa al peso de la fibra del peso de la muestra. A las muestras de fibra se les determinó la longitud en mm, la resistencia en Megapascals (MPa) y la finura en índice de micronaire. Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente mediante un análisis combinado que incluyó años, riegos y dosis de N. Para el análisis estadístico y para la comparación de medias, se utilizó el Programa SAS (SAS Institute, 1990). En la comparación de medias, se usó la (DMS) a 0.05.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Consumo de Humedad

En los tres años, los estratos de 0 a 30 cm y de 30 a 60 cm aportaron la mayor cantidad de agua utilizada por el cultivo, con diferencias en la cantidad aportada, ya que, en el tratamiento de dos riegos, dichos estratos contribuyeron con 76 a 79% del agua consumida, en tanto que, en los tratamientos de tres y cuatro riegos, el agua consumida en tales profundidades osciló entre 90 y 95%. La lámina total evapotranspirada cada año se presenta en el Cuadro 1.

### Rendimiento

El análisis estadístico del rendimiento de algodón hueso y algodón pluma detectó diferencias significativas entre años, riegos y dosis de N, mas no

**Cuadro 1. Lámina total de agua evapotranspirada por año en tres tratamientos de riego durante tres años de evaluación en la Comarca Lagunera, México.**

Riegos de auxilio	Calendario de riegos dds <sup>†</sup>	Año			Promedio
		1997	1998	1999	
Dos	60 y 80	35.0	44.7	42.2	40.6
Tres	60, 80 y 100	47.0	53.2	49.5	49.9
Cuatro	60, 80, 100 y 120	62.6	64.7	63.3	63.5
Promedio		48.2	54.2	51.7	

<sup>†</sup> dds = días después de la siembra.

para las interacciones de primer o segundo orden, lo cual muestra que los efectos de los factores en estudio son independientes y que las variables ambientales, propias de cada ciclo de cultivo, tampoco afectan las interacciones (Cuadro 2). En los tres años, la mejor producción de algodón hueso y de algodón pluma se obtuvo en 1997 y la menor en 1999, lo que evidencia así el efecto que las variaciones ambientales pueden tener en la producción. Es normal obtener diferentes rendimientos a través de los años por causas como: diferencias en las condiciones climatológicas prevaletantes durante el ciclo del cultivo, calidad del suelo y manejo del mismo. En el presente estudio, una de las posibles causas de las diferencias en rendimiento es la temperatura, la cual fue más alta en 1999 y más baja en 1997, según lo indican las unidades calor (UC) acumuladas desde la siembra hasta la cosecha, que comprende el período de abril a agosto. En este período, las UC acumuladas fueron de

1503 en 1997, de 1727 en 1998 y de 1787 en 1999, y se observó que a medida que aumentó la cantidad de UC acumuladas, disminuyó el rendimiento.

Los tratamientos que recibieron tres y cuatro riegos mostraron rendimientos de algodón hueso y pluma estadísticamente iguales y éstos fueron, en promedio, 65% superiores al rendimiento obtenido por el tratamiento que recibió dos riegos de auxilio (Cuadro 3). Los resultados del presente estudio coinciden con los obtenidos por Palomo *et al.* (2001), confirmando así que las variedades precoces requieren sólo de tres riegos para manifestar su potencial productivo, y que el cuarto riego sólo retrasa la maduración de la cosecha, provoca una mayor producción de hojas y órganos fructíferos (rebrote) y dificulta la defoliación del cultivo con productos químicos.

En los tres años, la mayor eficiencia de producción por m<sup>3</sup> de agua consumida se obtuvo con tres riegos. En promedio ésta fue de 555, 734 y 590 g de algodón hueso m<sup>-3</sup> de agua, para dos, tres y cuatro riegos de auxilio, respectivamente. Con lo anterior, puede asegurarse también un ahorro en los costos de producción al dejar de aplicarse un riego.

Las dosis de 40, 80, 160 y 200 kg ha<sup>-1</sup> de N presentaron rendimientos de algodón hueso altos y estadísticamente iguales; sin embargo, la mayor producción se obtuvo con la dosis de 80 kg ha<sup>-1</sup> de N (Cuadro 4), resultados similares a los obtenidos por Palomo *et al.* (1996, 1999b) coinciden con los reportados por Amer y Abumain (1969) y Maples y

**Cuadro 2. Componentes de rendimiento y rendimiento de algodón evaluado durante tres años en la Comarca Lagunera, México.**

Año	Rendimiento algodón		Número de capullos planta <sup>-1</sup>	Peso de capullo	Fibra	Índice de semilla
	Hueso	Pluma				
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----			g	%	
1997	4422 a <sup>†</sup>	1683 a	10.24 a	5.2 b	38.0 a	10.8 b
1998	3078 b	1130 b	7.89 b	4.7 c	37.0 b	10.5 b
1999	2153 c	799 c	4.63 c	5.6 a	36.7 b	11.7 a

<sup>†</sup> En la columna, medias con la misma letra son estadísticamente iguales (DMS, 0.05).

**Cuadro 3. Rendimiento y componentes de rendimiento del algodón evaluado con tres tratamientos de riego en las condiciones de la Comarca Lagunera, México.**

Riegos de auxilio	Rendimiento algodón		Número de capullos planta <sup>-1</sup>	Peso de capullo	Fibra	Índice de semilla
	Hueso	Pluma				
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----			g	%	
Dos	2243 b <sup>†</sup>	810 b	5.40 b	5.0 c	36.2 c	10.6 c
Tres	3662 a	1395 a	8.48 a	5.2 a	38.1 a	10.9 b
Cuatro	3747 a	1396 a	8.85 a	5.1 b	37.5 b	11.2 a

<sup>†</sup> En la columna, medias con la misma letra son estadísticamente iguales (DMS, 0.05).

**Cuadro 4. Rendimiento y componentes de rendimiento del algodón obtenidos en seis dosis de nitrógeno evaluados en condiciones de la Comarca Lagunera, México.**

Nitrógeno kg ha <sup>-1</sup>	Rendimiento algodón		Número de capullos planta <sup>-1</sup>	Peso de capullo g	Fibra %	Índice de semilla
	Hueso kg ha <sup>-1</sup>	Pluma kg ha <sup>-1</sup>				
0	3117 b <sup>†</sup>	1178 ab	7.36 b	5.1 ab	37.6 a	10.8 c
40	3196 ab	1159 b	7.55 ab	5.1 ab	37.3 a	11.0 abc
80	3416 a	1284 a	7.76 ab	5.3 a	37.3 a	10.9 bc
120	3096 b	1164 b	7.46 b	5.0 b	37.2 a	11.1 ab
160	3293 ab	1244 ab	7.93 a	5.0 b	37.4 a	10.9 bc
200	3188 ab	1175 ab	7.68 a	5.0 b	36.7 b	11.2 a

<sup>†</sup> En la columna, medias con la misma letra son estadísticamente iguales (DMS, 0.05).

Frizzell (1985), quienes señalaron que 60 a 100 kg ha<sup>-1</sup> de N son suficientes para obtener un alto rendimiento de algodón. La ausencia de interacción de riegos con dosis de N implica que, para las condiciones de la Comarca Lagunera, estos dos factores de la producción operan independientemente y que un aumento en la cantidad de N aplicado no sustituye una falta de agua, como lo reportaron Grimes *et al.* (1969) y Hearn (1975). En el presente estudio, la mayor eficiencia en el uso del N se obtuvo con la dosis de 80 kg ha<sup>-1</sup> y fue de 3.737 kg de algodón hueso por kg de N aplicado, cifra resultante después de restar el rendimiento obtenido por el tratamiento que no recibió N.

### Componentes del Rendimiento

Los componentes del rendimiento también presentaron efecto de año, número de riegos y dosis de N, mas no hubo en su interacción (Cuadros 2, 3 y 4). Como consecuencia de la suspensión anticipada de los riegos en el tratamiento con dos riegos de auxilio, donde el último riego se aplicó a 80 dds, se provocó una deficiencia de humedad durante el período de crecimiento reproductivo que afectó negativamente el peso del capullo, el porcentaje de fibra y el índice de semilla (Cuadro 3), pues se conoce que normalmente un riego cubre durante tres semanas los requerimientos de agua del cultivo sin que éste muestre deficiencias. El mejor porcentaje de fibra y peso de capullo se obtuvieron con tres riegos de auxilio y el mejor peso de semilla con cuatro riegos. La dosis de N también afectó el valor de los componentes del rendimiento, sobre todo al peso de capullo y el índice de semilla, ya que las dosis de 0 a 160 kg ha<sup>-1</sup> mostraron valores de porcentaje de fibra estadísticamente iguales y superiores al obtenido con la dosis más alta de nitrógeno.

### Calidad de Fibra

El análisis de varianza, hecho para las propiedades de la fibra, detectó efectos estadísticamente significativos en años, número de riegos y dosis de N, mas no en las interacciones. El efecto de año se presentó más fuertemente en la finura de la fibra y en menor proporción en la longitud de la misma; en el primer caso, la variación entre el valor más bajo y más alto fue de 14% y, en el segundo, de 4%. Dado que en todos los años el manejo del cultivo fue el mismo, el factor ambiental que influyó probablemente en la variación de los valores de la fibra fue la temperatura, ya que la precipitación fue muy escasa (Cuadro 5).

Las propiedades físicas de longitud, resistencia y finura de la fibra se deben más a factores genéticos que a factores ambientales; sin embargo, algunas variaciones en la humedad disponible pueden afectarlas (Longenecker y Erie, 1968). En el Cuadro 6, se aprecia que la mejor longitud de fibra se obtuvo con cuatro riegos y la mejor resistencia con tres riegos; sin embargo, las diferencias entre los valores obtenidos por ambos tratamientos son mínimas y superan ampliamente los requerimientos mínimos de la industria textil que son de 26.9 mm en longitud y de 517.5 MPa en resistencia. Además, las diferencias no influyen en el precio de la fibra, dado que la industria textil no paga mejor calidad, aunque

**Cuadro 5. Características de la fibra de algodón evaluado durante tres años en la Comarca Lagunera, México.**

Fibra	Año		
	1997	1998	1999
Longitud (mm)	28.6 a	28.0 b	27.5 c
Resistencia (MPa)	621.1 a	558.9 c	564.9 b
Finura (micronaire)	3.88 c	4.43 a	4.27 b

En cada fila, medias con la misma letra son estadísticamente iguales (DMS, 0.05).

**Cuadro 6. Efecto del número y de la época de aplicación del último riego sobre características de la fibra de algodón cultivado en la Comarca Lagunera, México.**

Fibra	Riegos de auxilio		
	Dos (80 dds) <sup>†</sup>	Tres (100 dds)	Cuatro (120 dds)
Longitud (mm)	27.9 b	28.0 b	28.2 a
Resistencia (MPa)	576.4 c	587.5 a	581.0 b
Finura (micronaire)	3.96 b	4.29 a	4.33 a

<sup>†</sup> dds = días después de la siembra.

En cada fila, medias con la misma letra son estadísticamente iguales, DMS (P<0.05).

sí la desea. Los valores de finura aceptados por el industrial oscilan de 3.5 a 4.9 micronaire, valores que también expresan el grado de madurez de la fibra. La aplicación de dos riegos disminuyó el valor de las tres propiedades de la fibra, ya que ésta fue más corta, menos resistente y más fina, lo cual es signo de inmadurez, ya que este tratamiento no proporcionó la humedad necesaria para el desarrollo y llenado de la fibra (Cuadro 6).

En general, el nitrógeno afecta poco la calidad de la fibra. En el presente trabajo, la aplicación de 40 kg ha<sup>-1</sup> de N mejoró la longitud de fibra, ya que dosis más altas (160 kg ha<sup>-1</sup>) sólo lograron aumentar en 0.2 mm la longitud de la misma que coincide con lo expresado por Palomo *et al.* (2002) respecto a que dosis altas suelen incrementar ligeramente la longitud (Cuadro 7). La resistencia de la fibra aumentó a medida que se incrementó la cantidad de N aplicado hasta la dosis de 160 kg ha<sup>-1</sup>, lo cual coincide con lo reportado por Palomo *et al.* (1996) y Palomo y Chavez (1997), pero difiere con lo reportado por Palomo y Davis (1984), quienes no encontraron mejoría en la resistencia de la fibra. En finura de fibra, la respuesta fue similar a la mostrada por la longitud, ya que el mayor grosor de la fibra se obtuvo con dosis de 40 a 160 kg ha<sup>-1</sup> de N, resultados que confirman los obtenidos por Palomo y Chavez (1997), donde el

tratamiento que no recibió N y la dosis más alta (200 kg ha<sup>-1</sup> de N) mostraron el menor grosor. Dada la alta calidad de fibra de la variedad utilizada, el valor de resistencia que se obtuvo en el tratamiento de cero N (564 MPa) fue muy superior al que presentan tanto las variedades comerciales, como el mínimo que exige la industria textil.

## CONCLUSIONES

- Para condiciones del presente trabajo, los efectos de años, riegos y dosis de N sobre el rendimiento, componentes del rendimiento y calidad de la fibra fueron independientes al no detectarse su interacción, por lo tanto, un aumento en la dosis de N no aumenta, la eficiencia en el uso del agua. Tres riegos son suficientes para que la variedad precoz Laguna 89 muestre su potencial productivo, ya que con dos riegos la producción se disminuye drásticamente.
- La máxima respuesta a la fertilización nitrogenada se obtuvo con 80 kg ha<sup>-1</sup>, lo que confirma resultados anteriores, y su futura recomendación permitirá un ahorro mínimo de 40 kg ha<sup>-1</sup> con respecto a la recomendación actual de 120 kg ha<sup>-1</sup>.

## LITERATURA CITADA

- Amer, F. y H. Abumain. 1969. Evaluation of cotton to rates, sources and timing of nitrogen application by petiole analysis. *Agron. J.* 61: 635-637.
- Bhatt, J.G. y E. Appukuttan. 1971. Nutrient uptake in cotton in relation to plant architecture. *Plant Soil* 35: 381-388.
- Boquet, D.J., G.A. Breitenbeck, A.B. Coco y W. Agillard. 1991. Fertilizer N rates to optimize cotton yield and fiber quality. *Louisiana Agric.* 35(2): 10-11.
- Gaylor, M.J., G.A. Buchanan, F.R. Guilliland y R.L. Davis. 1983. Interaction among a herbicide program, nitrogen fertilization, tarnished plant bugs, and planting dates for yield and maturity of cotton. *Agron. J.* 75: 903-907.
- Grimes, D.W., H. Yamada y W.L. Dickens. 1969. Functions for cotton (*Gossypium hirsutum* L.) production from irrigation and nitrogen fertilization variables. *Agron. J.* 61: 769-773.

**Cuadro 7. Efecto de la dosis de nitrógeno sobre características de la fibra de algodón. Promedio de evaluaciones de tres años en la Comarca Lagunera, México.**

Fibra	Nitrógeno (kg ha <sup>-1</sup> )					
	0	40	80	120	160	200
Longitud (mm)	27.7 c	28.1 bc	28.0 bc	28.2 ab	28.3 a	28.0 bc
Resistencia (MPa)	564 d	574 c	583 b	588 b	596 a	584 b
Finura (micronaire)	4.16 ab	4.27 a	4.18 ab	4.21 ab	4.23 ab	4.12 b

En cada fila, medias con la misma letra son estadísticamente iguales (DMS, 0.05)

- Longenecker, D.E. y L.J. Erie. 1968. Irrigation water management. pp. 321-345. In: Elliot, F.C., M. Hoover y E.K. Porter (eds.). Advances in production and utilization of quality cotton: Principles and practices. Iowa State University Press. Ames, IA.
- Maples, R. y M. Frizzell. 1985. Effects of varying rates of nitrogen on three cotton cultivars. Bull. 822. Arkansas Agric. Exp. Station. Fayetteville, AR.
- Mauney, J.R. 1991. Vegetative growth and development of fruiting sites. pp. 11-28. In: Mauney, J.R. y J.M. Stewart (eds.). Cotton physiology. The Cotton Foundation. Memphis, TN.
- McConnell, J.S., B.S. Frizzell, R.L. Maples, M.H. Wilkerson y G.A. Mitchell. 1989. Relationships of irrigation methods and nitrogen fertilization rates in cotton production. Arkansas. Agric. Exp. Stn. Rep. Fayetteville, AR.
- Murray, J.C. y L.M. Verhalen. 1970. Genotype by environment interaction study of cotton in Oklahoma. Crop Sci. 10: 197-199.
- Palomo G., A. y J.F. Chávez G. 1997. Respuesta de la variedad precoz de algodón "CIAN 95" a la fertilización nitrogenada. Información Técnica Económica Agraria (ITEA) 93V(2): 126-132.
- Palomo G., A. y D.D. Davis. 1984. Response of an F<sub>1</sub> interspecific cotton hybrid to nitrogen fertilization. Crop Sci. 24: 72-75.
- Palomo G., A., S. Godoy A., E.A. García C., V. Hernández H., S. Tovar H., U. Nava C., E. Castro M. y J.F. Chávez G. 1990. Producción de algodón con altas poblaciones de plantas. Folleto para Productores 11. Campo Experimental La Laguna-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Matamoros, Coahuila, México.
- Palomo G., A., S. Godoy A. y E.A. García C. 1993. Laguna 89: Cultivar de algodón resistente a secadera tardía (*Verticillium dahliae* K.). Revista Fitotecnia Mexicana 16: 88.
- Palomo G., A., J.F. Chávez G. y S. Godoy A. 1996. Respuesta de la variedad de algodón "Laguna 89" a la fertilización nitrogenada. Revista Fitotecnia Mexicana 19: 185-192.
- Palomo G., A., S. Godoy A. y J.F. Chávez G. 1999a. Ahorro en la fertilización nitrogenada con nuevas variedades de algodón: Rendimiento, componentes de rendimiento y calidad de fibra. Agrociencia 33: 451-455.
- Palomo G., A., A. Gaytán M. y S. Godoy A. 1999b. Respuesta de cuatro variedades de algodón (*Gossypium hirsutum* L.) a la densidad poblacional. Revista Fitotecnia Mexicana 22: 43-49.
- Palomo G., A., A. Gaytán M. y S. Godoy A. 2001. Efecto de los riegos de auxilio y densidad de población en el rendimiento y calidad de la fibra del algodón. Terra 19: 265-271.
- Palomo G., A., A. Gaytán M. y M.G. Chavarría R. 2002. Respuesta de una variedad precoz de algodón al número de riegos y dosis de nitrógeno. Revista Fitotecnia Mexicana 25: 43-47.
- Quisenberry, J.E. y B. Roarck. 1976. Influence of indeterminate growth habit on yield and irrigation water use efficiency in upland cotton. Crop Sci. 16: 762-765.
- SAS Institute Inc. 1990. SAS Language: Reference. Version 6. Cary, NC.

# CO<sub>2</sub> Y DINÁMICA DE POBLACIONES MICROBIANAS EN COMPOSTA DE ESTIÉRCOL Y PAJA CON AIREACIÓN

## CO<sub>2</sub> and Microbial Population Dynamics in Manure and Straw Compost under Aeration

J. Velasco-Velasco<sup>1†</sup>, B. Figueroa-Sandoval<sup>1</sup>, R. Ferrera-Cerrato<sup>1</sup>, A. Trinidad-Santos<sup>1</sup> y J. Gallegos-Sánchez<sup>2</sup>

### RESUMEN

Se estudió el efecto de la aireación forzada (AF) y aireación manual (AM) en la dinámica de la temperatura, humedad, pH, conductividad eléctrica (CE), respiración microbiana, poblaciones de microorganismos celulolíticos, ligninolíticos, amilolíticos, *Escherichia coli* y contenido de nitrógeno total e inorgánico (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), así como la toxicidad de la composta en la germinación de 15 especies hortícolas. La respiración microbiana (CO<sub>2</sub>) fue mayor en el método AM en comparación con el método AF. A 20, 40 y 60 días se observó 3.2, 2.8 y 1.5 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de composta seca (c.s.) y 2.8, 1.4 y 1.2 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> c.s., respectivamente. La población de *Escherichia coli* decreció de 13.3 x 10<sup>2</sup> UFC al inicio del experimento a 1.6 UFC g<sup>-1</sup> c.s. en el método AF y a 0 UFC g<sup>-1</sup> c.s. en AM. El decremento en *E. coli* fue de 99.9% en AF y 100% en AM, a 100 días de composteo. A 60 días, las poblaciones de celulolíticos en AM fueron de 425 x 10<sup>4</sup> UFC g<sup>-1</sup> c.s. y disminuyeron (12.8 x 10<sup>4</sup> UFC g<sup>-1</sup> c.s.) al final del experimento (100 días); el método AF mostró 16 y 21 x 10<sup>4</sup> UFC g<sup>-1</sup> c.s. a 60 y 100 días, respectivamente. Las UFC de ligninolíticos disminuyeron a través del proceso de composteo. La composta producida por AF mostró menor toxicidad en todas las especies hortícolas probadas en comparación con la composta producida por AM. La composta de AF mostró 2.74% mayor nitrógeno total a 100 días del proceso, el método AM tuvo 2.45%. El N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no mostró una tendencia definida, sin embargo, el N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> fue mayor en AM (365 mg kg<sup>-1</sup>) que en AF (254 mg kg<sup>-1</sup>). La relación C:N se redujo de 10.7:1 al inicio del experimento a 7.9:1 y 8.8:1 en los métodos AF y AM, respectivamente.

<sup>1</sup>Instituto de Recursos Naturales, <sup>2</sup>Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

<sup>†</sup> Autor responsable (joel42ts@colpos.mx)

Recibido: Enero de 2002. Aceptado: Marzo de 2004.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 307-316.

**Palabras clave:** Aireación forzada, celulolíticos, amilolíticos, composta.

### SUMMARY

The effect of two aeration treatments on temperature, humidity, pH, electric conductivity, microbial respiration and dynamics of cellulolytic, lignolytic, starch decomposer, and *Escherichia coli* microbial populations in manure-oat straw compost was studied. Changes in total and inorganic nitrogen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) during composting and the toxicity of the compost on the germination of 15 species of vegetables were evaluated. The evaluated aeration treatments were forced (FA) and manual (MA). Microbial respiration was higher with MA than with FA. Values of 3.2, 2.8, and 1.5 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> dry compost were respectively recorded at 20, 40, and 60 days after the beginning of the experiment with MA. The values corresponding to the same periods of time with FA were 2.8, 1.4, and 1.2 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> dry compost, respectively. *E. coli* populations decreased from 13.3 x 10<sup>2</sup> colony-forming units (UFC) g<sup>-1</sup> dry compost, at the beginning of the experiment, to 1.6 CFU g<sup>-1</sup> dry compost with FA and to 0 CFU g<sup>-1</sup> dry compost with MA at the end of the experiment; there was a decrease of 99.9% in the case of FA and 100% in that of MA. Cellulolytic microbial populations decreased from 425 x 10<sup>4</sup> CFU g<sup>-1</sup> dry compost at day 60 to 12.8 x 10<sup>4</sup> CFU g<sup>-1</sup> dry compost at the end of the experiment (day 100). In compost produced with FA the populations were 16 and 21 x 10<sup>4</sup> CFU g<sup>-1</sup> dry compost at days 60 and 100, respectively. The lignolytic microbial populations decreased during the composting process. FA composted was less toxic for the germination of all evaluated vegetables compared with that produced with MA. At day 100, FA compost showed higher total nitrogen than MA compost, 2.74 versus 2.45%. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> did not exhibit a defined trend, in contrast with NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, which was higher in compost produced with MA, than in FA, 365 mg kg<sup>-1</sup> versus 254 mg kg<sup>-1</sup>. The C:N ratio decreased from 10.7:1 at the beginning of the experiment to 7.9:1 and 8.8:1 at

the end of the experiment in FA and MA, respectively.

*Index words:* Forced aeration, cellulolytic, starch-decomposer, compost.

## INTRODUCCIÓN

El manejo y control de la basura es uno de los principales problemas que tienen que resolver los asentamientos urbanos y semiurbanos. La generación de basura es constante; se calcula que cada persona genera 600 g diariamente y que, considerando 97 millones de habitantes en México, la producción de basura es de 58 200 t d<sup>-1</sup> en todo el país. De este total, la zona metropolitana de la Ciudad de México aporta un tercio del total (19 400 t d<sup>-1</sup>) y 50% (9700 t) de esta cantidad son desechos orgánicos (Lesur, 1998). Sumado a esto, los desechos orgánicos agropecuarios también representan un problema cuando no se manejan de manera adecuada, en ocasiones tales residuos se queman. En la actualidad, con las políticas de aprovechamiento de residuos, se reciclan papel, vidrio y plásticos. Los desperdicios orgánicos representan un problema al producir, durante el proceso de descomposición, olores indeseables, insectos y roedores, además de la contaminación de aguas subterráneas y del ambiente. Una forma de manejar y, a la vez, aprovechar los desperdicios de este tipo es mediante la descomposición aerobia de la materia orgánica, en la cual se provee de O<sub>2</sub> durante el proceso, y al final se obtiene un producto con valor agregado denominado composta. En este sentido, el composteo se define como un proceso biooxidativo de los residuos orgánicos en condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación, en la cual participan grupos microbianos, dependiendo de la etapa (mesofílica, termofílica, enfriamiento y maduración) del proceso (Hoitink y Kuter, 1986; Zucconi y Bertoldi, 1987).

Las compostas generadas a través de este proceso son materiales biológicamente estables que se pueden utilizar como abonos orgánicos, ya que incrementan el contenido de materia orgánica, la capacidad de almacenamiento de agua, la permeabilidad y la agregación del suelo (Brady y Weil, 1999). En la producción de compostas es importante considerar tres elementos; 1) rapidez del proceso y bajo consumo de energía, 2) calidad de un producto de para la agricultura y con valor fertilizante satisfactorio, y 3) inocuidad de la composta. Estos tres requerimientos

deben ser satisfechos simultáneamente para asegurar que la actividad sea económica y ecológicamente viable.

El composteo es una biotecnología atractiva en diferentes escalas, principalmente bajo el enfoque de sostenibilidad de sistemas productivos. Existen técnicas de composteo que pueden ser de gran utilidad en el manejo de grandes volúmenes de residuos orgánicos que permiten abaratar los costos del procesamiento. Por lo tanto, es necesario perfeccionar técnicas como el uso de aireación forzada (AF) en comparación con el composteo tradicional [aireación manual (AM)]. En el presente trabajo, el objetivo fue evaluar dos alternativas tecnológicas para el reciclaje de los residuos orgánicos, así como medir la dinámica de biotransformación de los desechos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se construyeron cuatro camas de concreto de 3 x 9 m de ancho x longitud, respectivamente; con 1% de pendiente. En la parte terminal del lado positivo a la pendiente, se construyó una canaleta para conducir el exceso de humedad y retornarlo a la pila de composta. Se utilizaron dos camas para cada tratamiento y cada cama se dividió en tres partes lo que resultó en seis repeticiones por tratamiento, con un diseño experimental completamente al azar. Para el tratamiento de AF se instaló un ventilador de tres caballos de fuerza (HP) y se conectaron tres conductos de 2 pulgadas en dos salidas de aire. En cada uno de los conductos de PVC, se realizaron orificios laterales de 4 mm de diámetro cada 10 cm, a través del espacio que ocupó la pila de composta. Dos de los conductos se colocaron a una altura de 15 cm del piso, mientras que una manguera corrugada se instaló en espiral en el centro a 50 cm de altura.

Los residuos orgánicos utilizados se obtuvieron del módulo de traspatio y de la granja lechera de la propia Institución. Estos desechos se utilizaron en las proporciones: 27% de estiércol y paja de cama de caprino, 13% paja de avena residual de la producción de *Pleurotus ostreatus* y 60% de estiércol bovino fresco. Las pilas de composteo se elaboraron mediante el acomodo de los materiales en capas de 15 cm. Primero se colocó estiércol caprino, posteriormente paja, después estiércol bovino y así sucesivamente hasta 1.15 m de altura. En cada capa, se regó con 30 L de agua; la humedad de las pilas se mantuvo entre 65 y 70%. Las pilas del método de AM se prepararon y manejaron con el mismo procedimiento. Las



dimensiones finales de las pilas fueron 7.3 x 1.95 x 1.15 m de longitud x ancho x altura, respectivamente.

La AF se realizó con el ventilador en periodos de 15 min de trabajo por 7 h y 45 min de reposo, cerrando el ciclo de 8 h, esto para los primeros 10 días del proceso. Los siguientes 20 días, la ventilación se proporcionó 15 min cada 24 h. Después de 30 días del proceso, la ventilación se realizó durante 15 min cada 48 h hasta el final del proceso. La modificación en la inyección de aire durante el proceso se debió a la disminución del volumen del material. El método de AM consistió en volteos con palas cada 15 días, a cada una de las pilas. Para esto, la capa externa de la pila se colocó en la parte interna, mientras que el material del centro quedara ahora en la parte externa de la misma.

Se realizaron cinco muestreos (cada 20 días), durante 100 días. Los muestreos se realizaron de la siguiente manera: se tomaron muestras compuestas de cuatro submuestras. Estas últimas se tomaron a diferente altura (20 cm, 40 cm, 60 cm y en la cima de la pila) y profundidad (15 cm hacia el interior de la pila). Las muestras se trasladaron al laboratorio y se procedió al análisis microbiano. En cada muestreo, se determinó pH en extracto de saturación (relación 1:2) (Ansorena, 1994). La conductividad eléctrica (CE) se midió (extracto 1:5 composta:agua) (Ansorena, 1994). Se evaluó la respiración microbiana por el método de Stotzky (1965), el resultado se expresa en g kg<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> de composta seca [g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de composta seca (c.s.)]. Se evaluaron *Escherichia coli* en medio de agar con eosina y azul de metileno (EMB) (Sharf, 1966), población de microorganismos amilolíticos en medio de agar nutritivo-almidón soluble (Pochón y Tardeux, 1962), celulolíticos (Suyama *et al.*, 1993) y ligninolíticos (Subba Rao, 1992). De estas poblaciones, se cuantificaron las unidades formadoras de colonias (UFC) de acuerdo con los que crecieron en el medio de cultivo específico para cada grupo microbiano (Clark, 1965). Se determinaron nitrógeno total (N<sub>t</sub>) con la técnica de macrokjeldahl y nitrógeno inorgánico (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) por el método de arrastre de vapor con MgO y aleación de Devarda (Al:Zn = 10:9.1) de acuerdo con Bremner (1965) y Etchevers (1992).

La madurez de la composta se determinó a través de una prueba de toxicidad, mediante el porcentaje de germinación de 15 especies de hortalizas (Ayuso *et al.*, 1996). Se probaron diferentes porcentajes de composta (composta de 100 días) diluida con arena: 100, 75, 50 y 0% composta. Las especies utilizadas

fueron: lechuga (*Lactuca sativa*), brócoli (*Brassica oleraceae* var. itálica), coliflor (*Brassica oleraceae* var. botrytis), frijol ejotero (*Phaseolus vulgaris*), calabaza (*Cucurbita pepo*), jitomate (*Lycopersicon esculentum*), tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*), cebolla (*Allium cepa*), betabel (*Beta vulgaris*), espinaca (*Spinacia oleracea* L.), perejil (*Petrocelinum crispum*), cilantro (*Coriandrum sativum* L.), acelga (*Beta vulgaris* L. subsp. *Cyca*), poro (*Allium* sp.) y zanahoria (*Daucus carota*). En esta prueba, se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones y los datos, generados durante el experimento, se analizaron estadísticamente y se sometieron a la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Humedad, pH, Conductividad Eléctrica y Temperatura de las Compostas

La humedad mostró variación en un intervalo de 65 y 72% a lo largo del proceso (Figura 1a). A 100 días se observó diferencia significativa entre ambos métodos (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ) con 72.2 y 64.5% en AF y AM, respectivamente. La humedad del sustrato es muy importante, ya que la actividad microbiana y los procesos de oxidación requieren de la disponibilidad de agua; a este respecto, MacGregor *et al.* (1981) mencionaron que en una pila de 6 m<sup>3</sup> de material y 76% de humedad, a 15 días su humedad decrece hasta 22%, por lo que es muy importante suministrar agua a la pila de manera constante. Dalzell *et al.* (1991) mencionaron que el composteo tradicional necesita humedad de 40 a 65%; sin embargo, el porcentaje de humedad varía de acuerdo con el tipo de material que se utilice.

El pH determina el crecimiento de determinados grupos microbianos. A 27 días del proceso, el método AF mostró diferencia significativa con respecto al método AM. En esta fecha, el pH del método AF mostró 8.19 mientras que el método AM tuvo 9.38; este último se incrementó con respecto al pH inicial (9.2) (Figura 1b). Inbar *et al.* (1993) observaron un incremento del pH en el composteo de estiércol bovino durante las primeras cinco semanas y en la semana 19 el pH bajó a 6.7. Esto probablemente se debe a la volatilización de compuestos que contienen hidrógeno, como el amoníaco (Bertoldi *et al.*, 1985; Korner y Stegmann, 1998). Durante el composteo, la CE fluctuó entre 4.02 y 13.62 dS m<sup>-1</sup>. De los dos

métodos estudiados, se observó que después de 30 días, el método AF tuvo menor CE que el método AM (Figura 1c). El material inicial mostró 8.21 dS m<sup>-1</sup>, mientras que la composta final tuvo 9.43 y 12.57 dS m<sup>-1</sup> en los métodos AF y AM, respectivamente. La CE en el método AM se debe principalmente a la fuente de los desechos, ya que éstos se originaron de una zona salina-sódica, donde el pH es de 8.7 y la CE es aproximadamente de 12 dS m<sup>-1</sup>. A este respecto, Santamaría-Romero y Ferrera-Cerrato (2002) observaron una CE entre 8 y 10 dS m<sup>-1</sup> en compostas obtenidas de estiércol cunícola y pasto de poda de jardines, mientras que Corlay *et al.* (1999) mencionaron que la CE de compostas producidas en el área del Colegio de Postgraduados fluctuaron entre 8 y 18 dS m<sup>-1</sup>. Por otro lado, Hartz *et al.* (1996) observaron CE entre 8 y 15

dS m<sup>-1</sup> en compostas producidas con residuos orgánicos municipales.

La dinámica de la temperatura durante el desarrollo del composteo mostró un decremento a través del tiempo. El método AM tuvo temperaturas superiores durante todo el proceso, los decrementos (40 °C) que se observaron periódicamente correspondieron a los volteos (15 días) (Figura 1d). El método AF mostró temperaturas alrededor de 60 °C en los 10 primeros días, sin embargo, a través del proceso la línea de tendencia tuvo pendiente negativa. Esto quiere decir que el método AF tuvo una etapa termofílica intensa en la etapa inicial (15 días) y, por el contrario, el método AM mostró una etapa termofílica más prolongada, debido a los volteos y a la mezcla de residuos en menor y/o mayor grado de descomposición. A este respecto, Stentiford *et al.*

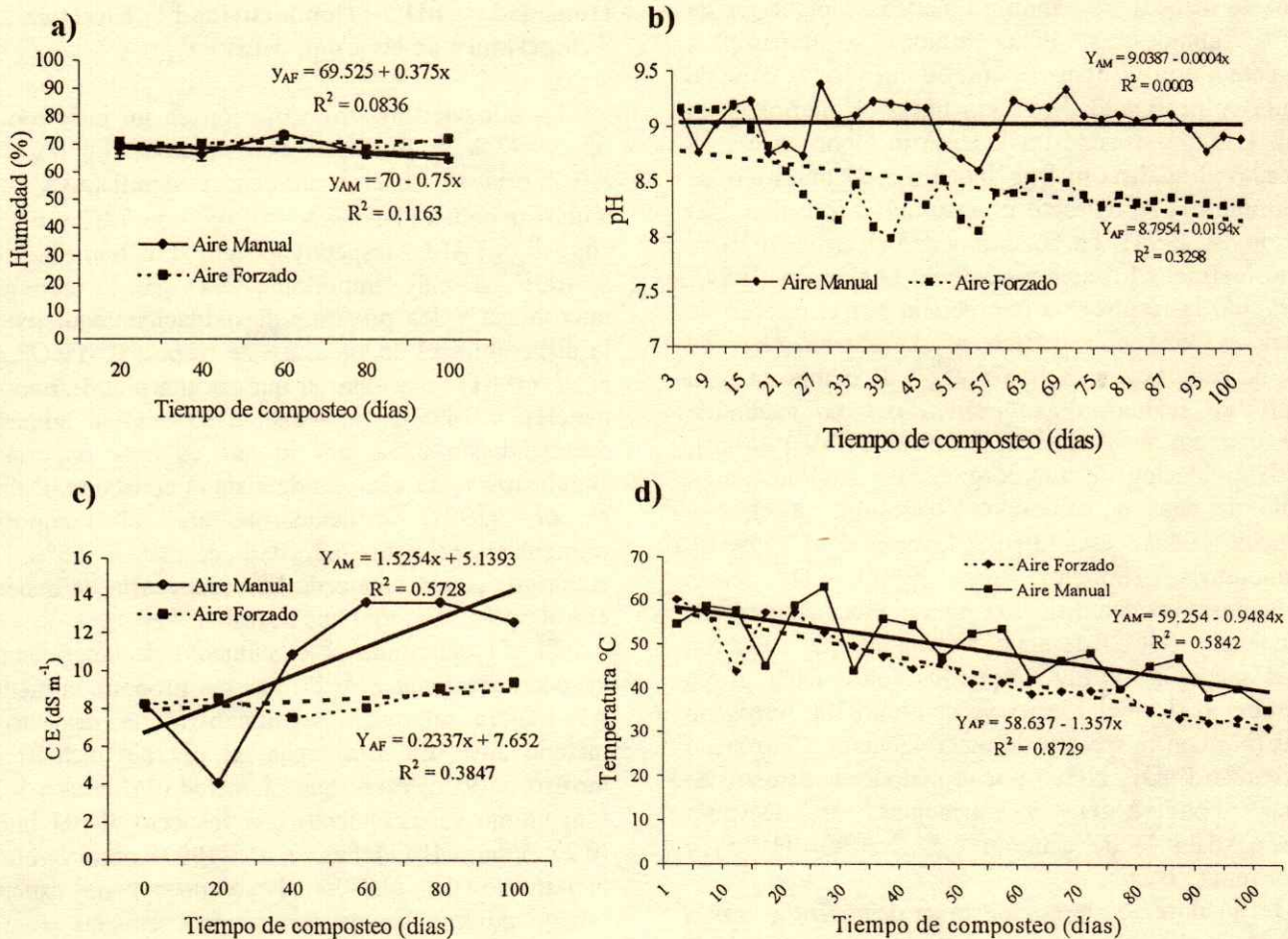


Figura 1. a) Porcentaje de humedad b), pH c), conductividad eléctrica, d) temperatura durante el composteo. Se muestran las líneas de tendencia y la ecuación de regresión de ambos tratamientos.

(1985) mencionaron que la actividad de los microorganismos se inhibe fuertemente cuando la temperatura excede 60 °C, el intervalo de temperaturas para un composteo óptimo varía de 45 a 60 °C.

### Evolución de CO<sub>2</sub> durante el Proceso de Composteo

Se observaron diferencias significativas a 20, 40 y 60 días del proceso de composteo. El método AF mostró menor producción de CO<sub>2</sub> (Figura 2). En las pilas de composteo, se observó la proliferación de cuerpos fructificantes de macromicetos, principalmente del género *Coprinus*. A este respecto, Alexander (1994) mencionó que la flora fúngica libera menos CO<sub>2</sub> por unidad de carbono transformado aeróbiamente que los otros grupos microbianos, ya que los hongos son más eficientes en su metabolismo y a mayor eficiencia de los organismos, es menor la cantidad de productos orgánicos y CO<sub>2</sub> liberados. En el método AF, la actividad microbiana más importante se observó entre los primeros 15 días, esto debido al suplemento óptimo de O<sub>2</sub>. Kiyohiko *et al.* (1984) mencionaron que en el composteo de lodos de desechos, la tasa de evolución de CO<sub>2</sub> se atribuyó principalmente a las bacterias termofílicas en la etapa inicial a 60 °C y actinomicetos termofílicos en etapas posteriores. Haimi y Huhta (1987) mencionaron que en el composteo de lodos, desechos de hogares, podas de jardín y mantillo, la producción de CO<sub>2</sub> fue mayor en las etapas iniciales del composteo (20 días) en comparación con las etapas mesofílica y maduración.

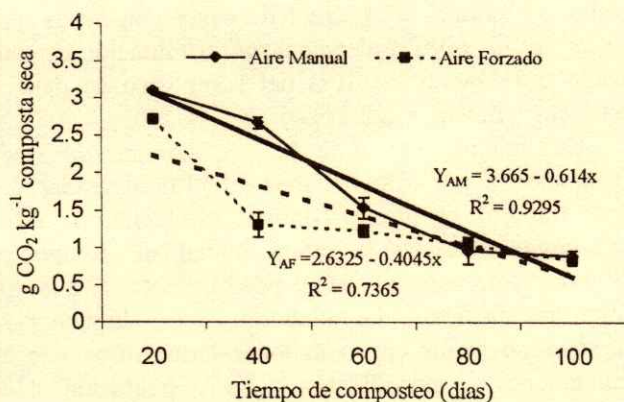


Figura 2. Evolución de CO<sub>2</sub> a través del proceso de composteo. Se muestran las líneas de tendencia y la ecuación de regresión de aireación manual (AM) y aireación forzada (AF) ( $y = g \text{ CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ ,  $x = \text{tiempo}$ ).

De acuerdo con la tendencia de los resultados, en la presente investigación se observó una tendencia similar, ya que a mayor temperatura, mayor producción de CO<sub>2</sub>.

Los materiales carbonados se degradan conforme transcurre el tiempo, dependiendo de la complejidad de su estructura. Sin embargo, los materiales carbonados más simples son los que se rompen en primer lugar y sirven de sustrato para los microorganismos; esto incrementa la biomasa microbiana en las etapas tempranas, mientras que para las etapas posteriores, los materiales son más complejos y los microorganismos que los atacan son más específicos y menos abundantes. Alexander (1994) mencionó que la producción de CO<sub>2</sub> por día, en suelo es en general de 0.005 a 0.05 g de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo; sin embargo, pueden encontrarse casos de hasta 25 g de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo d<sup>-1</sup>. En el presente trabajo, se observaron valores de 3.5 g de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> c.s. Santamaría-Romero y Ferrera-Cerrato (2002) observaron valores de 2.5 g de CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> c.s., en composteo con temperaturas alrededor de 22 °C.

### *Escherichia coli*

Al inicio del composteo, el material tuvo 13.3 x 10<sup>2</sup> UFC g<sup>-1</sup> c.s. de *E. coli*. La composta final mostró 1.6 UFC g<sup>-1</sup> c.s. en el método AF, mientras que en el método AM no se observó crecimiento de *E. coli* (Figura 3). Esto indica un decremento de 99.9% en el método AF y la desaparición total de esta enterobacteria en el método AM. Baines *et al.* (1985) mencionaron la desaparición total de patógenos en el tratamiento de residuos donde hay una etapa termofílica, ya que la mayoría de estos microorganismos no toleran temperaturas altas. En el tratamiento anaerobio de porqueraza, dicho investigador observó la sobrevivencia de 2% de *Salmonella* después de 10 días a 35 °C, mientras que, en condiciones aerobias a 15 °C, 90% de la *Salmonella* murió en dos días y 99% en 7.6 días de tratamiento; sin embargo, a 50 °C la tasa de mortalidad de esta bacteria puede incrementarse.

Ranalli *et al.* (2001) reportaron que *E. coli* y *Salmonella* sp. desaparecen totalmente de residuos agrícolas y lodos después de cinco meses de composteo. Por otro lado, en condiciones anaerobias, Soria (2000) mencionó que en excreta de cerdo de 9 x 10<sup>11</sup> número más probable (NMP) en 100 mL, a 50 días de tratado el material a través de composteo anaerobio (biodigestores), los coliformes totales se

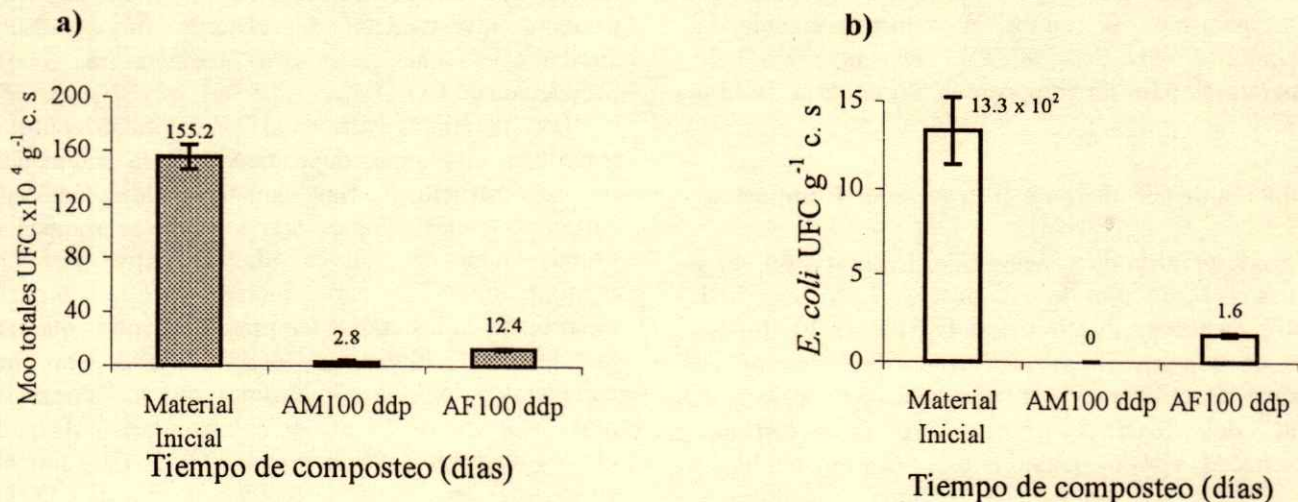


Figura 3. Microorganismos totales crecidos en el medio EMB a) *E. coli*, b) al inicio y al final del proceso de composteo en los métodos de aireación manual (AM) a 100 días después de instaladas las pilas (AM100ddp) y aireación forzada (AF) a 100 días después de instaladas las pilas (AF100ddp).

eliminaron completamente. Las enterobacterias son bacterias con hábitat intestinal y son facultativamente fermentadoras por lo que, en condiciones no óptimas para su desarrollo, las poblaciones tienden a decrecer; más aún cuando los desechos son composteados, las altas temperaturas y las condiciones de aireación afectan directamente las poblaciones de *E. coli* (Guinea *et al.*, 1979).

#### Microorganismos Degradadores de Almidón, Celulosa y Lignina

A 80 días, el método AF mostró mayor UFC de microorganismos con actividad amilolítica con respecto al método AM. Al final del proceso, ambos métodos tuvieron  $3.33 \times 10^5$  UFC g<sup>-1</sup> c.s. (Figura 4a). En otras investigaciones, se han observado resultados similares; Corlay *et al.* (1999) observaron  $11 \times 10^4$  UFC g<sup>-1</sup> c.s. a 100 días del proceso de composteo de estiércol + pajas + desechos hortícolas. Los amilolíticos tienden a incrementar de 20 a 80 días y disminuyen fuertemente a 100 días (Figura 4a), esto último debido probablemente al agotamiento del almidón presente en el sustrato. El grupo microbiano que degrada celulosa incrementó su población a 60, 80 y 100 días del proceso, sin embargo, no mostró diferencias significativas entre tratamientos. Se observó mayor UFC de celulolíticos en AM que en AF a 20, 40 y 60 días, aunque, en AF, los celulolíticos se incrementaron al final del composteo.

Estos resultados se deben posiblemente a los factores, tanto de pH, como de CE, ya que al inicio del experimento el pH fue de 9.2, a 60 días del proceso el pH de la composta en AM fue de 9.0, mientras que en AF fue 8.5. Esta condición favoreció el grupo de microorganismos celulolíticos. La abundancia de este grupo durante el composteo se debe también a que la celulosa y hemicelulosa son los compuestos más abundantes en los desechos utilizados (Palm y Rowland, 1997). Por otro lado, Santamaría-Romero y Ferrera-Cerrato (2002) no observaron cambios significativos en las poblaciones de microorganismos celulolíticos en el composteo de podas de jardines y estiércol de conejo, mientras que Corlay *et al.* (1999) mencionaron disminución de este grupo microbiano a través del composteo de paja + estiércol + desechos agrícolas.

La lignina es uno de los compuestos más complejos y, por lo tanto, más difícil de degradar. En este trabajo, se observó mayor población de estos microorganismos en la etapa inicial de composteo (Figura 4c), esto se debe posiblemente a que los microorganismos degradadores de lignina se desarrollan mejor en condiciones termofílicas que en condiciones mesofílicas. La población de ligninolíticos a través del composteo no mostró diferencias significativas entre métodos y la tendencia observada fue un fuerte decremento a través del tiempo. Con respecto a este grupo microbiano, Alexander (1994) mencionó que los grupos más

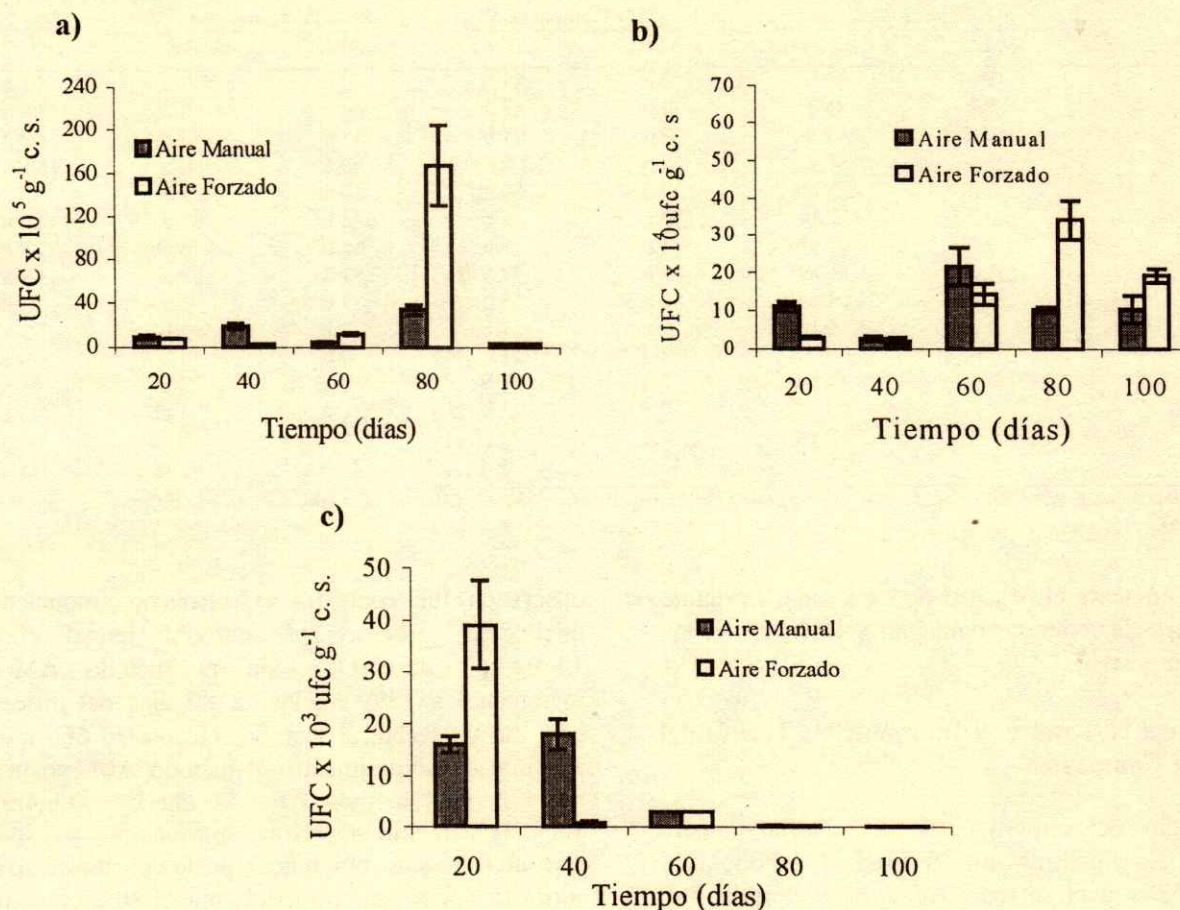


Figura 4. Microorganismos degradadores de almidón: a) celulosa; b) lignina y c) en compostas producidas por los métodos de aireación manual (AM) y aireación forzada (AF).

estudiados en la degradación de este compuesto son los hongos superiores y que, además, el grado de descomposición de la lignina está afectada por factores como temperatura, disponibilidad de nitrógeno, anaerobiosis y por los constituyentes de los materiales orgánicos en descomposición.

#### Prueba de Fitotoxicidad

Se observó mayor porcentaje de germinación en composta de AF que en composta de AM (Cuadro 1). A 100 días, la composta de AF mostró menor pH (8.3) y CE (9.43) que aquella producida por el método AM (pH de 8.9 y CE de 12.57 dS m<sup>-1</sup>). Al respecto, Hartman y Kester (1997) mencionaron que la mayoría de las semillas germinan en pH de 5.5 a 7.5. Ayuso *et al.* (1996) obtuvieron 20% de germinación (*Lepidium sativum*) en residuos municipales frescos y 80% de

germinación cuando los residuos se compostaron. No se recomienda utilizar compostas a 100% como sustratos para germinar o crecer plantas, ya que tienen efectos negativos sobre el desarrollo de las mismas (Verdonk *et al.*, 1985). Es recomendable que, en el caso de germinar semillas con composta, estos materiales deben ser debidamente compostados.

De acuerdo con el trabajo realizado, se recomienda utilizar hasta 50% de composta del método AF para germinar lechuga, brócoli, coliflor, frijol, calabaza, jitomate, tomate de cáscara, cebolla y betabel. Con estos resultados puede decirse que a través del método AF se suministró suficiente cantidad de O<sub>2</sub> a las pilas de composteo y se intensificó el proceso de oxidación. Esto resultó en una composta más estable en comparación con la composta producida por el método AM; no obstante, las investigaciones sobre composteo giran en torno a

**Cuadro 1. Porcentaje de germinación de 15 especies con distintos porcentajes de composta como sustrato.**

Especie	100% composta <sup>†</sup>		75% Composta		50% Composta		Testigo <sup>‡</sup>
	AM	AF	AM	AF	AM	AF	
Lechuga	0 c	59 b	0 c	55 b	0 c	97 a	91 a
Brócoli	28 c	88 a	60 b	87 a	80 a	90 a	95 a
Coliflor	0 d	5 d	0 d	64 b	17 c	80 a	68 b
Frijol	82.5 a	90 a	55 b	92.5 a	90 a	90 a	92.5 a
Calabaza	2.6 d	52.5 cb	0 d	60 ab	60 ab	72.5 a	35 c
Jitomate	0 c	2 bc	0 c	9 b	2 bc	87 a	80 a
Tomate	0 d	77 ab	24 c	71 b	65 b	78 ab	88 a
Cebolla	4 c	89 a	39 b	89 a	81 a	89 a	87 a
Betabel	2 c	64 a	37 b	65 a	39 b	72 a	33 b
Espinaca	0 c	9 bc	0 c	7 bc	2 bc	12 b	72 a
Perejil	0 d	0 d	0 d	11 c	0 d	40 b	70 a
Cilantro	0 c	13 bc	0 c	15 b	0 c	25 b	48 a
Zanahoria	0 c	2.4 c	0 c	22 b	0 c	34 ab	43 a
Poro	0 d	29.2 cd	4 d	70 ab	18 d	56 cb	94 a
Acelga	4 cd	30.9 bc	43 b	0 d	26 bcd	41 b	85 a

<sup>†</sup> AM = aireación manual, AF = aireación forzada. <sup>‡</sup> = germinación en papel filtro. Letras iguales en la misma fila son estadísticamente iguales entre sí (Tukey,  $\alpha=0.05$ ).

hacer más eficiente el proceso de oxidación, mediante el suministro de oxígeno, humedad y nitrógeno a las pilas de composteo.

#### Dinámica del N Total y N Inorgánico a Través del Proceso de Composteo

Al inicio del experimento, el material mostró 2.45% de  $N_t$ , mientras que al final el método AM mostró 2.52% y el método AF 2.74% (Figura 5a). La Agencia del Medio ambiente para el Mantenimiento de la Energía (ADEME) mencionó que el  $N_t$  en compostas de residuos orgánicos del campo van de 1 a 2.4% con media de 1.5 (Wiar, 1994). En el presente experimento, se observaron contenidos de  $N_t$  mayores que el límite máximo (2.4%), esto se debe posiblemente al predominio de estiércol en el sustrato original y a la estrecha relación C/N (10.7) observada en el material inicial. Santamaría-Romero y Ferrera-Cerrato (2002) mencionaron que el contenido de  $N_t$  en el composteo de estiércol de conejo y pasto disminuyó de acuerdo con el tamaño de la pila, el contenido inicial fue de 2.1% y después de cuatro meses de composteo, este porcentaje decreció a 1.7%. Con respecto al contenido de  $N_{inorgánico}$  ( $NH_4^+$  y  $NO_3^-$ ) se observó que el  $N-NH_4^+$  en el método AF mostró más  $mg\ kg^{-1}$  a 20 días del proceso. Decreció a 40 y 60 días, mientras que, a 80 y 100 días, nuevamente superó al método AM (Figura 5b). Al final del composteo, se observaron valores de  $109\ mg\ kg^{-1}$  para el método AF y  $88\ mg\ kg^{-1}$  para AM. Para el caso de  $N-NO_3^-$ , la dinámica

observada fue contraria al nitrógeno amoniacal. Al inicio del proceso, el material inicial contenía  $12\ mg\ kg^{-1}$  de  $NO_3^-$ , con el método AM éste incrementó a  $1399\ mg\ kg^{-1}$  a 80 días del proceso; a esta misma fecha, el método AF mostró  $666\ mg\ kg^{-1}$ . Al final del experimento, el método AM mostró  $365\ mg\ kg^{-1}$  y el método AF  $254\ mg\ kg^{-1}$  (Figura 5c). La tendencia que siguieron estos compuestos muestra que el nitrógeno amoniacal posiblemente se oxidó a nitratos, por lo que, a medida que el  $NH_4^+$  se oxidó, el  $NO_3^-$  se incrementó en el sustrato. Shirley (1995) mencionó que la concentración de  $N-NO_3^-$  en las compostas debe ser menor que  $300\ mg\ kg^{-1}$ . De acuerdo con este valor, el método AF estuvo dentro del intervalo aceptable de  $NO_3^-$ , mientras que la composta del método AM sobrepasó dicho límite, ya que presentó  $365\ mg\ kg^{-1}$ .

De manera general, se dice que el N decrece con el composteo. Al respecto, Schen-QiRon *et al.* (1997) mencionaron un decremento del N en un intervalo de 20 a 60% con respecto al contenido inicial, a través de la emisión a la atmósfera como  $NH_3$ ,  $N_2$ ,  $N_2O$  y  $NO$  y pérdidas a la hidrósfera (lixiviación de  $NO_3^-$ ). Se mencionó que en una pila de AF, la pérdida de  $N_2O$  es cuatro veces mayor que en pilas de composteo sin aire forzado. En el presente experimento no ocurrió lo observado por Schen-QiRong *et al.* (1997) ya que, al final del experimento, se observó mayor N total que al inicio (Figura 5a). García *et al.* (1991) observaron alto contenido de amonio en las etapas tempranas del composteo y observaron nitratos en la composta madura. Estos investigadores mencionaron que una

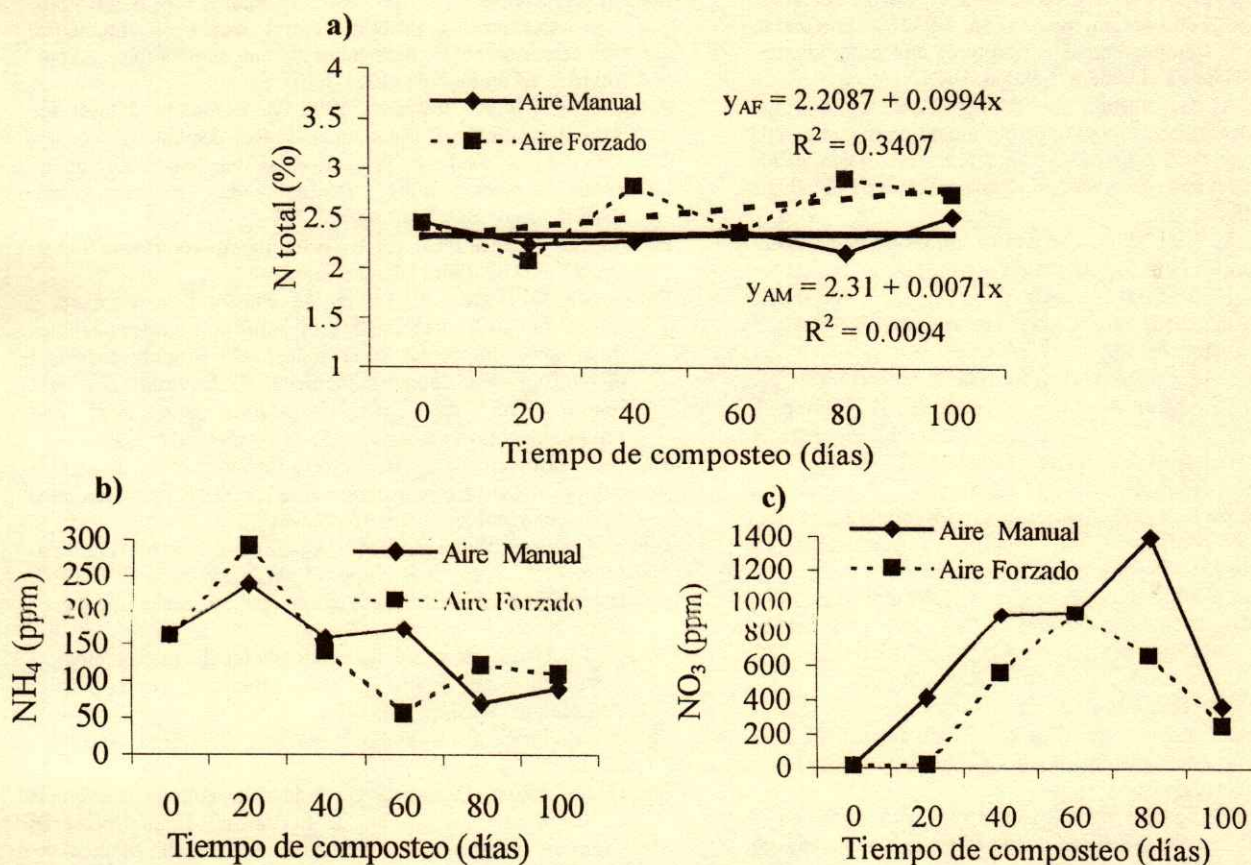


Figura 5. Dinámica del N total: a) inorgánico N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>; b) N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y c) en los métodos aireación manual (AM) y aireación forzada (AF) durante el composteo. En N<sub>t</sub> se muestra la línea de tendencia y la ecuación de regresión ( $y = \%N$ ,  $x =$  tiempo).

tasa alta de amonio al inicio del composteo de residuos puede deberse a su alta cantidad inicial de aminoácidos y proteínas, los cuales son descompuestos por los microorganismos en las primeras semanas de composteo, favoreciendo la amonificación; por su parte, los NO<sub>3</sub><sup>-</sup> que se formaron durante el proceso de composteo, sólo se presentaron en la composta madura posiblemente como una consecuencia de la mineralización de N-orgánico a NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y su oxidación a NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

## CONCLUSIÓN

La inyección de aire a las pilas de composteo es una alternativa tecnológica en el manejo de los residuos orgánicos, debido a que acelera la madurez de la composta, esto de acuerdo con las pruebas biológicas y químicas que se realizaron. La actividad microbiana medida a través de la evolución de CO<sub>2</sub> fue mayor en el método aireación manual (AM) en comparación con el método aireación forzada (AF) a

20, 40 y 60 días del proceso, con valores de 3.2, 2.8 y 1.51 g de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de composta seca y 2.8, 1.35 y 1.2 g de CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de composta seca, respectivamente. Ambos métodos de composteo mostraron un decremento de *E. coli* de 99.9% en el método AF y 100% en el método AM. Los grupos microbianos degradadores de almidón y celulosa se incrementaron durante el composteo, mientras que los degradadores de lignina disminuyeron. La composta producida por el método AF mostró menor fitotoxicidad que la obtenida por el método AM y el mejor sustrato para germinar fue cuando se utilizó 50% de composta.

## LITERATURA CITADA

- Alexander, M. 1994. Introducción a la microbiología del suelo. 2ª reimpression en español. AGT Editor. México, D.F.
- Ansorena, M.J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Ayuso, R.M., J.A. Pascual, C. García y T. Hernández. 1996. Evaluation of urban wastes for agricultural use. Soil Sci. Plant Nutr. 42: 105-111.

- Baines, S., I.F. Svoboda y M.R. Evans. 1985. Heat from anaerobic treatment of liquid animal wastes. pp. 146-160. *In: Gasser, J.K.R. (ed.). Composting of agricultural and other wastes.* Elsevier Science Publishers. London, UK.
- De Bertoldi, M., G. Vallini, A. Pera y F. Zucchini. 1985. Technological aspects of composting including modeling and microbiology. pp. 27-40. *In: Gasser, J.K.R. (ed.). Composting of agricultural and other wastes.* Elsevier Science Publishers. London, UK.
- Brady, N.C y R.R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. 12ª ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. *In: Black, C.A. (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. Part 2.* American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Clark, F.E. 1965. Agar plate method for total microbial count. pp. 1460-1466. *In: Dinaver, R.C., K. Gates E., D. Buxton R. (Eds.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. Part 2.* American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Corlay, Ch.L., R. Ferrera-Cerrato, J.D. Etchevers B., A. Echegaray A. y J. Santizo R. 1999. Cinética de grupos microbianos en el proceso de producción de composta y vermicomposta. *Agrociencia 33: 375-380.*
- Dalzell, H.W., A.J. Bidlestone, K.R. Gray y K. Thurairajan. 1991. Manejo del suelo: Producción y uso del compost en ambientes tropicales y subtropicales. *Boletín de Suelos 56.* Food and Agricultural Organization. Roma, Italia.
- Etchevers B., J.D. 1992. Manual de métodos para análisis de suelo, planta, aguas y fertilizantes. Análisis rutinarios en estudios y programas de fertilidad. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- García, C., T. Hernández y F. Costa. 1991. The influence of composting on the fertilizing value of an anaerobic sewage sludge. *Plant Soil 136: 269-272.*
- Guinea, J., J. Sancho y R. Parés. 1979. Análisis microbiológico de aguas. Aspectos aplicados. Omega. Barcelona, España.
- Haimi, J. y V. Huhta. 1987. Comparison of compost produced from identical wastes by "vermistabilization" and conventional composting. *Pedobiología 30: 137-144.*
- Hartman, T.H. y D.E. Kester. 1997. Propagación de plantas. Editorial Continental. México, D.F.
- Hartz, T.K., F.J. Costa y W.L. Schrader. 1996. Suitability of composted green waste for horticultural uses. *HortScience 31: 961-964.*
- Hoitink, H.A.J. y G.A. Kuter. 1986. Effects of composts in growth media on soil borne pathogens. pp. 289-306. *In: Chen, Y. y Avnimelech (eds.). The role of organic matter in modern agriculture.* Martinus Nijhoff. Dordrecht, The Netherlands.
- Inbar, Y., Y. Hadar y Y. Chen. 1993. Recycling of cattle manure: The composting process and characterization of maturity. *J. Environ. Quality 22: 857-863.*
- Kiyohiko, N., M. Sasaki, M. Shoda y H. Kubota. 1984. Change in microbial numbers during thermophilic composting of sewage sludge with reference to CO<sub>2</sub> evolution rate. *Appl. Environ. Microbiol. 49: 37-41.*
- Korner, I. y R. Stegmann. 1998. Influence of biowaste composition and composting parameters on nitrogen dynamics during composting and on nitrogen contents in compost. *Acta Hort. 469: 97-109.*
- Lesur, L. 1998. Manual del manejo de la basura: Una guía paso a paso. Trillas. México, D.F.
- MacGregor, S.T., F.C. Miller, K.M. Psarianos y M.S. Finstein. 1981. Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. *Appl. Environ. Microbiol. 41: 1321-1330.*
- Palm, C.A. y A.P. Rowland. 1997. A minimum dataset for characterization of plant quality for decomposition. pp. 379-392. *In: Kadisch, G. y K.E. Giller (eds.). Driven by nature, plant litter quality and decomposition.* CAB-International. Wallingford, UK.
- Pochón, J.P. y L. Tardeux. 1962. Technique microbiologie du sol. De la Tourelle. Saint Mande, France.
- Ranalli, G., G. Bottura, P. Taddei, M. Garavani, R. Marchetti y C. Sorlini. 2001. Composting of solid and sludge residues from agricultural and food industries. Bioindicators and monitoring and compost maturity. *J. Environ. Sci. and Health. Part A. Toxic Hazardous Substances and Environmental Engineering A36 (4): 415-436.*
- Santamaria-Romero, S. y R. Ferrera-Cerrato. 2002. Dinámica poblacional de *Eisenia andrei* (Bouché 1972) en diferentes residuos orgánicos. *Terra 20: 303-310.*
- Schenk-QiRong, Wang-RuiBao, Wang-Yan, Xu-GuoHua, Yu-Ling, Q.R. Shen, R.B.Wang, Y. Wang y L. Xu-Yu. 1997. Biochemical Characteristics of composting. *J. Nanjing Agric. Univ. 20: 51-57.*
- Sharf, J.M. 1966. Recommended methods for the microbiological examination of foods. 2ª ed. American Public Health Association. Washington, DC.
- Shirley, C. 1995. Profit-making compost. *The New Farm 20: 22-26.*
- Soria F., M.J. 2000. Biotecnología de la utilización de las excretas de cerdo en la nutrición de hortalizas. Tesis Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Stentiford, E.I., D.D. Mara y P.L. Taylor. 1985. Forced aeration co-composting of domestic refuse and sewage sludge in static piles. pp. 42-54. *In: Gasser, J.K.R. (ed.). Composting of agricultural and other wastes.* Elsevier Science Publishers. London, UK.
- Stotzky, G. 1965. Microbial respiration. pp. 1550-1572. *In: Black, C.A. (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. Part 2.* American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Subba Rao, N.S. 1992. Biofertilizers in agriculture. Oxford & IBH Publishing. New Delhi, India.
- Suyama, K., H. Yamamoto, T. Naganawa, T. Iwata y H. Komada. 1993. A plate counts method for aerobic cellulose decomposers in soil by Congo red staining. *Soil Sci. Plant Nutr. 39: 361-365.*
- Verdonk, O., M.D. Boodt, P. Stradiot y R. Penninck. 1985. The use of tree bark and tobacco waste in agriculture and horticulture. pp. 203-215. *In: Gasser, J.K.R. (ed.). Composting of agricultural and other wastes.* Elsevier Science Publishers. London, UK.
- Wiar, J. 1994. Qualité et commercialisation des composts de déchets verts. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. Angers Cedex, France.
- Zucchini, F. y M. de Bertoldi. 1987. Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. pp. 30-50. *In: De Bertoldi, M., M.P. Ferranti, P. l'Hermite y F. Zucchini (eds.). Compost: Production, quality and use.* Elsevier Applied Society. Udine, Italy.



# REDUCCIÓN DE LA INCIDENCIA DE *Phytophthora capsici* Leo EN EL SISTEMA RADICAL DE PLÁNTULAS DE CHILE PRE-MICORRIZADAS CON *Glomus intraradices*

## Reduction of *Phytophthora capsici* Leo Incidence on *Glomus intraradices*-Premycorrhized Root System of Chili Seedlings

D. Espinosa-Victoria<sup>1†</sup>, D. González-Mendoza<sup>1</sup>, J. Placencia-de la Parra<sup>2</sup> y R. García-Espinosa<sup>3</sup>

### RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar el efecto de la pre-micorrización con el hongo *Glomus intraradices* en el sistema radical de plántulas de chile (*Capsicum annuum* L.) var. "Tres Lomos" infectadas con el patógeno *Phytophthora capsici*. Se realizaron ensayos a escala de microcosmos para determinar los cambios en arquitectura radical, variación en el número de lesiones producidas por el patógeno, así como en la actividad de las enzimas antioxidantes peroxidasa (PO) y catalasa (CAT). Las plántulas pre-micorrizadas presentaron menor número de raíces de 2º, 3er y 4º orden, así como disminución en el número de lesiones producidas por *P. capsici* a partir del tercer día de contacto con el patógeno, alcanzando el valor máximo de 70.2 lesiones y 23% de necrosis radical al doceavo día de la interacción. En contraste, las plántulas inoculadas sólo con *P. capsici* presentaron mayor número de raíces de 2º, 3er y 4º orden, así como mayor número de lesiones, que aumentó a partir del tercer día de contacto con el patógeno, alcanzando el valor máximo de 269.5 lesiones y 80% de necrosis radical al doceavo día de la interacción. Las plántulas pre-micorrizadas presentaron los valores más altos de actividad de la PO a lo largo del experimento, con un valor máximo de 4.62 U mg<sup>-1</sup> de tejido radical a 12 días de contacto con *P. capsici*. Por otro lado, la enzima CAT presentó los valores más altos de actividad en las plantas pre-micorrizadas a partir de seis días de contacto con el patógeno, alcanzando el valor máximo de 2.79 U mg<sup>-1</sup> tejido radical a nueve días de la interacción con el patógeno. La modificación de la

arquitectura radical, junto con el aumento de la actividad de las enzimas PO y CAT inducida por la pre-colonización de *G. intraradices*, resultaron en una menor severidad de la enfermedad así como en 100% de supervivencia de las plántulas de chile. Debido a que los resultados se obtuvieron a nivel de microcosmos, se sugiere realizar ensayos en invernadero con la finalidad de corroborar el papel de la pre-micorrización en el control de la enfermedad en *C. annuum*.

**Palabras clave:** *Capsicum annuum* L., hongos micorrizicos arbusculares, arquitectura radical, protección radical, actividad de enzimas anti-oxidantes.

### SUMMARY

The objective of the present work was to study the effect of pre-mycorrhization of *Glomus intraradices* on the root system of chili (*Capsicum annuum* L.) seedlings var. "Tres Lomos" infected by *Phytophthora capsici*. Microcosm assays were performed to determine changes in root architecture, variation in the number of pathogen lesions and the activity of the anti-oxidative enzymes peroxidase (PO) and catalase (CAT). A decrease in the number of roots of 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>, and 4<sup>th</sup> order as well as a decrease in the number of pathogen lesions starting on the third day of contact with the pathogen, with a maximum value of 70.2 lesions and 23% of necrosis at the end of the experiment were observed in pre-mycorrhized seedlings. In contrast, the seedlings treated with *P. capsici* alone exhibited an increase in the number of roots of 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>, and 4<sup>th</sup> order, 269.5 pathogen lesions and 80% necrosis 12 days after inoculation of the pathogen. Pre-mycorrhization also stimulated the greatest activity of the enzyme PO beginning on the third day of interaction with *P. capsici*, reaching its maximum value (4.62 U mg<sup>-1</sup> of tissue) at the end of the experiment. The activity of CAT in pre-mycorrhized seedlings increased after the sixth day of

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, <sup>3</sup> Instituto de Fitosanidad, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

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

<sup>2</sup> Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. México.

contact with *P. capsici*, exhibiting the maximum value (2.79 U mg<sup>-1</sup> tissue) on the twelfth day of the interaction. Pre-mycorrhization induced changes in the root architecture and elevated activities of PO and CAT enzymes on chili seedlings infected by *P. capsici*, which resulted in a decrease of disease severity and a 100% survival of seedlings. Because these results were obtained at microcosm level, it is suggested that greenhouse experiments be conducted to corroborate the role of pre-mycorrhization on disease control in *C. annuum*.

**Index words:** *Capsicum annuum* L., mycorrhizal fungi, root architecture, root protection, anti-oxidative enzyme activity.

## INTRODUCCIÓN

La marchitez fungosa debida a *Phytophthora capsici* Leo, junto con las enfermedades virales son los principales problemas para la producción de chile (*Capsicum annuum* L.) en México, lo cual resulta en pérdidas entre 40 y 50% de la producción total (Pozo, 1997). Para el manejo de la marchitez fungosa se emplean: a) agroquímicos, que generan elevados costos de producción, disminución de poblaciones microbianas benéficas del suelo, así como la contaminación de los agro-ecosistemas (Mora, 1988); b) variedades resistentes del hospedero, con el inconveniente de la expresión de variabilidad patogénica por parte del agente causal (Redondo, 1986); c) prácticas culturales, como buen drenaje, solarización, adición de mejoradores orgánicos y rotación de cultivos (Ristaino y Johnson, 1999); y d) microorganismos antagónicos (Xiao *et al.*, 2002). Otra alternativa para el manejo de *P. capsici* es el empleo de los hongos micorrizicos arbusculares (HMAs), los cuales establecen una asociación simbiótica mutualista con la mayoría de las plantas superiores e inducen tolerancia a diversos patógenos del suelo (Azcón-Aguilar y Barea, 1997). Los HMAs actúan como agentes de control biológico para patógenos como *Phytophthora* (Cordier *et al.*, 1998), *Fusarium* (Zambolim y Schenck, 1983), *Aphanomyces* (Rosendahl, 1985) y *Sclerotium* (Krishna y Bagyaraj, 1983). Básicamente, los HMAs protegen a la planta hospedera al mejorar su nutrición (Trimble y Knowles, 1995), produciendo sustancias bioprotectoras (Harrison y Dixon, 1993), sintetizando enzimas líticas (Pozo *et al.*, 1999) y al estimular a otros microorganismos de la rizósfera (Toro *et al.*,

1996). Sin embargo, estos microorganismos no se han aplicado de forma intensiva en la agricultura, debido a diferentes factores. Por ejemplo, el uso no controlado de agroquímicos, tanto fertilizantes como plaguicidas, reduce la eficacia de los HMAs en las plantas hospederas; por otro lado, el uso generalizado de monocultivos abate de manera significativa la biodiversidad microbiana (Vigo *et al.*, 2000). Por otro lado, el uso de los HMAs está limitado por la dificultad de identificar especies o cepas de HMAs cuya efectividad no se modifique por las prácticas agrícolas y cambios edafoclimáticos (Vigo *et al.*, 2000). El desarrollo de la enfermedad producida por *P. capsici* en Chile puede atribuirse a diversos factores: el número de sitios de infección presentes en el sistema radical, el grado de distribución del patógeno al interior de la raíz, la modificación de la arquitectura radical y el tiempo de interacción entre el hospedante y el patógeno (Ristaino, 1990; Adorada *et al.*, 2000). Es escasa la información relacionada con el biocontrol de *P. capsici* en el cultivo de Chile a través de HMAs. Existe sólo un trabajo (Trotta *et al.*, 1996) sobre el biocontrol de *P. parasitica* con HMAs en tomate, en el cual se atribuye la protección de la planta a la mejora de su estado nutricional; aunque no se explica la forma en que se realizó el biocontrol del patógeno. Por tal razón, el presente trabajo tuvo como objetivo estudiar el efecto de la pre-micorrización con *G. intraradices* en la modificación de la arquitectura y volumen radicales, número de lesiones producidas por el patógeno y la actividad de las enzimas antioxidantes peroxidasa (PO) y catalasa (CAT) en plántulas de Chile var. "Tres Lomos" infectadas con *P. capsici*.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Instalación del Microcosmos e Inoculación de *Glomus intraradices*

Semillas uniformes en peso y tamaño de Chile jalapeño var. "Tres Lomos", se desinfectaron superficialmente con una solución de hipoclorito de sodio (0.5%) durante 6 min. Después de tres enjuagues con agua destilada estéril, las semillas se colocaron dentro de cajas Petri que contenían papel filtro Whatman # 1 humedecido con agua destilada estéril. Posteriormente, a tres días de germinación, se transfirió una plántula por unidad experimental que consistió de un microcosmos tipo sandwich (Forbes *et al.*, 1996; Toro *et al.*, 1996). Cada microcosmos se

construyó con una caja Petri de plástico estéril (100 x 15 cm), a la que se le hizo un orificio de 0.5 cm de diámetro en el canto para introducir la radícula de la plántula y aplicar el riego. En condiciones asépticas, cada unidad se llenó con arena tratada previamente a 120 °C por 2 h. La unidad se selló para evitar la proliferación de microorganismos saprofitos y patogénicos en el sustrato. Los microcosmos se regaron con agua destilada estéril y aplicaciones semanales de solución nutritiva Long Asthon (Hewitt, 1966) modificada a una cuarta parte de su formulación para aplicar 16 µM de P/L. Treinta días después del trasplante en los microcosmos, 24 plántulas de chile se inocularon agregando 10 g de inóculo (raicillas con 60% de colonización y 1180 esporas) de *G. intraradices* cepa CPMex FS-18 al sustrato. Las plántulas de chile, inoculadas y sin inocular (testigos), se mantuvieron bajo 14 h de luz a 24 °C y 10 h de oscuridad a 20 °C a una humedad de 70%. La determinación de la colonización micorrízica se realizó a 7, 19 y 30 días después de la inoculación con el HMA, empleando la técnica de Phillips y Hayman (1970).

### Arquitectura Radical

La evaluación *in situ* de la arquitectura radical (número de raíces de 1er, 2º, 3er, 4º y 5º orden) (Norman *et al.*, 1996) se realizó en plántulas de chile inoculadas (8) y no inoculadas (8) con *G. intraradices* a 7, 19 y 30 días después de la inoculación con el HMA mediante el análisis de fotografías. Debido a su crecimiento, sólo en el caso de la última evaluación la arquitectura del sistema radical se determinó fuera del microcosmos.

### Multiplicación del Patógeno e Inoculación

La cepa de *P. capsici* CH-A se propagó en placas de papa-dextrosa-agar (PDA) a pH 4.5. Para promover la producción de zoosporas, cultivos de *P. capsici* de seis días de crecimiento se resuspendieron con 10 mL de agua estéril destilada. La solución obtenida fue filtrada con gasa estéril y llevada a un volumen final de 200 mL con agua destilada estéril. La suspensión se trató con un descenso rápido de temperatura (6 °C) durante 20 min para inducir la formación de zoosporas, seguida de 1 h de equilibrio a una temperatura de 28 °C (Ristaino, 1990). La solución de zoosporas obtenida se calibró a 2500 zoosporas mL<sup>-1</sup>

de agua estéril destilada, usando un hemocitómetro. La inoculación de las plántulas de chile con *P. capsici* se realizó a 30 días después de inoculación con *G. intraradices*. Plántulas pre-micorrizadas y no pre-micorrizadas se colocaron en recipientes estériles para cubrir completamente su sistema radical con 50 mL de la solución del patógeno durante 3.5 h. El sistema radical de las plántulas testigo se expuso a agua destilada estéril por 3.5 h. Posteriormente, todas las plántulas se colocaron nuevamente en los microcosmos con sustrato estéril y se mantuvieron en las condiciones señaladas en el apartado anterior. En este ensayo, se evaluaron tres tratamientos: 1) planta + *G. intraradices* + *P. capsici*; 2) planta + *P. capsici*; y 3) planta sin inocular (testigo). Se realizaron cinco muestreos destructivos (0, 3, 6, 9 y 12 días después de la inoculación del patógeno) evaluando ocho repeticiones por tratamiento, lo cual arrojó un total de 120 unidades experimentales.

### Severidad de la Enfermedad

La severidad de la enfermedad se evaluó cada tres días, después de la inoculación del patógeno en cuatro plántulas de cada tratamiento usando la escala de 1 a 9, propuesta por Adorada *et al.* (2000). La escala se basa en la longitud de la base del tallo afectado por la enfermedad en relación con la altura de la plántula; donde 0 = sin infección; 1 = marchita o amarilla; 2 = 1 a 5% de lesión; 3 = 6 a 25% de lesión; 4 = 26 a 50% de lesión; 5 = 51 a 60% de lesión; 6 = 61 a 70% de lesión; 7 = 71 a 80% de lesión; 8 = 81 a 90% de lesión; 9 = 91% de lesión o muerte. La severidad de la enfermedad (SE) se expresó como una proporción (porcentaje) de la altura total de la planta, de acuerdo con la fórmula propuesta por Adorada *et al.* (2000), la cual no requirió de transformación de datos:

$$SE (\%) = \frac{\text{suma de los valores de la enfermedad}}{(\text{número total valores})(\text{valor máximo enfermedad})} \times 100$$

### Número de Lesiones Producidas por el Patógeno

Las lesiones de color café características de la infección de *P. capsici*, observadas sobre el sistema radical (Ramírez y Cova, 1980), se cuantificaron cada tercer día después de la inoculación con el patógeno, con la ayuda de un microscopio estereoscópico en cuatro plántulas de cada tratamiento.

### Volumen Radical Total y Volumen Radical Necrosado

El volumen radical total de las plántulas de Chile se determinó por la cantidad de agua desplazada (mL) al sumergir el sistema radical completo en una probeta graduada, 1 h antes de la inoculación y a 12 días después de inocular con *P. capsici*. Para el cálculo del volumen radical necrosado se siguió el mismo procedimiento, pero en este caso sólo se sumergieron las secciones de raíz necróticas.

### Actividad de la Enzima Peroxidasa (PO)

El extracto de raíz para determinar la actividad de la enzima PO se obtuvo inmediatamente después de cada muestreo (0, 3, 6, 9 y 12 días después de la inoculación de *P. capsici*) de cuatro plántulas de cada tratamiento, de acuerdo con la técnica de Adorada *et al.* (2000). Muestras de tejido radical de 0.5 g se maceraron en un mortero, usando solución amortiguadora Tris-HCl 50 mM, pH 7.5 en proporción tejido:solución amortiguadora 1:4 (p/vol.). El macerado resultante se centrifugó a 12 000 g a 4 °C por 16 min. El sobrenadante se colocó en tubos Eppendorf de 1.5 mL de capacidad y se congeló a -70 °C hasta su uso. Las muestras de reacción se prepararon con 0.25 mL del extracto de raíz, 0.75 mL de solución amortiguadora de fosfato de sodio 50 mM, pH 7.5 y 1 mL de guayacol 10 mM. La reacción se inició con la adición de 1 mL de peróxido de hidrógeno 10 mM y se cuantificó por espectrofotometría a una  $\lambda$  de 470 nm.

La actividad enzimática se calculó con el coeficiente de extinción del tetraguayacol  $\text{min}^{-1}$  ( $26.6 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  a 470 nm). El blanco usado consistió de una solución amortiguadora de fosfato de sodio y guayacol.

### Actividad de la Enzima Catalasa (CAT)

El extracto de raíz para determinar la actividad de la enzima PO se obtuvo inmediatamente después de cada muestreo (0, 3, 6, 9 y 12 días después de la inoculación de *P. capsici*) de cuatro plántulas de cada tratamiento, de acuerdo con la técnica de Kremer (1970). Se homogeneizaron muestras de 0.5 g de raíces de Chile en un mortero con solución amortiguadora de extracción de fosfato de sodio-potasio 100 mM, pH 7.0; en proporción tejido:agua 1:4 (p/vol). El macerado se vertió en tubos Eppendorf

y se centrifugó a 12 000 g a 4 °C por 16 min. El sobrenadante se colocó en tubos de 1.5 mL de capacidad y se guardó a -70 °C hasta su cuantificación. Las muestras de reacción se prepararon adicionando 0.25 mL de peróxido de hidrógeno y 0.5 mL del extracto de raíz. La actividad de la CAT se determinó por descenso de la absorbancia a una  $\lambda$  de 240 nm (Aebi, 1984). La unidad de actividad enzimática se definió como la cantidad de enzima que descompone 1  $\mu\text{mol}$  de peróxido de hidrógeno  $\text{min}^{-1}$  a 25 °C y pH 7.0. El blanco consistió de una solución de fosfato de sodio-potasio y peróxido de hidrógeno.

### Análisis Estadístico

A todos los datos se les aplicó análisis de varianza y pruebas de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ), empleando el Sistema de Análisis Estadístico Versión 6.12 (SAS Institute, 1997).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Arquitectura Radical y Colonización Micorrízica

Las plántulas de Chile pre-colonizadas con *G. intraradices* presentaron reducción significativa en el número total de raíces a 7, 19 y 30 días (Figura 1a, b y c) después de la inoculación, a diferencia de las plántulas no pre-colonizadas. La reducción fue más evidente en las raíces de 2°, 3er y 4° orden; no obstante, las de 4° orden estuvieron ausentes en las plántulas colonizadas con el hongo micorrízico. Hooker y Atkinson (1992), empleando análisis de imágenes, observaron igualmente una reducción en la proporción de raíces de 2° orden en plántulas de álamo colonizadas con tres hongos micorrízicos. La colonización micorrízica total de las plántulas de Chile, determinada a 7, 19 y 30 días, fue de 16, 38 y 65%, respectivamente.

### Número de Lesiones Producidas por *P. capsici*

El sistema radical de las plántulas de Chile pre-micorrizadas presentó menor número de lesiones producidas por *P. capsici* (Cuadro 1), cuantificándose menos de la mitad de lesiones que en las raíces de plántulas no pre-micorrizadas a lo largo del experimento. Con base en estos datos, pudo observarse que a menor número de raíces en las plántulas micorrizadas, fue menor el número de

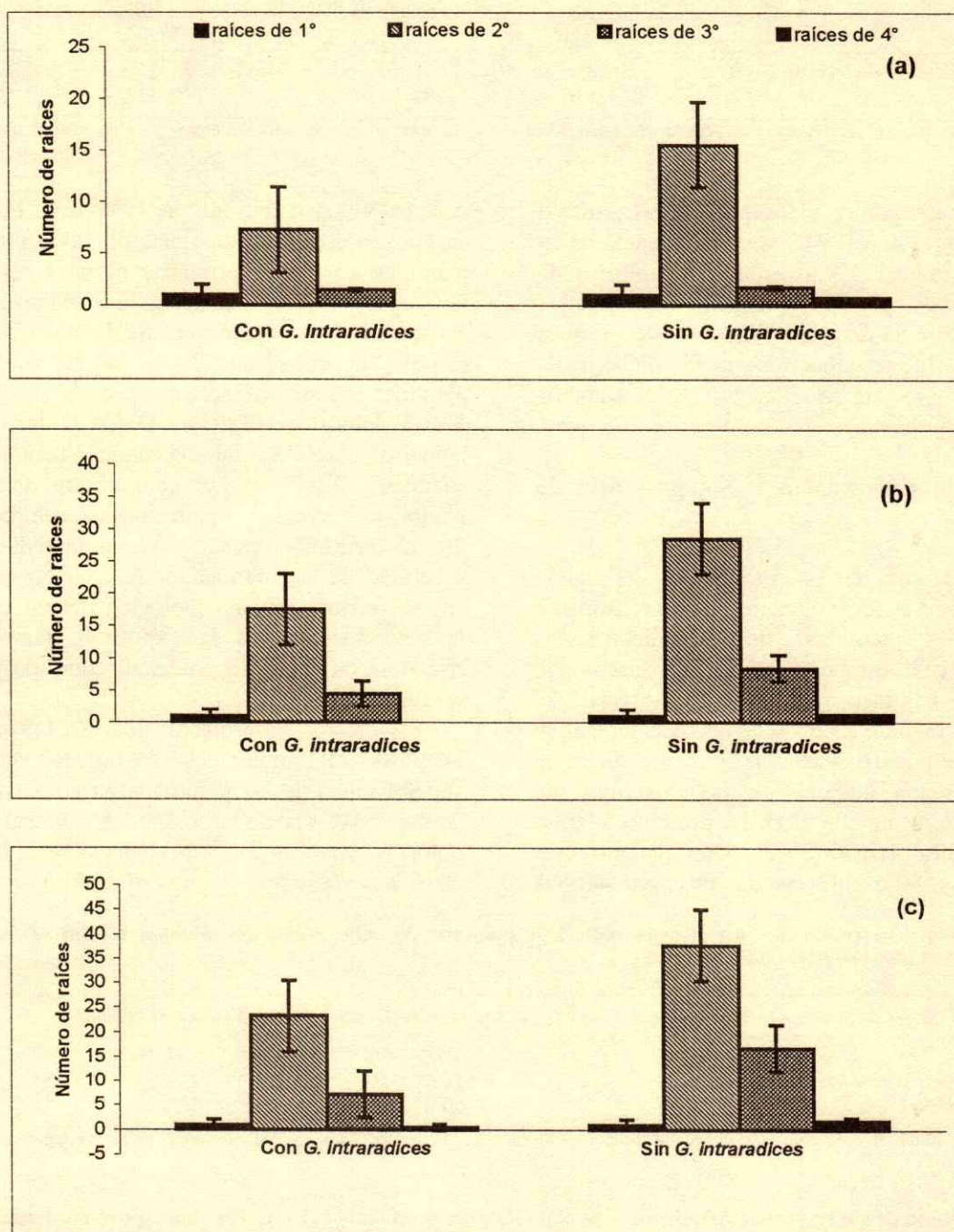


Figura 1. Arquitectura radical de plántulas de chile (*Capsicum annuum* L.) var. "Tres Lomos" determinada a 7 (a), 19 (b) y 30 (c) días después de la inoculación con *G. intraradices*. Cada dato corresponde a la media de ocho repeticiones. Las barras representan el error estándar de la media.

**Cuadro 1. Número de lesiones producidas por *Phytophthora capsici* en raíces de plántulas de Chile (*Capsicum annuum* L.) var. Tres Lomos pre-micorrizadas y no pre-micorrizadas con *Glomus intraradices*.**

Tratamiento	Días después de la inoculación de <i>P. capsici</i>			
	3	6	9	12
Plántula + <i>G. intraradices</i> + <i>P. capsici</i>	33.50 a	41.50 a	55.25 a	70.2 a
Plántula + <i>P. capsici</i>	84.25 b	84.25 b	139.50 b	269.5 b

Los valores son la media de observaciones en cuatro plántulas. Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

lesiones producidas por el patógeno. En este mismo sentido, Atkinson *et al.* (1994) observaron cambios en la arquitectura radical y variación en el número de lesiones causadas por el patógeno en plantas micorrizadas. Sin embargo, Vigo *et al.* (2000) reportaron que la disminución en el número de lesiones no siempre está relacionada con los cambios en la arquitectura radical.

#### Severidad de la Enfermedad y Supervivencia de Plántulas

En relación con el necrosamiento del tejido radical, se observó un volumen de necrosamiento mayor en las plántulas no pre-micorrizadas (Cuadro 2), lo cual estuvo directamente relacionado con un mayor volumen radical total. Al final del experimento, se registró 23.36% de necrosis radical en las plántulas pre-micorrizadas con *G. intraradices*; en cambio, el sistema radical de las plántulas no inoculadas previamente con el HMA presentó 89.03% de necrosamiento (Cuadro 2). Una colonización micorrizica de 65% resultó en una menor incidencia

de la enfermedad causada por *P. capsici*. Los síntomas de la enfermedad se hicieron evidentes en las plántulas no pre-micorrizadas después del tercer día de contacto con el patógeno, alcanzando al final del experimento un valor de 80% de severidad; en cambio, la manifestación de la enfermedad en las plántulas pre-micorrizadas fue sólo de 20% (Figura 2). Van Volpin *et al.* (1994) y Dixon y Harrison (1990) indicaron que la "inmunización" (acumulación de enzimas hidrolíticas y compuestos fenólicos) de plántulas contra patógenos debida a la pre-micorrización, puede explicar la reducción de la severidad de la enfermedad. Así, un próximo estudio en este mismo sistema biológico deberá centrarse en la determinación de la expresión, tanto de genes relacionados con patogenicidad, como de genes de la ruta fenilpropanoide.

El efecto bioprotector de *G. intraradices* se manifestó al término del experimento con 100% de supervivencia de las plántulas, en contraste con 20% de supervivencia de las plántulas tratadas sólo con el patógeno (Cuadro 3). Datos semejantes, obtenidos por otros autores como Vigo *et al.* (2000), reportan una

**Cuadro 2. Volumen y necrosamiento del sistema radical de plántulas de Chile (*Capsicum annuum* L.) var. Tres Lomos pre-micorrizadas e infectadas con *Phytophthora capsici*.**

Tratamiento	Volumen radical	Volumen radical necrosado	Necrosis
	----- cm <sup>3</sup> -----		%
Plántula + <i>G. intraradices</i> + <i>P. capsici</i>	0.612 a	0.143 a	23.36
Plántula + <i>P. capsici</i>	0.860 b	0.768 b	89.03

Los valores son la media de observaciones en cuatro plántulas. Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

**Cuadro 3. Porcentaje de supervivencia de plántulas de Chile (*Capsicum annuum* L.) var. Tres Lomos pre-micorrizadas y no pre-micorrizadas con *Glomus intraradices* e infectadas con *Phytophthora capsici*.**

Tratamiento	Días después de la inoculación de <i>P. capsici</i>			
	3	6	9	12
Plántula + <i>G. intraradices</i> + <i>P. capsici</i>	100 a	100 a	100 a	100 a
Plántula + <i>P. capsici</i>	100 a	60 b	40 b	20 b

Los valores son la media de observaciones en ocho plántulas. Medias con la misma letra en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

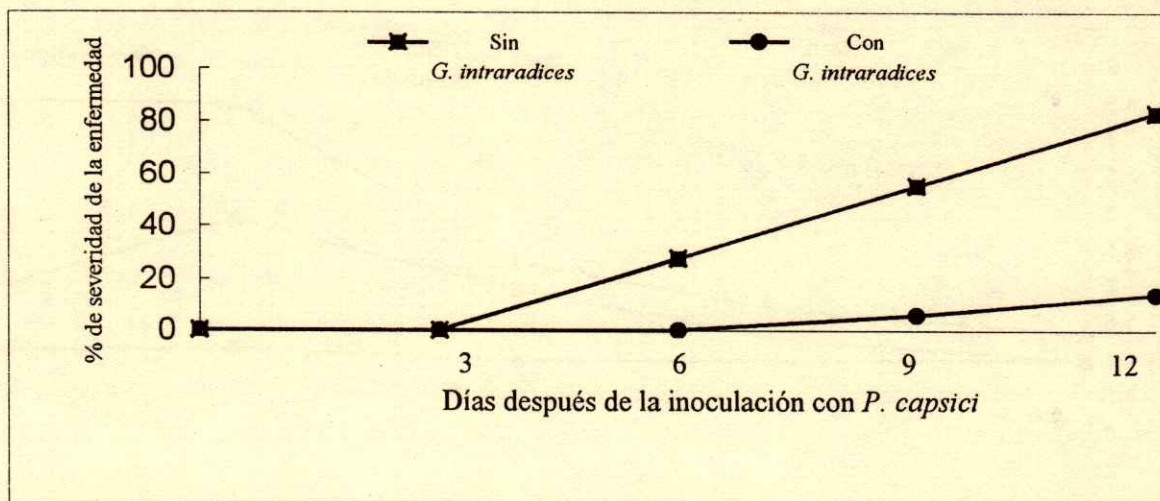


Figura 2. Severidad de la enfermedad causada por *Phytophthora capsici* en plántulas de chile (*Capsicum annuum* L.) pre-micorrizadas y no pre-micorrizadas con *Glomus intraradices*. Cada punto corresponde al promedio de cuatro plántulas.

mayor supervivencia de plantas y una reducción de entre 50 y 70% del necrosamiento en raíces de tomate colonizadas con *G. mosseae* (BEG 12) e infectadas con *P. parasitica*.

#### Actividad de las Enzimas Peroxidasa (PO) y Catalasa (CAT)

Una menor incidencia de la enfermedad en el sistema radical de las plántulas pre-micorrizadas coincidió con una mayor actividad de la enzima PO a partir del día en que se inoculó *P. capsici* (Figura 3), alcanzado el valor máximo de  $4.62 \text{ U mg}^{-1}$  de tejido al doceavo día de contacto con el patógeno. En contraste, el sistema radical de las plántulas tratadas únicamente con *P. capsici* presentó un valor máximo de  $2.79 \text{ U mg}^{-1}$  de tejido radical al noveno día de contacto con el patógeno. El incremento de la actividad de la enzima PO en raíces micorrizadas se ha relacionado con el mejoramiento del estado nutrimental de la planta. Así, McArthur y Knowles (1992) reportaron que una mayor actividad de la enzima PO coincide con un mayor contenido de P en el tejido radical. Por otro lado, Cairney y Burke (1998) detectaron incrementos de la actividad de la enzima PO en cultivos axénicos de HMA con altas concentraciones de Fe. Igualmente, Asiegbu *et al.* (1999) reportaron incrementos de la actividad de la enzima PO en plantas micorrizadas de *Pinus sylvestris* al estar en contacto con *Fusarium avenaceum*; sin

embargo, descartaron la existencia de una relación entre el incremento de la actividad de la enzima PO y la tolerancia de *Pinus sylvestris* al patógeno. Aunque se ha reportado actividad de la enzima PO en el tejido radical de variedades de chile tolerantes al ataque de *P. capsici* (Adorada *et al.*, 2000), los resultados del presente trabajo muestran claramente un incremento de la actividad de esta enzima en las raíces de plántulas de chile que fueron previamente colonizadas con *G. intraradices*. Debido a que, en el presente estudio, no se determinó el estado nutrimental de las plántulas, no puede asumirse la existencia de una relación entre el incremento de la actividad de la enzima PO con una mayor absorción de P y Fe resultado de la simbiosis establecida (Mathur y Vyas, 1996).

La actividad de la enzima CAT aumentó notoriamente a partir del sexto día en las raíces de las plántulas pre-micorrizadas, alcanzando el valor máximo de  $2.81 \text{ U mg}^{-1}$  de tejido al noveno día de contacto con *P. capsici* (Figura 4). Por el contrario, en las raíces de las plántulas no pre-micorrizadas, la actividad de esta enzima se mantuvo a un valor casi constante ( $1.8 \text{ U mg}^{-1}$  de tejido) a partir del sexto día de contacto con el patógeno. El incremento de la actividad de la enzima CAT y su participación en mecanismos de protección de la planta contra patógenos se ha revisado ampliamente (Huckelhoven y Kogel, 1998). Al igual que en el presente estudio, Blibou *et al.* (2000) reportaron incremento de la

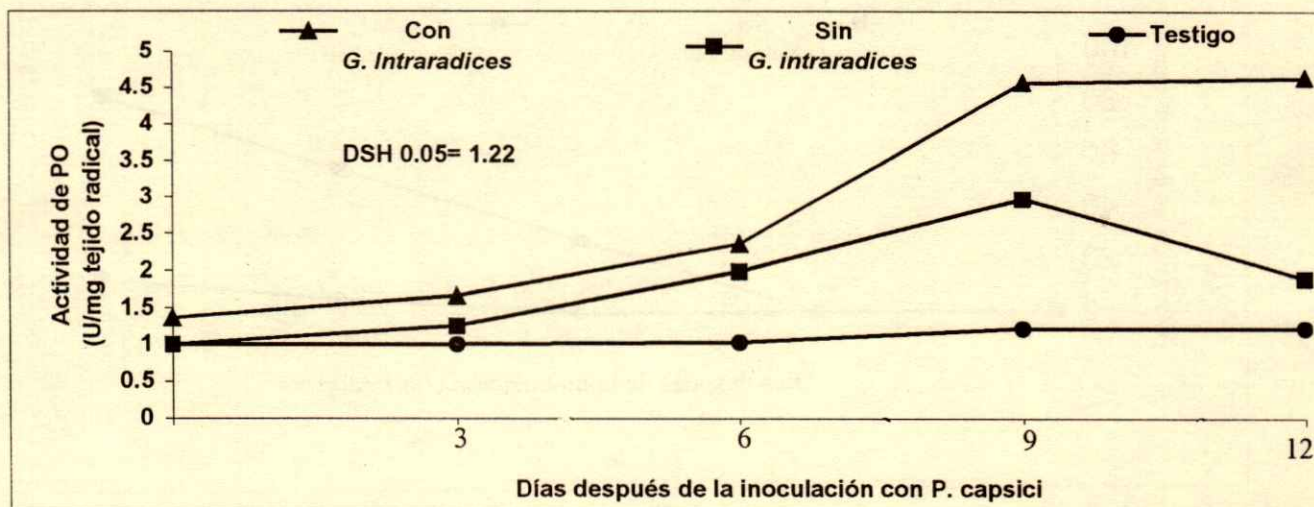


Figura 3. Actividad de la enzima peroxidasa (PO) en raíces de plántulas de chile (*Capsicum annuum* L.) var. Tres Lomos pre-micorrizadas con *Glomus intraradices* e infectadas con *Phytophthora capsici*. Cada punto corresponde al promedio de cuatro plántulas.

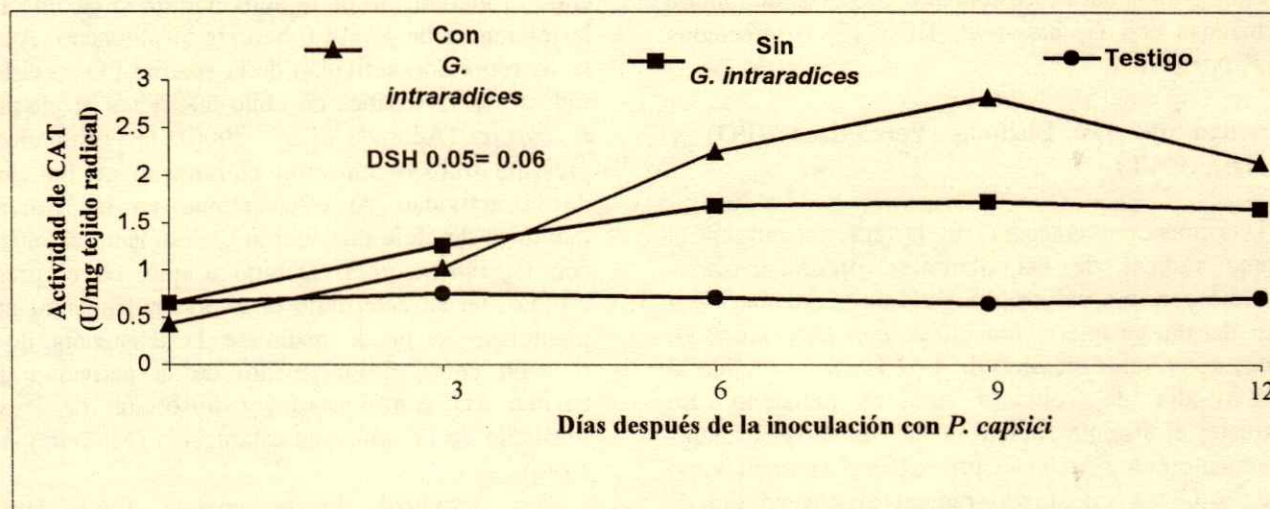


Figura 4. Actividad de la enzima catalasa (CAT) en raíces de plántulas de chile (*Capsicum annuum* L.) var. Tres Lomos pre-micorrizadas con *Glomus intraradices* e infectadas con *Phytophthora capsici*. Cada punto corresponde al promedio de cuatro plántulas.

enzima CAT al inicio de la interacción HMA-planta, pero adicionalmente observaron que este incremento coincidió con la acumulación de ácido salicílico, un potente amplificador de señales en los tejidos vegetales. Aunque en el presente trabajo no se determinó la acumulación de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), Jiang y Zhang (2001) indicaron que el incremento de la actividad de la enzima CAT está

inversamente relacionado con el incremento de  $H_2O_2$ ; es decir, la enzima CAT actúa regulando la concentración del  $H_2O_2$ . Así, la baja actividad de la enzima CAT al inicio del contacto con *P. capsici*, pudo haber incrementado la acumulación del  $H_2O_2$  y, a su vez, promover el flujo de  $Ca^{2+}$ , generando una mayor deposición de callosa en los sitios de entrada del patógeno (Rusterucci *et al.*, 2001) en las raíces de



las plántulas de Chile pre-colonizadas con *G. intraradices*; o bien, actuando de manera directa contra el patógeno (Vanacker *et al.*, 2000). Finalmente, es probable que a partir del sexto día de contacto con *P. capsici*, la alta actividad de la enzima PO condicionó a las raíces pre-micorrizadas para enfrentar al patógeno, evitando daños en la membrana celular, como lo ha señalado Hansberg (1999).

### CONCLUSIONES

- La pre-micorrización de plántulas de Chile var. Tres Lomos con el hongo *Glomus intraradices* promovió la modificación de la arquitectura radical, la disminución del número de lesiones producidas por *Phytophthora capsici*, así como el incremento de la actividad de las enzimas peroxidasa (PO) y catalasa (CAT) en el sistema radical de la plántula hospedera.
- Con base en los datos del presente estudio, se observó que a menor número total de raíces en las plántulas pre-micorrizadas, menor el número de lesiones inducidas por el patógeno.
- El efecto bioprotector debido a la pre-micorrización se expresó en 20% de severidad de la enfermedad y una supervivencia de plántulas de 100%. En contraste, las plántulas que no fueron pre-micorrizadas, presentaron una severidad de la enfermedad de 80% y una supervivencia de 20% al final del experimento.
- En el presente estudio, se observó una mayor actividad de las enzimas PO y CAT en el sistema radical de las plántulas de Chile pre-micorrizadas con *G. intraradices*. El incremento de la actividad de estas dos enzimas en otras plantas micorrizadas, se asocia con la tolerancia a diferentes patógenos. Aunque en el presente estudio no se determinó el estado nutricional de las plántulas ni la acumulación de metabolitos relacionados con la actividad de las enzimas PO y CAT, el incremento de la actividad de ambas enzimas coincidió con una menor severidad de la enfermedad y una supervivencia de 100% de las plántulas precolonizadas con *G. intraradices*.
- Finalmente, los trabajos futuros deberán enfocarse, por un lado, a esclarecer la existencia de un posible efecto sistémico espacial en la planta resultado de la pre-micorrización, a la expresión de genes característicos de la patogénesis y genes de la ruta fenilpropanoide como PAL y CHS; y, por otro lado, a la evaluación de experimentos en condiciones de almácigo, con la finalidad seleccionar plantas pre-micorrizadas para controlar en campo la marchitez fungosa provocada por *P. capsici*.

### LITERATURA CITADA

- Adorada, D.L., C.L. Biles, C.M. Liddell, S. Pavia-Fernandez, K.O. Waugh y M.E. Waugh. 2000. Susceptibility of wounded pepper roots to *Phytophthora capsici*. *Plant Pathology* 49: 719-726.
- Aebi, H. 1984. Catalase *in vitro*. *Methods in Enzymology* 105: 121-126.
- Asiegbu, F.O., M. Johansson y J. Stenlid. 1999. Reactions of *Pinus sylvestris* (scots pine) root tissues to the presence of mutualistic, saprotrophic and necrotrophic micro-organisms. *J. Phytopathology* 147: 257-264.
- Atkinson, D., G. Berta y J.E. Hooker. 1994. Impact of mycorrhizal colonization on root architecture, root longevity and the formation of growth regulators. pp. 89-99. *In: Gianinazzi, S. y H. Schuepp (eds.). Impact of arbuscular mycorrhizas on sustainable agriculture and natural ecosystems.* Birkhauser-Verlag, Basel, Switzerland.
- Azcón-Aguilar, C. y B.J. Barea. 1997. Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens: An overview of the mechanism involved. *Mycorrhiza* 6: 457-464.
- Blibou, I., P. Bueno, J.A. Ocampo y J. Garcia-Garrido. 2000. Induction of catalase and ascorbate peroxidase activities in tobacco roots inoculated with the arbuscular mycorrhizal *Glomus mosseae*. *Mycological Res.* 104: 722-725.
- Cairney, J.W.G. y R.M. Burke. 1998. Do ecto- and ericoid mycorrhizal fungi produce peroxidase activity? *Mycorrhiza* 8: 61-65.
- Cordier, C., M.J. Pozo, J.M. Barea, S. Gianinazzi y V. Gianinazzi-Pearson. 1998. Cell defense responses associated with localized and systemic resistance to *Phytophthora parasitica* in tomato by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Molecular Plant Microbe Interactions* 11: 1017-1028.
- Dixon, R.A. y M.J. Harrison. 1990. Activation, structure, and organization of genes involved in microbial defense in plants. *Adv. Genet.* 28: 165-234.
- Forbes, P.J., C. Ellison y J.E. Hooker. 1996. The impact of arbuscular mycorrhizal fungi and temperature on root system development. *Agronomie* 16: 617-620.
- Hansberg, W. 1999. La biología del dioxígeno en singulete. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 2: 47-55.
- Harrison, M.J. y R.A. Dixon. 1993. Isoflavonoid accumulation and expression of defense gene transcripts during the establishment of vesicular-arbuscular mycorrhizal associations in roots of *Medicago sativa*. *Mol. Plant-Microbe Interactions* 6: 643-645.
- Hewitt, E.J. 1966. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. *Technical Communication* 22. *CAB Abstracts* 22: 431-432.
- Hooker, J.E. y D. Atkinson. 1992. Application of computer-aided image-analysis to studies of arbuscular endomycorrhizal fungi effects on plant-root system morphology and dynamics. *Agronomie* 12: 821-824.
- Huckelhoven, R. y K-H. Kogel. 1998. Tissue-specific superoxide generation at interaction sites in resistant and susceptible near-isogenic barley lines attacked by the powdery mildew fungus. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 11: 292-300.
- Jiang, M. y J. Zhang. 2001. Effect of abscisic acid on active oxygen species, antioxidative defense system and oxidative damage in leaves of maize seedlings. *Plant Cell Physiol.* 42: 1265-1273.

- Kremer, M. 1970. Peroxidatic activity of catalase. *Biochim. Biophys. Acta* 24: 198-199.
- Krishna, K.R. y D.J. Bagyaraj. 1983. Interaction between *Glomus fasciculatum* and *Sclerotium rolfsii* in peanut. *Can. J. Bot.* 61: 2349-2351.
- Mathur, N. y A. Vyas. 1996. Biochemical changes in *Ziziphus xylopyrus* by VA mycorrhizae. *Bot. Bull. Acad. Sci.* 37: 209-212.
- McArthur, D.A.J. y N.R. Knowles. 1992. Resistance responses of potato to vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi under varying abiotic phosphorus levels. *Plant Physiol.* 100: 341-351.
- Mora, L.F. 1988. Guía de producción para chile picante. Laboratorios Griffith. San José, Costa Rica.
- Norman, J.R., D. Atkinson y J.E. Hooker. 1996. Arbuscular mycorrhizal fungal-induced alteration to root architecture in strawberry and induced resistance to the root pathogen *Phytophthora fragariae*. *Plant Soil* 185: 191-198.
- Phillips, J.M. y D.S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 55: 158-161.
- Pozo, C.O. 1997. Producción de semillas de chile con cultivares e híbridos generados por INIFAP. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional del Noroeste-Campo Experimental Sur Tamaulipas. Tamaulipas, México.
- Pozo, M.J., C. Azcon-Aguilar, E. Dumas-Gaudot y J.M. Barea. 1999.  $\beta$ -1,3-glucanase activities in tomato roots inoculated with an arbuscular fungus and *Phytophthora parasitica* and their possible role in bioprotection. *Plant Sci.* 141: 149-157.
- Ramírez, V.J. y S.R. Cova. 1980. Supervivencia de *Phytophthora capsici* Leo. agente causal de la marchitez del chile. *Agrociencia* 39: 9-12.
- Redondo, J.E. 1986. Mecanismos de infección y patología de plantas de chile y resistencia al hongo *Phytophthora capsici* Leo. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Ristaino, J.B. 1990. Intraspecific variation among isolates of *Phytophthora capsici* from North Carolina pepper and cucurbit fields. *Phytopathology* 80: 1253-1259.
- Ristaino, J.B. y S.A. Johnson. 1999. Ecologically based approaches to management of *Phytophthora* blight on bell pepper. *Plant Disease* 83: 1080-1089.
- Rosendahl, S. 1985. Interactions between the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus fasciculatum* and *Aphanomyces euteiches* in pea roots. *Phytopathologisch Zeitschrift* 114: 34-41.
- Rusterucci, C., D.H. Aviv, B.F. Holt, J.L. Dangl y J.E. Parker. 2001. The disease resistance signaling components EDS1 and PAD4 are essential regulators of the cell death pathway controlled by LSD1 in arabidopsis. *Plant Cell* 13: 2211-2224.
- SAS Institute. 1997. SAS/STAT User's Guide. Release 6.03. Cary, NC.
- Toro, M., K. Nedialkova, R. Azcón y J.M. Barea. 1996. Establishment of two rock phosphate solubilizing bacteria in the rhizosphere of mycorrhizal onion plants and their effect on plant growth in a microcosm. pp. 665-668. In: Azcón-Aguilar, C. y J.M. Barea (eds.). *Mycorrhizae in integrated systems: From genes to plant development* (EUR 16728). European Commission. Luxembourg, Luxembourg.
- Trimble, M.R. y N.R. Knowles. 1995. Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth, carbohydrate partitioning and mineral nutrition of greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants during its establishment. *Can. J. Plant Sci.* 75: 239-250.
- Trotta, A., G.C. Varese, E. Gnani, A. Fusconi, S. Sampo y G. Berta. 1996. Interaction between the soilborne root pathogen *Phytophthora nicotianae* var. *parasitica* and the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* in tomato plants. *Plant Soil* 185: 199-209.
- Vanacker, H., L.T. Carver, H. Christine y H. Foyer. 2000. Early H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> accumulation in mesophyll cells leads to induction of glutathione during the hyper-sensitive response in the barley-powdery mildew interaction. *Plant Physiol.* 123: 1289-1300.
- Van Volpin, H., J. Elkind, Y. Ocón y Y. Kapulnik. 1994. A vesicular arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus intraradix*) induces defense response in alfalfa roots. *Plant Physiol.* 104: 683-689.
- Vigo, C., J.R. Norma y J.E. Hooker. 2000. Biocontrol of the pathogen *Phytophthora parasitica* by arbuscular mycorrhizal fungi is a consequence of effects on infection loci. *Plant Pathology* 49: 509-514.
- Xiao, K., L. Kinkel, A. Samac y L. Deborah. 2002. Biological control of *Phytophthora* root rot on alfalfa and soybean infected with *Streptomyces*. *Biological Control* 23: 285-295.
- Zambolim, I. y N.C. Schenck. 1983. Reduction of the effects of pathogenic root rot infecting fungi on soybeans by the mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Phytopathology* 73: 1402-1405.

# PRODUCCIÓN DE AGUA Y SEDIMENTOS POR IMPACTO DE CICLONES TROPICALES, EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO LA SABANA, GUERRERO

## Production of Water and Sediments by Impact of Tropical Hurricanes on the Sabana River Watershed, Guerrero State

Isidro Villegas-Romero<sup>1‡</sup>, José Luis Oropeza-Mota<sup>1</sup> y Enrique Mejía-Sáenz<sup>1</sup>

### RESUMEN

Los ciclones tropicales (CT) se consideran en la actualidad un factor de alto riesgo, por la alta producción de agua y sedimentos que generan en las cuencas hidrográficas. Por esta causa, durante el periodo de 1980 a 1999, México ha gastado 4547.2 millones de pesos en la reconstrucción de los daños causados por este tipo de meteoros. Con el uso de algunas herramientas de análisis espacial, se ubicó la trayectoria de 47 CT, que se acercaron o se impactaron en las proximidades de la zona de estudio, y se calculó la precipitación máxima en 24 h generada en la cuenca durante el periodo de ocurrencia de cada meteoro. Además, se obtuvieron las correlaciones correspondientes entre las variables precipitación-escurrimiento y escurrimiento-producción de sedimentos. Se estimó que, durante este periodo, la cuenca del río La Sabana, fue impactada por 39 CT, incluyendo tormentas tropicales y huracanes de Categoría 4. En conjunto produjeron 327 199 363 m<sup>3</sup> de agua y 9 426 888.9 t de sedimentos, lo que equivale a una degradación específica de 209.38 t ha<sup>-1</sup> para el periodo analizado y 7.7 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** Precipitación, escurrimiento, degradación.

### SUMMARY

Currently, tropical hurricanes are considered to be high risk events because of the large amounts of water and sediments they bring to the watershed. From 1980 to 1997 Mexico spent 4547.2 million pesos on reconstruction of damaged zones. With the use of spatial analysis tools, the paths followed by 47 hurricanes, which crossed near by or impacted the

River Sabana watershed, were drawn. Maximum rainfall during 24 h was computed for each hurricane. Furthermore, with linear regression analysis the corresponding correlations between rainfall on the watershed and runoff, and between runoff and sediment production, were obtained. It is estimated that 39 hurricanes impacted the watershed of the Sabana River from 1970 to 1997, producing 327 199 363 m<sup>3</sup> water and 9 426 888.9 t sediment. This results in specific degradation of the watershed of 209.38 t ha<sup>-1</sup> for the entire period analyzed and 7.7 t ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>.

**Index words:** Rainfall, runoff, degradation.

### INTRODUCCIÓN

Los ciclones tropicales (CT) son fenómenos meteorológicos que históricamente han afectado las zonas costeras de los países más cercanos a la línea ecuatorial, como México, Guatemala, Belice, Costa Rica y Perú. En la actualidad, se les consideran fenómenos de mayor importancia por la magnitud de los riesgos y daños que causan a los núcleos de población, infraestructura productiva y tierras de cultivo a través de los movimientos en masa, producción de sedimentos e inundaciones en las partes bajas de las cuencas hidrográficas.

México, por su posición geográfica, es afectado por CT en sus tres zonas costeras y, de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP, 1998), de 1886 a 1996 se han impactado 375 huracanes de alta categoría, afectando 17 estados costeros; entre los que se incluye al estado de Guerrero, con 20 meteoros de alta categoría durante el periodo de 1949 a 1997.

La evaluación económica y social de los daños causados por este tipo de meteoros en México, durante el periodo de 1980 a 1999, la realizó Bitrán (2002) estimando un costo total de \$4547.2 millones de dólares, del cual 447.8 millones corresponden al

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, estado de México.

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

Recibido: Noviembre de 2002. Aceptado: Marzo de 2004.

Publicado en Terra *Latinoamericana*: 327-333.

gasto de reconstrucción de los daños causados por el huracán Paulina, en 1997.

Ante la falta de una estimación de la producción de agua y sedimentos en las cuencas hidrográficas por impacto de este tipo de meteoros, en el presente trabajo de investigación, se plantea como objetivo general estimar la producción de agua y sedimentos generados por CT, que han impactado la cuenca hidrográfica del río La Sabana, en el estado de Guerrero, durante el período de 1970 a 1999.

### Características Generales de los Ciclones Tropicales

Se le llama CT a cualquier perturbación atmosférica de origen marino y con movimiento giratorio, concepto con el cual coinciden algunas fuentes de información más recientes, como Rosengaus (1998) y FEMA (2000). En general, se clasifican como tormentas y huracanes, diferenciándose por su intensidad y por la presencia de una zona de calma llamada ojo del huracán, en los meteoros que alcanzan esta categoría.

La intensidad tiene como variables componentes la velocidad promedio sostenida del viento y la presión barométrica en el centro de giro, las cuales guardan una interrelación, inversamente proporcional (Arroyo *et al.*, 1980). La velocidad promedio sostenida es la velocidad del flujo giratorio, la cual varía desde 65 km h<sup>-1</sup>, hasta más de 250 km h<sup>-1</sup>, mientras que la velocidad de avance varía desde 11 a 70 km h<sup>-1</sup> (SARH, 1985). La intensidad del ciclón y los daños que causa se miden por medio de la escala de Saffir-Simpson, en la que se reconocen cinco categorías de huracanes de acuerdo con su intensidad y grado de daño que causan al impactarse en las zonas costeras (Hernández, 2001).

La altura y el diámetro del CT son directamente proporcionales a su intensidad; sin embargo, Rosengaus (1998) consideró que el diámetro promedio útil con fines de predecir su impacto por lluvias y viento es de 500 km.

La precipitación generada por CT es difícil de predecir a partir de la intensidad del ciclón (presión y velocidad del viento), ya que varios autores, como Anthes (1982) y Nalivkin (1986), confirmaron que no existe correlación entre estos dos factores, pero en general puede decirse que su mayor intensidad se localiza en los primeros 200 km de radio, siendo más intensa al ruedo del ojo del huracán. También varía

con la distancia recorrida y con la presencia de montañas, las cuales provocan lluvias convectivas.

La precipitación no es uniforme alrededor del centro de giro, ya que Anthes (1982) establece que las tasas de lluvia decrecen del centro hacia fuera tan rápidamente como decrece la humedad convergente, generando una distribución asimétrica alrededor del centro del giro. Esto es corroborado por Rosengaus (1998), quien agregó que las lluvias más intensas se presentan en un radio de 25 km, pero sobre el cuadrante delantero derecho de acuerdo con Tortós (2002).

Ciclones tropicales de baja intensidad pueden generar lluvias intensas; este fue el caso de la Onda tropical 11, en 1999. Ésta provocó precipitaciones intensas y escurrimientos de gran magnitud sobre las cuencas al norte del estado de Veracruz y causó mayores catástrofes en el estado de Puebla, donde se registraron lluvias superiores a 300 mm en varias estaciones meteorológicas (Bitrán, 2002). En Tabasco, las Ondas tropicales 34 y 35 del 29 de septiembre y 3 de octubre de 1999, respectivamente, aportaron un total de 157.47 mm y, en el mes de octubre, fenómenos similares aumentaron la precipitación en 1.6 veces más.

Bitrán (2002) comparó la precipitación generada por el huracán Hilda en 1955 y la Tormenta tropical 11, de 1999; de cuya comparación se concluye que, tanto fenómenos de baja intensidad como son las depresiones tropicales y huracanes, como el Hilda (aunque no se sabe su intensidad) pueden provocar la misma cantidad de lluvia, en algún tiempo y sitio determinado.

### Impacto Económico y Ecológico de los Ciclones Tropicales

El impacto económico y ecológico de los ciclones tropicales en tierras continentales conlleva numerosos daños causados por el viento y la lluvia principalmente.

En general, se acepta que el mayor daño ecológico, económico y social, asociado a los CT lo generan las intensas lluvias que los acompañan, al causar movimientos en masa, erosión en cárcavas e inundaciones en las partes bajas de la cuenca (CEPAL, 1998).

Los escurrimientos generados por lluvias de origen ciclónico normalmente constituyen las máximas avenidas de los cauces principales y su

volumen es una respuesta hidrológica de las características físicas del suelo, grado de deterioro y tipo de cobertura vegetal arbórea, así como de las características geológicas dominantes en la cuenca hidrográfica (López, 1998).

En algunos países, los CT llegan a convertirse en verdaderas catástrofes hidrometeorológicas casi constantes, como lo reporta el Gobierno de Perú (2000). En Perú, se han registrado 5200 deslizamientos de tierra en el periodo de 1925 a 1989; destacando el ocurrido en Huaraz en 1941 que cobró 5000 vidas humanas y más recientemente el ocurrido en Abancay en febrero de 1997, el cual causó la desaparición de 220 personas y la destrucción de 61 viviendas.

En México, Bitrán (2002) y Lugo (2002), documentaron las pérdidas humanas, daños directos, daños indirectos y el costo total de 4547.2 millones de dólares, a causa de los principales desastres meteorológicos ocurridos de 1980 a 1999, entre los que se incluye el huracán Paulina, ocurrido en el estado de Guerrero, en octubre de 1997.

### La Cuenca Hidrográfica como Unidad de Estudio

Sánchez (1987), Corpocuenas (2000) y Lynne (2000) establecieron el concepto general de cuenca, como el área de drenaje natural dividida por una línea imaginaria que establece la dirección del flujo del agua proveniente de la precipitación. Sin embargo, la United States Agency for International Development (USAID, 1999) concibió la cuenca como un continuo hidrológico, una unidad territorial hidrológicamente homogénea donde se suceden, de manera continua, los procesos y fenómenos de intercambio y flujo de materia y energía asociada al agua.

El estudio de los CT, bajo el enfoque de cuenca hidrográfica lo han realizado Ponce (1972), quien hizo una evaluación de las avenidas torrenciales causadas por CT en la República de Guatemala, y la USAID (1999) que analizó el impacto del huracán Mitch en Nicaragua, comparando la erosión causada en parcelas con y sin prácticas de conservación de suelos dentro de una cuenca hidrográfica. En México, Domínguez *et al.* (1990) hicieron un análisis regional para caracterizar estadísticamente los gastos máximos anuales en la zona costera del Océano Atlántico y del Pacífico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación Geográfica y Descripción General de la Cuenca

La cuenca hidrográfica del río La Sabana se localiza en la parte sur del estado de Guerrero, entre las coordenadas geográficas 16° 46' y 17° 10' N y 99° 39' y 99° 54' O. Perteneció a la Región Hidrológica 19, la cual incluye entre otros afluentes principales al río Papagayo y, políticamente, pertenece en su totalidad al municipio de Acapulco. Tiene un área de captación de 45 022.48 ha, donde dominan las rocas ígneas intrusivas ácidas, como el granito, y los suelos de textura media a gruesa como los Regosoles (INEGI, 1985a y b). Domina el bosque caducifolio, seguido del uso agrícola con relictos de pino-encino (INEGI, 1987a y b). Está cubierta por una red de drenaje de tipo dendrítico, calculándose una densidad de 1.7 km ha<sup>-1</sup>. El cauce principal tiene una longitud de 57 km (calculado) y desemboca, en forma natural, a la Laguna de Tres Palos (INEGI, 1984; 2002), (Figura 1), con un volumen medio mensual de hasta 36 millones de m<sup>3</sup>, para el mes de septiembre (calculado).

### Determinación del Total de CT

Por medio de métodos y técnicas aplicados a través de programas de cómputo, como el ArcView



Figura 1. Cauce principal y red de drenaje del río La Sabana, Guerrero.

e Idrisi 32, se hizo la caracterización fisiográfica de la cuenca y, a partir de la información estadística, proporcionada por Luna (1980) y Matías (1998), se determinaron los CT que se han impactado en el estado de Guerrero o se han aproximado a éste. Del archivo de UNISYS (2002), se obtuvo el nombre, la imagen de satélite, latitud y longitud de la trayectoria, así como las características climáticas de cada meteoro. Con estos datos se determinó un total de 47 CT cuyo centro de giro se ubicó a una distancia que varía de 0 a 435 km del centro de la cuenca hidrográfica del río La Sabana Guerrero, durante el periodo de 1970 a 1997.

### Distribución Espacial de la Lluvia

Del Programa ERIC 2 (Extractor Rápido de Información Climatológica 2), se seleccionaron 10 estaciones meteorológicas más cercanas al área de influencia de la cuenca, de las cuales se tomó el dato de la máxima precipitación diaria registrada durante el periodo de ocurrencia del huracán (Figura 2).

Con el dato de precipitación, se construyó una tabla con extensión dbf, la cual puede ser usada con el programa ArcView para ubicar geográficamente a cada estación meteorológica y hacer las interpolaciones necesarias entre los datos de interés. Dicha interpolación se hizo con la función CONTOUR (Figura 2) y ASSING PROXIMITY, obteniendo áreas con igual precipitación (Figura 3).

Finalmente, utilizando la función TABULATE AREAS y el programa Excel, se obtuvo la lámina de precipitación (PP), en  $m^3$  (Cuadro 1).

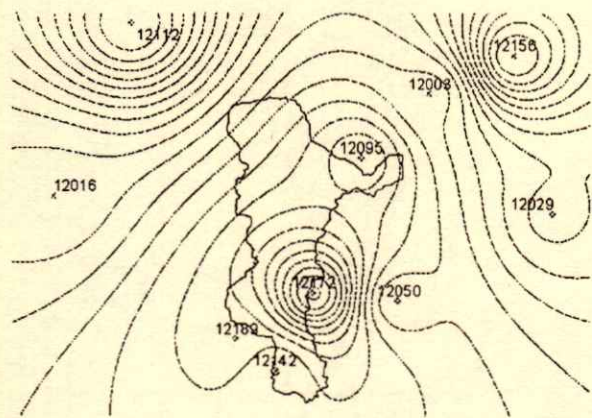


Figura 2. Estaciones meteorológicas utilizadas e Isoyetas generadas por la Tormenta Tropical Irwin, en agosto de 1981.

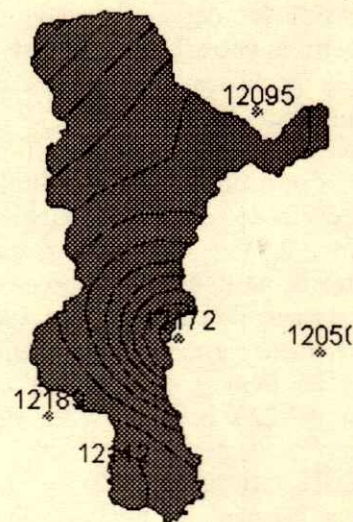


Figura 3. Distribución de la precipitación generada por la Tormenta Tropical Irwin.

### Escorrentamiento y Sedimentos

Se obtuvieron datos diarios de escurrimiento y sedimentos registrados a las 18:00 h en la Estación de aforo km 21, durante el periodo analizado. De estos datos, se extrajo el dato de volumen diario escurrido y toneladas de sedimentos producidas para las principales lluvias de origen ciclónico. Cabe destacar que, de acuerdo con la naturaleza del fenómeno, para la relación precipitación-escurrimiento sólo se consideraron aquellos eventos que aportaron más de 27% de escurrimiento, formando una muestra de nueve eventos y 11 para la relación escurrimiento-producción de sedimentos.

### Análisis de Regresión

De acuerdo con los objetivos planteados, se estimó la precipitación aportada por cada CT en toda la cuenca hidrográfica. Posteriormente, se aplicó el análisis de correlación entre las variables: precipitación-escurrimiento y escurrimiento-producción de sedimentos, para lo cual se tomaron como base las muestras de datos registrados; se obtuvieron las ecuaciones de regresión, los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) y los valores de  $t$  de Student calculados ( $t_0$ ) y de tablas  $t_c$ , que se muestran en el Cuadro 2.

**Cuadro 1. Producción de agua y sedimentos por ciclones tropicales, en la cuenca hidrográfica del río La Sabana Guerrero, durante el periodo de 1970 a 1997.**

Nombre <sup>†</sup>	Fecha de ocurrencia	PP <sup>†</sup>	Esc	Sed	Nombre	Fecha de ocurrencia	PP	Esc	Sed
		----- m <sup>3</sup> -----		t			----- m <sup>3</sup> -----		t
TT Irwin	28/08/81	71.7	21.8	626.0	H Delores	24/06/91	19.9	7.3	211.8
H Aleta	01/06/71	56.0	17.4	500.4	TT Beatriz	20/06/93	17.5	6.7	192.9
H Orlene	22/09/74	55.9	17.4	499.7	TT Ignacio	17/09/91	16.3	6.3	183.0
H Paulina	08/10/97	53.6	16.7	481.1	H Lorena	09/09/83	15.7	6.2	178.0
H Norma	11/09/74	44.3	14.2	407.3	H Eugene	24/07/87	15.5	6.1	176.9
H Kalvin	06/05/93	43.9	14.0	404.1	TT Eilen	27/06/70	15.3	6.1	174.8
H Cosme	22/06/89	43.5	13.9	400.6	H Hernán	03/10/96	14.8	5.9	170.8
H Guillermo	06/07/91	38.4	12.5	360.1	H Nanete	09/09/71	13.6	5.6	161.7
H Andres	04/06/79	32.2	10.8	310.6	H Florence	27/07/73	12.8	5.4	155.2
H Daniel	02/07/78	28.1	9.6	277.4	H Hilary	21/08/93	11.9	5.1	147.4
TT Claudia	29/06/73	27.2	9.4	270.5	H Lidia	10/09/73	11.7	5.0	145.8
H Bridget	17/06/71	23.2	8.3	238.3	TT Kristen	05/08/70	11.6	5.0	145.0
H Emily	23/07/73	23.2	8.3	238.2	TT Eleanor	12/07/75	10.4	4.7	135.4
H Boris	30/05/96	23.1	8.2	237.1	H Kevin	27/09/91	9.9	4.6	131.7
H Odile	22/09/84	22.6	8.1	233.7	TT Paul	27/09/78	9.0	4.3	124.5
H Norman	05/09/78	22.1	8.0	229.4	H Nora	24/09/97	8.5	4.2	120.1
H Gil	30/07/78	21.2	7.7	222.4	TT Olaf	30/09/97	6.9	3.7	107.4
H Virgil	03/10/92	20.8	7.6	218.8	TT Katrina	13/08/71	4.5	3.1	88.5
H Jova	31/08/93	20.8	7.6	218.6	H Anete	09/05/72	4.5	3.1	88.5
H Dolores	17/06/74	20.1	7.4	213.4					

<sup>†</sup> TT = tormenta tropical; H = huracán. <sup>†</sup> PP = precipitación, en millones de m<sup>3</sup>; Esc = escurrimiento, en millones de m<sup>3</sup>; Sed = sedimentos, en miles de toneladas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente trabajo de investigación inicia con el análisis de 47 ciclones tropicales cuya trayectoria se observa cercana a la cuenca hidrográfica del río La Sabana. Sin embargo, al estimar la distribución espacial de la lluvia para cada caso, se demuestra que sólo 39 meteoros aportaron lluvia significativa a la cuenca, durante el periodo analizado.

Usando los modelos de regresión lineal simple (Cuadro 2), obtenidos sobre la base de datos de escurrimiento y sedimentos registrados a las 18:00 h del mismo día de ocurrido el evento de lluvia, se calculó el escurrimiento y la producción de sedimentos para el total de CT que han impactado la cuenca hidrográfica del río La Sabana (Cuadro 1).

En general, se observa que la regresión lineal simple es adecuada para estimar la relación precipitación-escurrimiento y escurrimiento-producción de sedimentos por impacto de CT, en la cuenca hidrográfica del río La Sabana, Guerrero, ya que los modelos de regresión y sus parámetros así lo demuestran. En ambas relaciones se obtiene un coeficiente de correlación (*r*) altamente significativo (88 y 94%, respectivamente), lo que se traduce en un coeficiente de determinación (*r*<sup>2</sup>) de 77 y 89%,

respectivamente. En cuanto a los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$ , en ambos modelos son diferentes de 0; para  $\beta_0$  se calculó el intervalo de confianza, el cual varía de 0.0811 a 0.4767 para la relación precipitación-escurrimiento y de 0.0180 a 0.0394 para la relación escurrimiento-producción de sedimentos, por lo que se acepta que  $\beta_0 > 0$ .

Para el parámetro  $\beta_1$ , se probó la hipótesis  $H_0: \beta_1 = 0$ ; comparando el valor de *t* calculados (*t*<sub>o</sub>) contra el valor de *t* tabulada (*t*<sub>i</sub>) con  $\alpha = 0.005$  y *n* menos 2 grados de libertad; comprobando que *t*<sub>o</sub> > *t*<sub>i</sub>; por lo que se rechaza  $H_0$  y se acepta que con  $\alpha = 0.005$  la pendiente de la recta es mayor que cero, en ambas relaciones, como se demuestra en las ecuaciones de regresión obtenidas.

En cuanto a la interpretación del significado físico de los modelos de regresión, puede establecerse que

**Cuadro 2. Ecuación de regresión lineal simple y su factor de determinación (*r*<sup>2</sup>).**

Relación	Ecuación generada	<i>t</i> <sub>o</sub>	<i>t</i> <sub>i</sub>	<i>r</i> <sup>2</sup>
Precip-Esc	$Y = 1794573.45 + 2789X$	4.9361	3.4995	77
Esc-Sedim	$Y = 929.93 + 0.0287X$	8.7413	3.2498	89

Precip = precipitación, en m<sup>3</sup>; Esc = escurrimiento, en m<sup>3</sup>; Sedim = sedimentos, en t.

dichos modelos tienen sentido y explican la relación precipitación-escurrimiento y escurrimiento-producción de sedimentos de manera adecuada; ya que cuando la precipitación (X) de origen ciclónico es cero, el escurrimiento (Y) adquiere el valor de 1 794 573.45 m<sup>3</sup>, el cual equivale al escurrimiento base del cauce generado por lluvias normales de la temporada. Por otro lado, en la relación escurrimiento-producción de sedimentos, cuando el escurrimiento (X) adquiere el valor de cero, la producción de sedimentos (Y) adquiere el valor de 929. 9279 t, el cual se debe al mismo escurrimiento base del cauce. Esto conduce a pensar que durante la temporada de lluvias existe una producción constante de sedimentos, independientemente de la presencia de CT, lo cual es lógico.

Con base en el análisis anterior, y considerando que ésta es una buena aproximación de la estimación del escurrimiento y de la producción de sedimentos de la cuenca del río La Sabana, se aplicaron los modelos de regresión a los 39 eventos de lluvia de origen ciclónico, que han impactado la cuenca desde 1970 a 1997 (Cuadro 1).

De acuerdo con lo anterior, la mayor cantidad de agua y de sedimentos fue generada por la tormenta tropical (TT) Irwin, en agosto de 1981, con 21 778 568.2 m<sup>3</sup> de agua y 625 974.83 t de sedimentos en un solo día. El que menor precipitación aportó fue el huracán Anete, en 1972, que aportó 4.5 millones de m<sup>3</sup> de precipitación, de los cuales escurrieron 3.1 millones de m<sup>3</sup> y se generaron 88 500 t de sedimentos.

Considerando el total de ciclones analizados en el período de 1970 a 1997, se puede constatar que, en conjunto, la cuenca hidrográfica ha producido un total de 327 199 363 m<sup>3</sup> de agua y 9 426 888.9 t de sedimentos, que equivalen a una degradación específica de 209.38 t ha<sup>-1</sup>, en un período de 27 años.

### CONCLUSIONES

- La cuenca hidrográfica del río La Sabana ha sido impactada por 39 ciclones tropicales (CT) de diferente categoría, durante el período de 1970 a 1997, y ha producido 327 199 363 m<sup>3</sup> de agua y 9 426 888.9 t de sedimentos en un período de 27 años, por impacto de CT; siendo la tormenta tropical Irwin, en agosto de 1981, la que ha generado mayor precipitación, mayor escurrimiento y mayores sedimentos.

- La degradación específica de la cuenca hidrográfica del río La Sabana, por impacto de CT equivale a 209.38 t ha<sup>-1</sup> de sedimentos en un período de 27 años y a 7.75 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

- Los modelos de regresión lineal simple explican en 77 y 89% la relación entre las variables precipitación-escurrimiento y escurrimiento-producción de sedimentos, causados por CT.

- Futuros estudios podrían enfocarse a establecer la relación entre la distancia al centro de giro y la precipitación generada, lo que permitiría predecir, en términos de horas o días, el posible impacto de los CT en la cuenca hidrográfica.

- Otros aspectos importantes que deben seguirse explorando son la relación entre el cambio de uso del suelo con la degradación específica de la cuenca, ante el impacto de los CT, la ocurrencia de movimientos en masa y zonas de inundación, pero también la distribución espacial de la lluvia de origen ciclónico y su beneficio y posible aprovechamiento en la producción agrícola, pecuaria, forestal y en usos industriales y domésticos.

### LITERATURA CITADA

- Anthes, R.A. 1982. Tropical cyclones: Their evolution, structure and effects. Monograph 19. National Center for Atmospheric Research. American Meteorological Society. Boston, MA.
- Arroyo-García, J., S. Serra-Castelán y A. Estrada-Betancourt. 1980. Trayectorias de ciclones tropicales. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Bitrán-Bitrán. D. 2002. Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México, en el período de 1980-99. CEPAL 8-25. México, D.F.
- Corpocuenas. Corporación Vallecaucana para las Cuenas Hidrográficas y el Medio Ambiente. 2000. Diccionario de cuencas. México, D.F.  
<http://www.corpocuenas.com/diccionario3.htm> (mayo de 2001).
- Domínguez-Mora, R., R. Martínez G. y Ma. T. Vázquez C. 1990. Análisis regional para caracterizar estadísticamente los gastos máximos anuales en zonas sujetas a la incidencia directa de ciclones. CENAPRED. México, D.F.
- FEMA. Federal Emergency Management Agency. 2000. Natural Disasters.  
<http://www.fema.gov/kids/kudos.htm> (7 mayo 2001).
- Gobierno de Perú. 2000. Planes de defensa civil.  
<http://www.indeci.gob.pe/planes.htm#top> (Junio 2001).
- Hernández-Cerda, M.E., E. Aspra-Romero, G. Carrasco-Anaya y O. Delgado-Delgado. 2001. Los ciclones tropicales en México. Temas selectos de Geografía de México. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.



- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1984. Carta Topográfica de Xaltianguis. Escala 1:50 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1985a. Carta Edafológica de Chilpancingo. Escala 1:250 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1985b. Carta Edafológica de Acapulco. Escala 1:250 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1987a. Carta de Uso del Suelo de Chilpancingo. Escala 1:250 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1987b. Carta de Uso del Suelo de Acapulco. Escala 1:250 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2002. Carta Topográfica de Acapulco. Escala 1:50 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- López Cadenas de Llano, F. 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Ingeniería Medioambiental, Ministerio de Medio Ambiente. Mundi Prensa. Madrid, España.
- Lugo-Hubp, J. y M. Inbar. 2002. Desastres naturales en América Latina. Fondo de Cultura Económica. México, D.F.
- Luna B., C. 1980. Atlas de huracanes. Coordinación General del Sistema Nacional de Información. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D.F.
- Lynne, C.M. 2000. Ecosystems, biomes, and watersheds: Definitions and Use. CRS Report for Congress Redistributed as a Service of the Natural Library for the Environment. Environment and Natural Resources Policy Division. National Council for Science and the Environment. Washington, DC.  
<http://www.ncseonline.org/NLE/CRS/abstract.cfm?NLEid=15906> (Julio 2002)
- Matías R., L.G. 1998. Algunos efectos de la precipitación del huracán Paulina, en Acapulco Guerrero. Investigaciones Geográficas-Instituto de Geografía. UNAM N37 P7-20. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- CEPAL. Naciones Unidas. Comisión para América Latina y el Caribe. 1998. República Dominicana: Evaluación de los daños ocasionados por el huracán Georges. Sus implicaciones para el desarrollo del país. México, D.F.
- Nalivkin, D.V. 1986. Hurricanes, storms and tornadoes. Geographic characteristics and geological activity. Russian Translations Series 581. Balkema. Rotterdam, The Netherlands.
- Ponce-Reyes, H.R. 1972. Evaluación de crecidas en la República de Guatemala. Universidad de San Carlos. Facultad de Ingeniería. Instituto Geográfico Nacional del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. Guatemala.
- Rosengaus-Moshinsky, M. 1998. Efectos destructivos de los ciclones tropicales. MAPFRE RE, ITSEMAP, IMTA. Ed. MAPFRE S.A. México, D.F.
- Sánchez-Vélez, A. 1987. Conceptos elementales de hidrología forestal: Agua, suelo y vegetación. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1985. Estudio de frecuencias de la ocurrencia de ciclones tropicales en la zona Matamoros-Brownsville. Subsecretaría de Planeación. México, D.F.
- SEMARNAP. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 1998. Pronóstico de la actividad de huracanes para la temporada de 1998. En el Atlántico y el Pacífico. Servicio Meteorológico Nacional.  
<http://www.cna.gob.mx/ciclones/prono98/prono98.html> (Junio 2001)
- Tortós, G. 2002. Huracanes. Atmósferas. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Ciencias Ambientales y Meteorología Aplicada.  
<http://www.itcr.ac.cr/Gruposdeinteres/Meteorologia/atmosferapage/huracanes.htm> (19 abril 2004)
- UNISYS. 2002. Historic files of Pacific hurricanes.  
<http://weather.unisys.com/hurricane/e-pacific/1949/index.htm> (11 febrero 2002)
- UNISYS Weather Hurricane. 2002. Hurricane/tropical data. Eastern Pacific tropical storm tracking by year. Historic files of Pacific hurricanes.  
<http://wweather.unisys.com/hurricane/index.html> (11 febrero 2002)
- USAID. United States Agency for International Development. 1999. Watershed management for hurricane reconstruction and natural disasters vulnerability reduction. USAID contribution to the discussion of ecological and social vulnerability consultative group for the reconstruction and transformation of Central America. Stockholm, Sweden.  
<http://www.reliefweb.int/w/rwvb.nsf/0/b7fad2e74af6dd188525679f005fbaab?OpenDocument> (13 mayo 2001)

# SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE MAÍZ Y POBLACIÓN DE MACROFAUNA EDÁFICA

## Systems of Corn Production and Population of Edaphic Macrofauna

Esperanza Pérez-Agis<sup>1</sup>, Marcelino Vázquez-García<sup>2†</sup>, Diego González-Eguiarte<sup>2</sup>, Enrique Pimienta-Barrios<sup>2</sup>, Miguel B. Nájera-Rincón<sup>3</sup> y Pablo Torres-Morán<sup>2</sup>

### RESUMEN

El presente trabajo estudió la población de la fauna asociada a cinco sistemas de producción del maíz con énfasis en las familias de macrocoleópteros edáficas. Se probaron un sistema de producción de maíz en monocultivo (testigo) y cuatro sistemas de producción de las combinaciones resultantes entre dos cultivos de cobertura en invierno, después de la cosecha del maíz: *Avena sativa* L. y *Vicia sativa* L., y dos formas de uso: acolchados e incorporados. El sistema de producción de maíz en el cual se usó *Vicia sativa* (Leguminosae) como abono verde acolchado (labranza cero) durante el invierno, incrementó sustantivamente la población de la macrofauna, así como la diversidad de ésta. Los resultados también reflejan, por otro lado, que las poblaciones de especies que son en su mayoría plagas, como los melolontidos ("gallina ciega"), se incrementan en el período de crecimiento del maíz, situación que se interpreta como no deseable. Sin embargo, para sustentar esto último, habría que determinar, en forma adicional, la preferencia alimenticia en presencia simultánea de residuos de la cobertura acolchada y de las raíces del maíz. La población de coleópteros representó el mayor segmento y fue la más sensible a los cambios en las prácticas de los sistemas probados. Durante tres años de práctica, la siembra en invierno de *Avena sativa* o *Vicia sativa* y su posterior acolchado (labranza cero), incrementó la población de coleópteros en el suelo (plagas, depredadores y detritófagos). Este resultado sugiere que la población de coleópteros puede ser

usada como indicador faunístico para inferir el grado de estabilidad del sistema.

**Palabras clave:** Melolontidos, abono verde, labranza cero.

### SUMMARY

In this paper, the population of edaphic fauna associated with five production systems of corn is discussed: corn in monoculture and four production systems resulting from the combination of two winter crops used as green manure, after corn harvest: *Avena sativa* L. and *Vicia sativa* L., and two forms of usage: mulching (no-tillage) and incorporated (low tillage). When *V. sativa* was used as mulched green manure (no-tillage), the population of edaphic fauna was significantly greater and more diverse than in the rest of the systems. On the other hand, pest populations, such as melolonthids ("white grubs") also increase during the period of critical growth of corn, a situation that is interpreted as not desirable. However, to sustain the latter, insect feeding preference should be determined in the simultaneous presence of both plant mulch residues and living corn roots. Among the orders of insects and arachnids, coleopterans were the most important of the entire population and the most sensitive to the corn production systems. Three years after establishing the systems, winter planting of *Vicia sativa* or *Avena sativa* and later mulching (no-tillage) resulted in a significantly greater population of coleopterans (pests, predators and detritophagous). This result suggests that the population of coleopterans could be used as a faunistic indicator of system's stability. The results offer data which support the benefits of using green manure as mulch in winter to increase diversity and number of edaphic fauna throughout the entire year and can lead to better ecological stability.

**Index words:** Melolonthids, green manure, no-tillage.

<sup>1</sup> GIRA, A.C. Programa de Agroecología, "El Parián" Local 17, 61609 Pátzcuaro, Michoacán, México.

<sup>2</sup> Universidad de Guadalajara-CUCBA. Las Agujas, Zapopan, Jalisco, México.

<sup>†</sup> Autor responsable ([mvazquez@cucba.udg.mx](mailto:mvazquez@cucba.udg.mx))

<sup>3</sup> CENAPROS. La Carreta, Álvaro Obregón, Michoacán.

## INTRODUCCIÓN

En el ámbito nacional, uno de los principales problemas sanitarios que afectan al cultivo de maíz, es el daño causado por el complejo de larvas rizófagas de coleópteros. Las especies que se han citado como más comunes y agresivas a diversos cultivos pertenecen a los géneros *Phyllophaga* y *Anomala* (Coleoptera: Melolonthidae) (Morón y Terrón, 1988; Nájera, 1993).

El método principal de control que se ha empleado contra dicho complejo ha sido el químico, el cual provoca resistencia a mediano y largo plazo, como se ha reportado en especies de *Phyllophaga* en el centro de Jalisco (Nájera, 1993), una de las principales zonas productoras de maíz en México. Esta resistencia en los insectos tiene como consecuencia un aumento de poblaciones con serios riesgos para el cultivo y para los ingresos del productor. Para estudiar este problema y con un enfoque orientado a lograr la sostenibilidad en los sistemas de producción, Nestel *et al.* (1993), Lavelle *et al.* (1994) y Morón *et al.* (1998) han evaluado la diversificación de los cultivos y su impacto sobre las plagas y enemigos naturales. Lavelle *et al.* (1994), Sánchez y Altieri (1998) y Altieri y Nicholls (1999) sostuvieron que la mayor diversidad de especies edáficas conduce a la estabilidad del ecosistema, por la tendencia a mantener y/o defender las funciones internas del mismo en compensación a factores externos que afectan algún componente.

Con el supuesto de que, al diversificar (cambiar la estructura vegetal) al sistema "monocultivo" de maíz, mediante diferentes prácticas, se puede favorecer la estabilidad del sistema, la presente investigación tiene como objetivo conocer los efectos de introducir cultivos de cobertura (abonos verdes) en invierno (sucediendo a la siembra tradicional de maíz en verano), incorporados al suelo o acolchados, sobre las poblaciones de los principales componentes de la macrofauna edáfica (plagas y enemigos naturales), de tal manera, que estos cambios de poblaciones puedan ser considerados como indicadores del grado de estabilidad del sistema.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la zona templada del estado de Michoacán, México. En el ejido Casas Blancas del municipio de Villa Escalante, se estableció un experimento sobre un diseño de bloques

completos al azar con tres repeticiones y cinco tratamientos (Cuadro 1). El tamaño de la parcela, tanto en verano, como en invierno, fue de 8 m de ancho y de 10 m de longitud (80.0 m<sup>2</sup>). Para los muestreos se utilizaron los cuatro surcos centrales eliminando 1 m en las orillas (25.6 m<sup>2</sup>). El muestreo se hizo cada mes, en el período de julio 1998 a junio 1999 (12 en total) y se realizó en la rizosfera de maíz y cultivos de cobertura. La muestra se obtuvo de cepellones de suelo de 30 x 30 x 30 cm y se contaron los insectos o arácnidos de las órdenes Coleoptera, Lepidoptera, Hymenoptera y Araneae. Por ser siempre los insectos más abundantes en el suelo, los coleópteros se identificaron en estado adulto y larvario hasta familia: Melolonthidae ("gallinas ciegas"), Elateridae ("gusanos de alambre"), Carabidae ("pinacates") y Tenebrionidae ("mayates oscuros"). En el caso de inmaduros se consideraron larvas de 2<sup>o</sup> y 3<sup>er</sup> instar (Morón y Terrón, 1988). Cabe señalar que los muestreos se realizaron durante el segundo y tercer año después de establecido el experimento para dar tiempo a que se manifestara mejor el efecto de los tratamientos.

Los datos originales de: a) el número total de individuos cuantificados de los grupos taxonómicos (órdenes y familias) encontrados en los doce muestreos, b) el número total de individuos encontrados sólo durante la etapa de verano (abril a octubre) sobre el cultivo del maíz y c) el número total de individuos encontrados sólo durante la etapa de invierno (noviembre a marzo) en el cultivo en rotación (*Avena sativa*, *Vicia sativa*) o en tierra en descanso (maíz en monocultivo), se sometieron al análisis de varianza. Se tomaron los datos como modelo general lineal y las medias de los efectos principales; entre cultivo y entre forma de uso (incorporación o acolchado) se separaron con pruebas de comparación múltiple *post-hoc* de Sidak al nivel de 0.05% de error, utilizando el programa de cómputo SPSS, Versión 7.0 (SPSS, 1995).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Abundancia de Órdenes de Insectos y Arácnidos

Se identificaron, durante todo el estudio, individuos de tres órdenes de la Clase Insecta: Coleoptera, Lepidoptera e Hymenoptera, y de una orden de la Clase Arácnida; Araneae.

En los 12 muestreos, el total de individuos de ambas clases encontrados fue estadísticamente igual

**Cuadro 1. Descripción de sistemas de producción de maíz usados para conocer su efecto sobre las poblaciones de macrofauna edáfica.**

Tratamientos	Descripción	Observaciones
1.- TC (Testigo convencional)	Maíz en verano en monocultivo	Fertilización química 200-171-0 y labranza convencional (barbecho, rastra, surcado y escarda)
2.- Ai ( <i>Avena sativa</i> incorporada)	Maíz en verano y rotación con <i>A. sativa</i> en invierno	Fertilización química 0-171-0. Incorporación de la <i>A. sativa</i> con un paso de rastra, y labranza convencional en ambos
3.- Aa ( <i>Avena sativa</i> acolchada)	Maíz en verano y rotación con <i>A. sativa</i> en invierno	Fertilización química 0-171-0. Acolchado de la <i>A. sativa</i> en "mantillo" y labranza cero en ambos
4.- Vi ( <i>Vicia sativa</i> incorporada)	Maíz en verano y rotación con <i>V. sativa</i> en invierno	Fertilización química 0-171-0. Incorporación de la <i>V. sativa</i> con un paso de rastra, y labranza convencional en ambos
5.- Va ( <i>Vicia sativa</i> acolchada)	Maíz en verano y rotación con <i>V. sativa</i> en invierno	Fertilización química 0-171-0. Acolchado de la <i>V. sativa</i> en "mantillo" y labranza cero en ambos

cuando en los sistemas se utilizaron los dos cultivos de cobertura. En invierno cuando se utilizó *Vicia sativa*, se incrementó el número de individuos en comparación con el sistema convencional (maíz en monocultivo), esto resultó estadísticamente significativo. Al comparar las formas de uso de los cultivos de cobertura (incorporación o acolchado), el número de individuos encontrados fue estadísticamente igual, pero sólo el acolchado resultó con un número significativamente mayor que el testigo (Cuadro 2). En el análisis de varianza, las interacciones resultaron no significativas. Por lo anterior, puede considerarse que el acolchado del cultivo de cobertura *Vicia sativa* en invierno favorece significativamente la ocurrencia de insectos y arácnidos en comparación con el testigo convencional (maíz en monocultivo).

En los 12 muestreos realizados, el total de individuos encontrados de la orden Coleóptera fue significativamente mayor con cualquiera de los dos cultivos de cobertura en comparación con el testigo; no se detectó diferencia significativa entre los dos cultivos de cobertura. Al comparar las formas de uso

de los cultivos de cobertura, se observó un incremento de coleópteros cuando se usaron acolchados, que cuando se incorporaron o que cuando no se usó cultivo de cobertura (testigo) (Cuadro 3). El resultado anterior sugiere que cualquiera de los dos cultivos de cobertura en invierno proporciona al suelo mejores condiciones para la ocurrencia de coleópteros y la práctica del acolchado es mejor para tal propósito que la incorporación. Este resultado, similar al presentado en el Cuadro 2, es explicable, ya que Coleóptera fue la orden más abundante con segmento poblacional de 88% (Figura 1) y puede asumirse que fue la población dominante en todos los sistemas.

Al igual que en el estudio de Nestel *et al.* (1993), sobre macrocoleópteros en cafetales mexicanos, se encontró una alta proporción de coleópteros. Asimismo, Nájera y Valdéz (1997), en el estudio sobre labranza de conservación en la región de Indaparapeo, Michoacán, registraron a la familia Coleóptera como uno de los grupos más abundantes.

De aquí que podría considerarse a los coleópteros como un indicador de la estabilidad de los agroecosistemas; por un lado, porque es el mayor

**Cuadro 2. Comparación de medias<sup>1</sup> de los efectos principales en el modelo lineal del total de individuos en 12 muestreos en varios sistemas de siembra de maíz. Ciclo 1998-1999.**

Comparación	Medias <sup>2</sup>	Diferencia de medias	Error estándar	Significancia estadística (Prob. error)	Intervalo de confianza (95%)	
					Lím. inferior	Lím. superior
Testigo-Avena	6.67-10.38	-3.71	1.565	.063	-7.57	0.15
Testigo-Vicia	6.67-11.25	-4.58*	1.565	.150	-8.45	-0.72
Avena-Vicia	10.38-11.25	-0.88	1.278	.872	-4.03	2.28
Testigo-Incorporado	6.67-9.25	-2.58	1.565	.283	-6.45	1.28
Testigo-Acolchado	6.67-12.38	-5.71*	1.565	.002	-9.57	-1.85
Incorporado-Acolchado	9.25-12.38	-3.13	1.278	.053	-6.28	2.9E-02

<sup>1</sup> Prueba de comparación múltiple *post-hoc* de SIDAK a 05% de error. <sup>2</sup> Número de observaciones que originaron las medias (Testigo n = 12; Avena n = 24 y Vicia n = 24). \* Diferencia estadísticamente significativa.

**Cuadro 3. Comparación de medias<sup>1</sup> de los efectos principales en el modelo lineal del total de coleópteros en 12 muestreos en varios sistemas de siembra de maíz. Ciclo 1998-1999.**

Comparación	Medias <sup>2</sup>	Diferencia de medias	Error estándar	Significancia estadística (Prob. error)	Intervalo de confianza (95%)	
					Lím. inferior	Lím. superior
Testigo-Avena		-13.33*	2.359	.001	-20.23	-6.44
Testigo-Vicia		-14.00*	2.359	.001	-20.9	-7.10
Avena-Vicia		-0.67	1.926	.982	-6.3	4.96
Testigo-Incorporado	24.0-30.17	-6.17	2.359	.082	-13.06	0.73
Testigo-Acolchado	24.0-45.17	-21.17*	2.359	.000	-28.06	-14.27
Incorporado-Acolchado	30.17-45.17	-15.00*	1.926	.000	-20.63	-9.37

<sup>1</sup> Prueba de comparación múltiple *post-hoc* de SIDAK a 05% de error. <sup>2</sup> Número de observaciones que originaron las medias (Testigo n = 3; Avena n = 6 y Vicia n = 6). \* Diferencia estadísticamente significativa.

segmento de la población y, por otro lado, porque su población responde a los cambios en la estructura vegetal y a las prácticas de cultivo.

El total de individuos del orden Lepidóptera fue significativamente mayor cuando en el sistema de producción el cultivo de cobertura fue *Vicia* el testigo (maíz sembrado convencionalmente). No hubo diferencias significativas en las comparaciones Testigo-Avena y Avena-Vicia (Cuadro 4). Al comparar las formas de uso, el número de lepidópteros fue significativamente mayor cuando en los sistemas de producción se usaron cultivos de cobertura incorporados que cuando se usaron acolchados o que cuando no se usaron cultivos de cobertura (testigo) (Cuadro 4).

En sistemas, donde se usan cultivos de cobertura de *Vicia* que se incorporan o acolchan y se practica labranza de conservación, se presentó la mayor población de lepidópteros que son fitófagos en conjunto con los coleópteros que se alimentan de las raíces del maíz. Contrario a lo que en general se

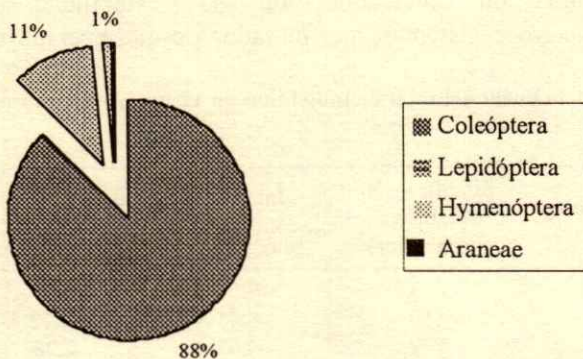
cree, pueden representar un riesgo para el desarrollo del cultivo de maíz, sobre todo en etapas tempranas de crecimiento. Sin embargo, quedaría pendiente por determinar, en qué grado estos insectos prefieren para su alimentación a los residuos de los cultivos de cobertura o a las raíces del maíz durante su etapa de crecimiento.

La población de himenópteros y de arañas fue similar en todos los tratamientos y no se observaron diferencias significativas al comparar los efectos principales. Este resultado permite sostener que, por lo menos en el período entre el segundo y el tercer año de establecidos los diferentes sistemas, las poblaciones de Coleóptera y Lepidóptera establecieron las diferencias en macrofauna edáfica.

**Abundancia de Familias de Coleóptera**

Se identificaron cuatro familias del orden Coleóptera, de las cuales la más abundante fue Melolonthidae (81%), Carabidae (10%), y Elateridae y Tenebrionidae que juntos conformaron sólo 9% de la población (Figura 2). Los melolontidos y elatéridos son eminentemente plagas del maíz llamadas genéricamente “gallinas ciegas” y “gusanos de alambre”, mientras que los carábidos son carnívoros, saprófagos, omnívoros, necrófagos y algunas especies son depredadores de larvas de melolontidos y lepidópteros. Los tenebriónidos tienen hábitos saprófagos, fitófagos muy ocasionales o micetófagos que viven debajo de piedras, cortezas, troncos, hongos y hojarasca.

En los 12 muestreos fue significativamente mayor la población de melolontidos cuando se usó cualquiera de los dos cultivos de cobertura en invierno que cuando se sembró el maíz de la manera convencional. No se observaron diferencias significativas entre usar como cultivo de cobertura en invierno a la



**Figura 1. Proporciones de poblaciones de las órdenes de insectos y arácnidos edáficas.**

**Cuadro 4. Comparación de medias<sup>1</sup> de los efectos principales en el modelo lineal del total de lepidópteros en 12 muestreos en varios sistemas de siembra de maíz. Ciclo 1998-1999.**

Comparación	Medias <sup>2</sup>	Diferencia de medias	Error estándar	Significancia estadística (Prob. error)	Intervalo de confianza (95%)	
					Lím. inferior	Lím. superior
Testigo-Avena	2.33-4.17	-1.84	.769	.134	-4.16	0.49
Testigo-Vicia	2.33-5.83	-3.50*	.769	.005	-5.83	-1.17
Avena-Vicia	4.17-5.83	-1.66	.650	.089	-3.57	0.23
Testigo-Incorporado	2.33-6.00	-3.67*	.769	.004	-5.99	-1.34
Testigo-Acolchado	2.33-4.00	-1.67	.769	.185	-3.99	0.66
Incorporado-Acolchado	6.00-4.00	2.00*	.650	.039	0.10	3.90

<sup>1</sup> Prueba de comparación múltiple *post-hoc* de SIDAK a 05% de error. <sup>2</sup> Número de observaciones que originaron las medias (Testigo n = 3; Avena n = 6 y Vicia n = 6). \* Diferencia estadísticamente significativa.

*Avena* o a *Vicia* (Cuadro 4). Al compararse la forma de uso de los cultivos de cobertura, se encontró un número significativamente mayor de melolántidos cuando se practicó el acolchado, que cuando se hizo la incorporación o cuando se cultivó maíz convencional sin cultivo de cobertura (testigo) (Cuadro 5). Estos resultados coinciden con estudios previos sobre la composición de coleópteros edáficas cuando el cultivo de una gramínea es el componente vegetal principal. Se ha reportado que la familia Melolonthidae juega un papel dominante dentro del hábitat de la rizosfera (Morón *et al.*, 1998). Nájera y Valdez (1997) encontraron la tendencia de incrementarse en el cultivo de maíz en los tratamientos con labranza reducida y aumento de residuos agrícolas.

El número total de carábidos fue significativamente mayor cuando en el sistema se utilizó el cultivo de cobertura *Vicia*, pero no hubo diferencias significativas en el número entre las formas de uso. Este resultado sugiere que *Vicia*, siendo una leguminosa, aporta mejores condiciones al

suelo para la ocurrencia de carábidos, lo que sugiere que el empleo de *V. sativa* como cultivo de cobertura puede favorecer a esta familia de insectos y, con ello, provocar efectos positivos para la regulación por depredación de melolántidos y lepidópteros en el agroecosistema. Los elatéridos y tenebriónidos presentaron poblaciones bajas y no se observaron diferencias significativas entre el sistema convencional (testigo) y los sistemas que usaron los cultivos de cobertura, ni entre el testigo y las dos formas de su uso de los cultivos de cobertura, incorporado o acolchado (Cuadro 6).

#### Abundancia de Coleópteros en el Período de Desarrollo del Maíz (Verano) y en el Período de Cobertura (Invierno)

Todos los coleópteros ocurrieron en todos los sistemas probados durante ambos periodos (verano e invierno) con excepción de los melolántidos. El número de melolántidos que ocurrieron durante el período de crecimiento del maíz (verano) fue mayor en los sistemas de producción donde se usaron cualquiera de los dos cultivos de cobertura (*Avena* o *Vicia*) en comparación con el sistema de maíz convencional (testigo). Pero en el invierno, cuando los sistemas de cobertura estaban establecidos, el número de melolántidos fue significativamente mayor que cuando se usó *Avena*, que cuando se usó *Vicia* y que en el testigo. En ambos periodos, el número de melolántidos fue significativamente mayor en los sistemas en que los cultivos de cobertura se usaron acolchados (labranza cero), que cuando se incorporaron o en el testigo (Cuadro 7). Con estos resultados puede considerarse que los abonos verdes acolchados (labranza cero) incrementan la población de melolántidos ("gallina ciega") durante la época de

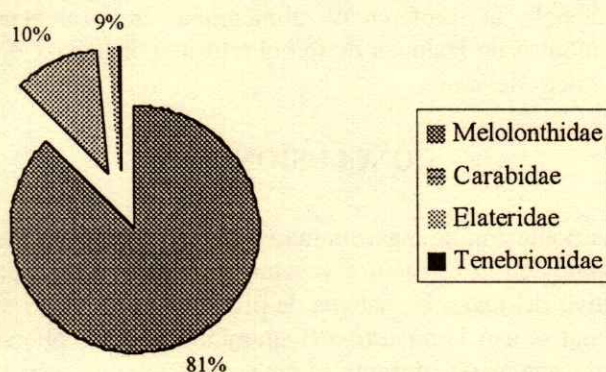


Figura 2. Proporción de poblaciones de las familias de coleópteros edáficas.

**Cuadro 5. Comparación de medias<sup>1</sup> de los efectos principales en el modelo lineal del total de melolóntidos en 12 muestreos en varios sistemas de siembra de maíz. Ciclo 1998-1999.**

Comparación	Medias <sup>2</sup>	Diferencia de medias	Error estándar	Significancia estadística (Prob. error)	Intervalo de confianza (95%)	
					Lím. inferior	Lím. superior
Testigo-Avena	18.00-31.00	-13.0*	2.967	0.006	-21.73	-4.27
Testigo-Vicia	18.00-30.50	-12.5*	2.967	0.007	-21.23	-3.7
Avena-Vicia	30.50-31.00	0.50	2.439	.996	-6.63	7.63
Testigo-Incorporado	18.00-23.17	-5.17	2.987	.247	-13.51	3.17
Testigo-Acolchado	18.00-38.33	-20.3*	2.967	.000	-28.67	-11.99
Incorporado-Acolchado	23.17-38.33	-15.17*	2.439	.000	-21.98	-8.36

<sup>1</sup> Prueba de comparación múltiple *post-hoc* de SIDAK al nivel de 05% de error. <sup>2</sup> Número de observaciones que originaron las medias (Testigo n = 3; Avena n = 6 y Vicia n = 6). \* Diferencia estadísticamente significativa.

**Cuadro 6. Comparación de medias<sup>1</sup> de los efectos principales en el modelo lineal del total de carábidos, elatéridos y tenebriónidos en 12 muestreos en varios sistemas de siembra de maíz. Ciclo 1998-1999.**

Comparación	Diferencia de medias <sup>2</sup>			Prob. de error		
	Carabidae	Elaterridae	Tenebrionidae	Carabidae	Elaterridae	Tenebrionidae
Testigo-Avena	0.50	0.00	-0.83	0.527	1.000	0.560
Testigo-Vicia	0.50	0.50	-1.50	0.527	0.529	0.141
Avena-Vicia	-1.00*	0.50	-0.67	0.026	0.370	0.575
Testigo-Incorporado	0.00	0.33	-1.33	1.000	0.789	0.207
Testigo-Acolchado	0.00	0.17	-1.00	1.000	0.965	0.417
Incorporado-Acolchado	0.00	-0.17	0.33	1.000	0.939	0.910

<sup>1</sup> Prueba de comparación múltiple *post-hoc* de SIDAK a 05% de error. <sup>2</sup> Número de observaciones que originaron las medias (Testigo n = 3; Avena n = 6 y Vicia n = 6). \* Diferencia estadísticamente significativa.

**Cuadro 7. Comparación de medias<sup>1</sup> de los efectos principales en el modelo lineal de los melolóntidos encontrados en el periodo de crecimiento del maíz (verano) y durante la etapa de cobertura (invierno) en los muestreos en varios sistemas de siembra de maíz. Ciclo 1998-1999.**

Comparación	Diferencia de medias		Prob. de error	
	Verano	Invierno	Verano	Invierno
Testigo-Avena	-8.17*	-4.83*	0.010	0.024
Testigo-Vicia	-8.67*	-3.50	0.007	0.107
Avena-Vicia	-0.50	1.33	0.988	0.631
Testigo-Incorporado	-4.17	-0.67	0.204	0.958
Testigo-Acolchado	-12.67*	-7.67*	0.000	0.001
Incorporado-Acolchado	-8.50*	-7.0*	0.002	0.001

<sup>1</sup> Prueba de comparación múltiple *post-hoc* de SIDAK a 05% de error. <sup>2</sup> Número de observaciones que originaron las medias (Testigo n = 3; Avena n = 6 y Vicia n = 6). \* Diferencia estadísticamente significativa.

desarrollo del maíz en el verano y más aún, la práctica del acolchado de la avena mantiene altas poblaciones durante el invierno.

El resultado de este trabajo ofrece datos que sustentan, por un lado, la ventaja de usar abonos

verdes como acolchado durante el invierno para incrementar la diversidad de macrofauna en el suelo durante todo el año, que podría conducir a una mejor estabilidad ecológica del sistema, pero, por otro lado, la población de especies que son en su mayoría plagas, como los melolóntidos ("gallina ciega"), se incrementan en el periodo de crecimiento del maíz, situación que es poco favorable; sin embargo, para sustentar esto último, habría que determinar, en forma adicional, la preferencia alimenticia en presencia simultánea de residuos de la cobertura acolchada y de las raíces del maíz.

## CONCLUSIONES

- La población de macrofauna edáfica es sensible a los cambios en la estructura vegetal y en las prácticas de cultivo del maíz. El sistema de producción de maíz, en el cual se usó *Vicia sativa* (Leguminosae) como abono verde acolchado durante el invierno (labranza cero), incrementó la población de la macrofauna, lo que podría significar un mejoramiento de la estabilidad del agroecosistema.

- Entre la macrofauna encontrada, la población de coleópteros fue la más sensible a los cambios en las prácticas de los sistemas probados. Durante tres años de práctica, cuando se hizo la siembra en invierno de *Avena sativa* o *Vicia sativa* después de la cosecha del maíz y se realizó un acolchado (labranza cero), fue mayor la población de coleópteros en el suelo (plagas, depredadores y detritófagos). El resultado anterior sugiere que la población de coleópteros puede ser usada como el mejor indicador faunístico para inferir sobre el grado de estabilidad del sistema.

- A diferencia de los coleópteros, los lepidópteros fueron más abundantes en los sistemas con el cultivo de cobertura *V. sativa* incorporada. Al parecer, el movimiento de la capa arable favoreció la proliferación de larvas de lepidóptera.

- La población de himenópteros y arácnidos fue similar en todos los sistemas probados, lo cual indica que la magnitud de sus poblaciones depende de otros factores ajenos a los aquí estudiados.

- Entre los coleópteros, los melolontidos ("gallinas ciegas") fue la población más abundante, e igualmente se observó que sus poblaciones se incrementaron en los sistemas donde se usaron cultivos de cobertura en invierno y acolchado (labranza cero). Se supone que esta familia prospera mejor en ambientes de reducida o nula labranza y riqueza de residuos agrícolas.

- Los carábidos, insectos eminentemente depredadores, se incrementaron en los sistemas donde se utilizó *V. sativa* como cobertura, independientemente si ésta se incorporó con rastra o en forma acolchada. De ahí que el uso de *V. sativa* como cobertura es una buena práctica para incrementar los índices de depredación para la regulación de poblaciones de "gallinas ciegas" o "gusanos de alambre" (elatéridos).

- En el periodo de crecimiento del maíz (verano), la población de melolontidos aumentó cuando se usó

cultivo de cobertura en el sistema. En el invierno cuando estaba el periodo de crecimiento del cultivo de cobertura, la población de melolontidos fue mayor cuando sólo se usó la avena. En ambos periodos, el acolchado favoreció más a esta población de insectos.

## LITERATURA CITADA

- Altieri, M. y C. Nicholls. 1999. Biodiversity, ecosystem function and insect pest management in agricultural systems. pp. 69-83. *In*: Collins, W. y C. Qualset (eds.). Biodiversity in Agroecosystems. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Lavalle, P., M. Dangerfield, C. Fragoso, V. Eschenbrenner, D. López-Hernández, P. Pashanasi y L. Brussaard. 1994. Relationship between soil macrofauna and tropical soil fertility. pp. 137-169. *In*: Wooster, P.L. y M.J. Swift (eds.). The biological management of tropical soil fertility. Wiley. New York.
- Morón, M.A. y R. Terrón. 1988. Entomología práctica. Instituto de Ecología. México, D.F.
- Morón, M.A., C. Deloya, A. Ramírez-Campos y S. Hernández. 1998. Fauna Lamellicorne: Coleóptera de la Región de Tepic. Nayarit. Acta Zoológica Mex. 75: 73-116.
- Nájera, M. 1993. Coleópteros rizófagos asociados al maíz de temporal en el Centro del Estado de Jalisco, México: Identificación, ecología y control. pp. 143-154. *In*: Morón, M.A. (compilador). Diversidad y manejo de plagas subterráneas. Sociedad Mexicana de Entomología e Instituto de Ecología. Xalapa, Veracruz, México.
- Nájera, M. y L. Valdez. 1997. Efectos de los métodos de labranza y cobertura vegetal sobre macrofauna edáfica asociada al maíz de temporal. pp. 65-76. *In*: Avances de investigación en labranza de conservación. Libro Técnico 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-PRODUCE. Morelia, Michoacán, México.
- Nestel, D., F. Dickschen y M. Altieri. 1993. Diversity patterns of soil macrocoleopteran in Mexican shaded and unshaded coffee agroecosystems: An indication of habitat perturbation. *J. Biodiversity Conservation* 2: 70-78.
- Sánchez, J. y M. Altieri. 1998. Manual práctico de control biológico para la agricultura sustentable. University of California. Berkeley, CA.
- SPSS. Statistical Package for Social Sciences, Inc. 1995. Sistema base para Windows. Versión 7.0. Chicago, IL.



# PRODUCTIVIDAD DE LA ALFALFA EN CONDICIONES DE SALINIDAD EN EL DISTRITO DE RIEGO 017, COMARCA LAGUNERA

Alfalfa Productivity under Conditions of Salinity in the Irrigation District 017, Comarca Lagunera

Jesús Santamaría-César<sup>1†</sup>, Uriel Figueroa-Viramontes<sup>1</sup> y Ma. del Consuelo Medina-Morales<sup>1</sup>

## RESUMEN

La salinidad del suelo puede limitar la productividad de los cultivos, en particular en los Distritos de Riego localizados en las zonas áridas. El objetivo del estudio fue integrar información de la salinidad del suelo y agua subterránea que proviene de pozos de uso agrícola, del Distrito de Riego 017 de la Comarca Lagunera (Coahuila y Durango, México), con el fin de delimitar áreas de riesgo para el cultivo de la alfalfa y calcular la fracción de lavado requerida por estas áreas. Se utilizó el modelo de Letey y Dinar y, con técnicas GIS (Geographic Information System), se interpolaron los valores de la conductividad eléctrica del agua de riego. El área donde el rendimiento potencial de la alfalfa puede reducirse en más de 40%, sólo representa 4.7% del Distrito de Riego y tiene 954 ha en Tlahualilo, Durango. Sin embargo, la superficie donde se reducirá entre 20 y 30% del potencial de la alfalfa representa 20.58% del Distrito de Riego y requiere entre 20 y 40% de fracción de lavado. En estas condiciones existen 54 396 ha y la mayoría se localizan: a) al norte de Gómez Palacio, Durango, 20 237 ha; b) en San Pedro, Coahuila, 18 931 ha; c) al noroeste de Francisco I. Madero, Coahuila, 6500 ha y d) entre San Pedro y Francisco I. Madero, Coahuila, 6105 ha. Las restantes 2623 ha se encuentran en pequeñas áreas en Durango, en León Guzmán (255 ha) y Tlahualilo (239 ha), así como en Coahuila, en Matamoros (1356 ha), al norte de Francisco I. Madero (394 ha) y al norte de San Pedro (379 ha).

**Palabras clave:** *Medicago sativa, calidad del agua, conductividad eléctrica, salinidad del suelo.*

<sup>1</sup> Campo Experimental La Laguna, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 247, 27000 Torreón, Coahuila, México.

<sup>†</sup> Autor responsable ([jesussc@yahoo.com](mailto:jesussc@yahoo.com).)

Recibido: Septiembre de 2002. Aceptado: Febrero de 2004.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 343-349.

## SUMMARY

Soil salinity can limit crop productivity, particularly in Irrigation Districts in arid zones. The objective of this study was to integrate information on water and soil salinity in the Irrigation District 017, located in the Comarca Lagunera (Coahuila and Durango, Mexico), in order to delimit risk areas for alfalfa cropping and to calculate the leaching fraction for these areas. The Letey and Dinar model was used along with GIS (Geographic Information System) techniques, to interpolate electrical conductivity values of irrigation water. The area where alfalfa potential yield can decrease more than 40% represents only 4.7% of the Irrigation District. This is an area of 954 ha located in Tlahualilo, Durango. However, the area where the potential yield of alfalfa can decrease between 20 and 30% represents 20.58% of the Irrigation District and requires from 20 to 40% of leaching fraction. There are 54 396 ha under this condition mostly located in 1) Northern of Gómez Palacio, Durango with 20 237 ha; 2) San Pedro, Coahuila with 18 931 ha; 3) Northeast of Francisco I. Madero, Coahuila with 6500 ha; and 4) an area of 6105 ha between San Pedro and Francisco I. Madero, Coahuila. An additional 2623 ha is located in small areas in Durango, in León Guzmán (255 ha) and Tlahualilo (239 ha); as well as in Coahuila: in Matamoros (1356 ha), North of Francisco I. Madero (394 ha), and North of San Pedro (379 ha).

**Index words:** *Medicago sativa, water quality, electrical conductivity, soil salinity.*

## INTRODUCCIÓN

La acumulación de sales en el suelo es uno de los principales problemas que limitan la agricultura en riego. En general, las características del clima y del suelo y la calidad química del agua de riego, son las que determinan el proceso de salinización de los suelos en una región.

Aunque la fuente original de sales proviene de los minerales primarios que forman las rocas, las sales solubles en el suelo provienen, en su mayoría, de las sales disueltas en el agua de riego. Si la precipitación es muy baja (menor que 38 cm anuales), las sales solubles se quedan en el suelo y, al evaporarse el agua, las sales del agua del suelo ascienden por capilaridad a la superficie del suelo y, después de muchos años, se forman los suelos salinos (Castellanos *et al.*, 2000). Este proceso se presenta con frecuencia en zonas agrícolas de riego en condiciones de clima árido y semiárido, como la Comarca Lagunera.

Una forma de reducir el contenido de las sales solubles de un suelo es mediante un incremento de los volúmenes de agua aplicada, ya que el riego más la fracción de lavado lixiviará las sales solubles de la zona radical, alcanzando un equilibrio entre el contenido de sales del agua y las del suelo (Doorenbos y Kassam, 1979).

En la Comarca Lagunera, principalmente en el área de influencia del Distrito de Riego 017, la Comisión Nacional del Agua (CNA) realizó, en 1997, un muestreo de las aguas superficiales en 25 puntos en la red de distribución del sistema de riego. De este muestreo se obtuvieron los valores medios de aniones y cationes, así como los valores de la conductividad eléctrica del agua (CEa) y la relación de adsorción de sodio (RAS), mostrados en el Cuadro 1. De acuerdo con la clasificación de aguas para riego agrícola del Manual 60 del US Department of Agriculture (USDA, 1954) se clasificaron como C<sub>2</sub>S<sub>1</sub> de salinidad media o de buena calidad para uso agrícola y bajo peligro de sodio.

Sin embargo, en relación con el agua subterránea que proviene de pozos de uso agrícola, en 1997, la CNA llevó a cabo un estudio químico e isotópico de los pozos en el Distrito de Riego 017 en el cual se localizaron algunas áreas donde existe un elevado contenido de sales solubles. En estas áreas, los suelos también presentan valores altos de conductividad eléctrica evaluada en el extracto de saturación (CEes), lo que puede limitar la productividad de los cultivos y requerir de lavados en suelos con alto contenido de

sales solubles y la aplicación de mejoradores químicos en suelos con problemas de sodio, para conservar la productividad de este tipo de suelos.

Castellanos *et al.* (2000) indicaron que, aunque puede ocurrir la toxicidad por altas concentraciones de sodio, cloro u otros iones, las sales solubles comúnmente afectan el crecimiento de los cultivos debido al efecto osmótico. Este efecto consiste en que altas concentraciones de sales incrementan las fuerzas potenciales que retienen al agua en la solución del suelo y hace más difícil la extracción del agua por las raíces de la planta, incrementando la energía necesaria para su absorción. Por lo anterior, no es posible evaluar el riesgo ocasionado por el alto contenido de sales solubles en los suelos y agua de riego sin considerar la susceptibilidad de los cultivos a las sales.

Los principales cultivos en la Comarca Lagunera son los forrajeros, como la alfalfa que constituye el principal cultivo forrajero, ya que en 1999 se sembró una superficie de 35 182 ha lo que representó 53.9% de la superficie forrajera y una producción promedio de materia seca de 22.75 t ha<sup>-1</sup> de forraje seco. Kovda (1973), Maas y Hoffman (1977) y Doorenbos y Kassam (1979) consideraron a este cultivo como moderadamente sensible (MS) a la salinidad del suelo expresada por CEes, la cual incluye el complejo total de sales disueltas en la solución del suelo. Lo anterior indica que la reducción de rendimiento en relación con la CEes, medido en dS m<sup>-1</sup>, es de 0% para valores menores que 2 dS m<sup>-1</sup> y hasta de 25% para valores de 5.4 dS m<sup>-1</sup>, por lo que aproximadamente 43 000 ha dentro del Distrito de Riego 017 podrían verse afectadas con reducciones de 20% de su rendimiento potencial, ya que tienen valores de CEes entre 2 y 4 dS m<sup>-1</sup> (Santamaría *et al.*, 2000). Adicionalmente, Maas (1990) presentó una lista de 54 cultivos en orden creciente de tolerancia a los cloruros en la cual la alfalfa es ubicada en el lugar 28, con un valor crítico para el inicio en el efecto de reducción en rendimiento de 710 mg L<sup>-1</sup> de cloruros en la zona radical y una pendiente de la función del por ciento de reducción del rendimiento potencial de 24.85% mg L<sup>-1</sup> en la concentración de cloruros.

Cuadro 1. Características del agua superficial del Distrito de Riego 017. (CNA) 1997.

Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Dureza total	CEa	RAS	pH
----- me L <sup>-1</sup> -----								Mg L <sup>-1</sup>	μS cm <sup>-1</sup>		
1.44	0.26	0.71	0.17	0.37	1.7	0.12	0.5	106.6	268	0.77	8.1

En general, la respuesta de los cultivos a las condiciones de salinidad de los suelos se expresa mediante una relación lineal de la siguiente forma:

$$RR = 100 - B(CE_{es} - C) \quad (1)$$

Donde: RR es el rendimiento obtenido en condiciones de salinidad, expresado como por ciento de rendimiento potencial, B es la pendiente en la función lineal simple de reducción del rendimiento potencial del cultivo por la salinidad del suelo, medida en  $dS\ m^{-1}$ , para valores de la  $CE_{es} > C$ , C es el valor límite de tolerancia a la salinidad del suelo ( $dS\ m^{-1}$ ) que no provoca una reducción del rendimiento potencial del cultivo. Según Mass y Hofman (1977), se tiene para la alfalfa una  $C = 2.0\ dS\ m^{-1}$  y  $B = 7.3\% (dS)^{-1}\ (m)^{-1}$ , lo que indica que aún suelos con un bajo valor de  $CE_{es} \leq 4\ dS\ m^{-1}$ , pueden presentar problemas de reducción hasta de 15% y esto puede ocurrir también para otros cultivos sensibles o aun moderadamente sensibles como la alfalfa.

Una estrategia para disminuir los efectos de la salinidad en los cultivos consiste en estimar la fracción de lavado (FL), la cual es definida por Letey y Dinar (1986) de la siguiente forma:  $FL = \frac{CE_a}{CE_{da}}$

Donde:  $CE_a$  es la conductividad eléctrica del agua de riego y  $CE_{da}$  es la conductividad eléctrica del agua de drenaje, la cual substituye a la  $CE_{es}$  para valores en los cuales se presentan reducciones en rendimiento del cultivo hasta de 50% (Bernstein y Francois, 1973).

Los objetivos del presente trabajo son: a) integrar información sobre la salinidad del agua de riego y del suelo en el Distrito de Riego 017, así como de la susceptibilidad de la alfalfa a estas condiciones; b) generar mapas del Distrito de Riego 017 donde se delimitan áreas de riesgo para el desarrollo de la alfalfa; y c) calcular la fracción de lavado requerida para que el rendimiento de la alfalfa no se vea afectado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el área de influencia del Distrito de Riego 017, en la Comarca Lagunera y comprende los municipios de Torreón, San Pedro de las Colonias, Francisco I. Madero y Matamoros, en Coahuila, y Gómez Palacio, Lerdo, Bermejillo y Tlahualilo, en Durango, México. Esta región está

localizada entre los paralelos  $103^{\circ} 47'$  y  $102^{\circ} 42'$  O y  $26^{\circ} 26'$  y  $25^{\circ} 18'$  N (Santamaría *et al.*, 2000).

La salinidad del suelo ( $dS\ m^{-1}$ ) y del agua de pozo con fines agrícolas ( $\mu S\ cm^{-1}$ ) se obtuvo de un muestreo de suelos y agua georeferenciado proporcionado por la Gerencia Regional en la Laguna de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1997), la que está compuesta de 599 sitios, distribuidos en los 17 módulos de riego. También se utilizó la información de la productividad de la alfalfa en las condiciones climáticas de la Comarca Lagunera (Inzunza, 1989). Se empleó el modelo propuesto por Letey y Dinar (1986) y mediante técnicas GIS (Geographic Information System) se interpolaron los valores de la  $CE_a$ , en el rango de 2 a  $1207\ \mu S\ cm^{-1}$ . Para describir las condiciones de solución implementadas con el modelo de Letey y Dinar (1986) en este trabajo, se considera el riego con aguas salinas y se asume que se conoce la función de producción para el cultivo regado con aguas no salinas de la forma mostrada en la Figura 1. El  $DR = \Delta P(S)$  es la reducción en rendimiento, para  $Ao < Aa < ET_{max}$ . Donde:  $Ao$  es el valor de la evapotranspiración (ET) que se obtiene igualando a cero el rendimiento en la función de producción para el cultivo regado con aguas no salinas,  $Aa$  es la lámina de agua no salina aplicada en el ciclo del cultivo,  $ET_{max}$  es la evapotranspiración máxima del cultivo, S es la pendiente en esta función de producción y  $\Delta P$  es la profundidad de percolación.

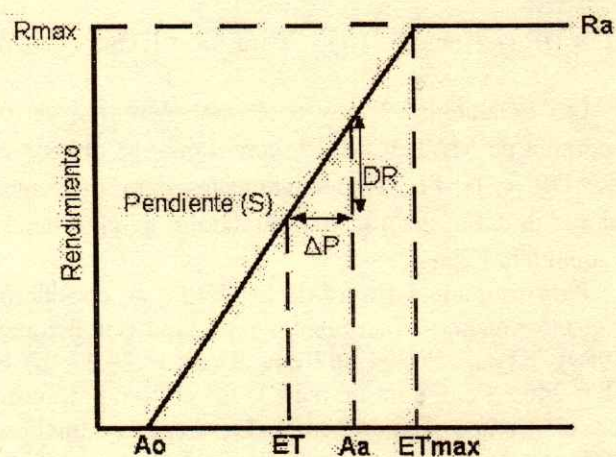


Figura 1. Relación entre el rendimiento actual ( $R_a$ ) y el agua no salina aplicada ( $A_a$ ) en el ciclo del cultivo, donde  $A_a \geq A_o$  y la  $ET = A_a$  para valores de  $A_a \leq ET_{max}$ .

Por definición se considera al rendimiento relativo como:

$$RR = 100(Ra - DR)(Ra)^{-1} \quad (2)$$

Donde: RR es el rendimiento relativo y Ra es el rendimiento actual o real, y sustituyendo la Ecuación 2 en 1, se obtiene:

$$CEes = C + 100(DR)(B)^{-1}(Ra)^{-1}, \text{ para } Ra \geq DR \geq 0 \quad (3)$$

Para considerar a la salinidad del agua de riego medido mediante la CEa, Raats, citado por Letey y Dinar (1986) propuso la relación entre la CEes y CEa de la forma:

$$2 \frac{CEes}{CEa} = -FL^{-1} + 0.2(FL)^{-1} \ln \left[ FL + (1 - FL)e^{-5} \right] \quad (4)$$

En el modelo de Letey y Dinar (1986), para el caso cuando  $Ao = ETmax$ , la relación entre la DR y la CEa es de la forma:

$$C + \frac{100DR}{B(Rmax)} - \frac{0.5CEa}{DR} - \frac{0.1CEa}{DR} \ln \quad (5)$$

$$\left[ 1 - \left[ 1 - \frac{DR}{Etmax(S)} \right] \left( 1 - e^{-5} \right) \right] = 0$$

y la FL de la forma:

$$FL = DR (ET \max)^{-1} (S)^{-1} \text{ para } Aa = ETmax \quad (6)$$

Las Ecuaciones 2, 5 y 6 se implementaron en un programa de MATHCAD™, con el cual se obtiene el RR, DR y la FL, respectivamente, para diferentes valores de CEa, en  $\mu S \text{ cm}^{-1}$ , cuando el agua aplicada es igual a la ETmax.

Para estimar el Rmax de la alfalfa, se consideró: a) la información experimental reportada por Inzunza (1989):  $ETmax = 204.867 \text{ cm}$ ,  $Rmax = 28.33$ , b) la  $ET = 246.53 \text{ cm}$ , para un manejo del cultivo propuesto por el Campo Experimental La Laguna, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, y c) se consideró un valor de 0.0 para el parámetro Ao propuesto por Letey y Dinar (1986).

En cuanto a la información sobre la susceptibilidad a la salinidad de la alfalfa, requerida

para el modelo de Letey y Dinar (1986), Maas y Hoffman (1977) indicaron que el valor límite de tolerancia a la salinidad es  $C = 2.0 \text{ dS m}^{-1}$ ;  $B = 7.3\% (\text{dS})^{-1} (\text{m})^{-1}$  y de Letey y Dinar (1986) el rango de la CEa por considerar es de 100 a  $800 \mu S \text{ cm}^{-1}$ , por lo que la fracción de riego fue de  $ETmax (ET)^{-1} = 0.831$  y  $S = Rmax (ETmax)^{-1} = 0.1383 \text{ t ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La calidad química del agua subterránea de los pozos para uso agrícola es variable en los valores de CEa no sólo espacialmente, sino a través del tiempo; sin embargo, la distribución de la CEa encontrada mediante la interpolación de la CEa del muestreo llevado a cabo en 1997 por la CNA y tomando en cuenta el sistema de clasificación del agua de riego por contenido de sales solubles del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América (USDA, 1954), concuerda con un estudio agrológico detallado del Distrito de Riego 017, llevado a cabo por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (Ojeda, 1939). En dicho estudio, 45.6% de los pozos de uso agrícola analizados tuvieron valores de salinidad no tolerables para la agricultura y 54.4% proporcionaron agua de calidad buena, de las cuales 11.1% fueron tolerables y 43.3% deberían manejarse con prácticas de riego adecuadas para evitar la salinización de los suelos. En este estudio, también se informa sobre la presencia de suelos tipo C y D (9.35% del área muestreada) los que contienen 0.6% o más de sales solubles y se consideran restrictivos para la agricultura. Estos suelos se localizaron principalmente próximos a la ciudad de Torreón, Coahuila, y al noroeste de la ciudad de Gómez Palacio, hacia el noroeste de Bermejillo y al noroeste en Tlahualilo, en Durango. Lo anterior parece indicar que la aplicación de agua de riego de pozo de uso agrícola con altos valores de CEa ha generado áreas con suelos de salinidad que limitan la productividad de los cultivos en estas áreas.

Del modelo de Letey y Dinar (1986) se obtuvo, mediante la Expresión 5, la reducción en rendimiento (DR); de la Ecuación 2, el rendimiento relativo (RR); y de la Expresión 6, la FL para diferentes valores de CEa ( $\mu S \text{ cm}^{-1}$ ) para la alfalfa, considerando la cantidad óptima de agua aplicada ( $Aa = ETmax$ ). Mediante técnicas de regresión, se ajustó el modelo cuadrático, cuyos detalles de ajuste se presentan en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Ajuste del modelo cuadrático al rendimiento relativo (RR) en el Modelo de Letey y Dinar (1986) en función de la conductividad eléctrica del agua de riego (CEa) 2002.**

Análisis de varianza para la variable rendimiento relativo (RR)					
Fuente de variación	g.l.	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Fc	Nivel de significancia
Regresión	2	0.09781	0.048905	3818.867	0.00001
Error	5	0.000064	0.000013		
Total	7	0.097874			
Estimación de parámetros					
Parámetro	Valor estimado	Error estándar	tc	Nivel de significancia	
Interceptada	0.983103	0.004993	196.9136	0.00000001	
$\alpha$	-0.072093	0.002545	-28.3228	0.0000001	
$\beta$	0.002682	0.000276	9.7128	0.000197	

Como  $R_{max} = 28.33$ , de la Expresión 5 se obtiene la DR y de la Expresión 6 se obtiene

$FL = 0.0596193 + 0.244479CEa - 0.009465958CEa^2$   
 expresión que permite estimar, previo el análisis químico del agua de pozo de uso agrícola, el por ciento en reducción del rendimiento potencial del cultivo, así como la fracción de lavado necesaria para mantener el equilibrio entre el contenido de sales del agua y del suelo, a valores estables en los que se logre una buena productividad en el sitio. Así, al manejar mediante técnicas GIS las bases de datos georeferenciadas de agua y los parámetros requeridos para el modelo de Letey y Dinar (1986) para la alfalfa, se encontró la distribución de las áreas con diferentes valores de reducción del rendimiento potencial y se generó una clasificación basada en el modelo cuadrático ajustado (Cuadros 2 y 3).

En esta clasificación, la producción marginal de la alfalfa (PMA) es aquella que presenta una reducción del rendimiento potencial superior a 40%, ya que éste es uno de los criterios más comunes en la literatura para establecer valores críticos de salinidad para los cultivos, como en el Manual 60 del USDA (1954). El nivel de potencial productivo (PP) es cuando la alfalfa sólo presenta una reducción máxima del rendimiento potencial inferior a 10% lo que, de acuerdo con la función cuadrática ajustada,

corresponde a valores de la CEa inferiores a  $1.2 \mu S cm^{-1}$  y la reducción en rendimiento de la alfalfa por el efecto de la salinidad no es apreciable. Se definen tres categorías intermedias, que corresponden aproximadamente a los valores de salinidad del agua de riego indicados en el Cuadro 3 y corresponden a la producción buena (PBU), que presenta una reducción del potencial entre 10 y 20%; producción media (PME), que presenta una reducción del potencial entre 20 y 30%; producción baja (PBA), que presenta una reducción del rendimiento potencial entre 30 y 40%; y la correspondiente FL se presenta en la Figura 2, para el área de influencia del Distrito de Riego 017.

Basado en el modelo cuadrático del Cuadro 2 y en el por ciento de reducción de rendimiento del potencial, se obtuvo la superficie afectada por salinidad del agua de riego de pozo para uso agrícola por módulo de riego (Cuadro 4). Se puede apreciar que sólo se presenta una superficie reducida (954 ha) en el área de Tlahualilo, Durango, con un contenido de salinidad que puede reducir el rendimiento potencial de la alfalfa en más de 40%. Las áreas con un porcentaje de reducción del rendimiento potencial entre 30 y 40, suman 11 474 ha, representan 4.34% del área de influencia del Distrito de Riego 017 y se localizan principalmente en el Módulo VI en el área de Tlahualilo y Módulo V en la región de Bermejillo,

**Cuadro 3. Clasificación del grado de reducción en el rendimiento potencial de la alfalfa por la salinidad del agua de riego (CEa). Comarca Lagunera. 2002.**

Clasificación	Reducción del rendimiento potencial		CEa
		%	$\mu S cm^{-1}$
Producción marginal	PMA	> 40	> 7292
Producción baja	PBA	30 a 40	4775 - 7292
Producción media	PME	20 a 30	2840 - 4775
Producción buena	PBU	10 a 20	1207 - 2840
Potencial productivo	PP	< 10	< 1207

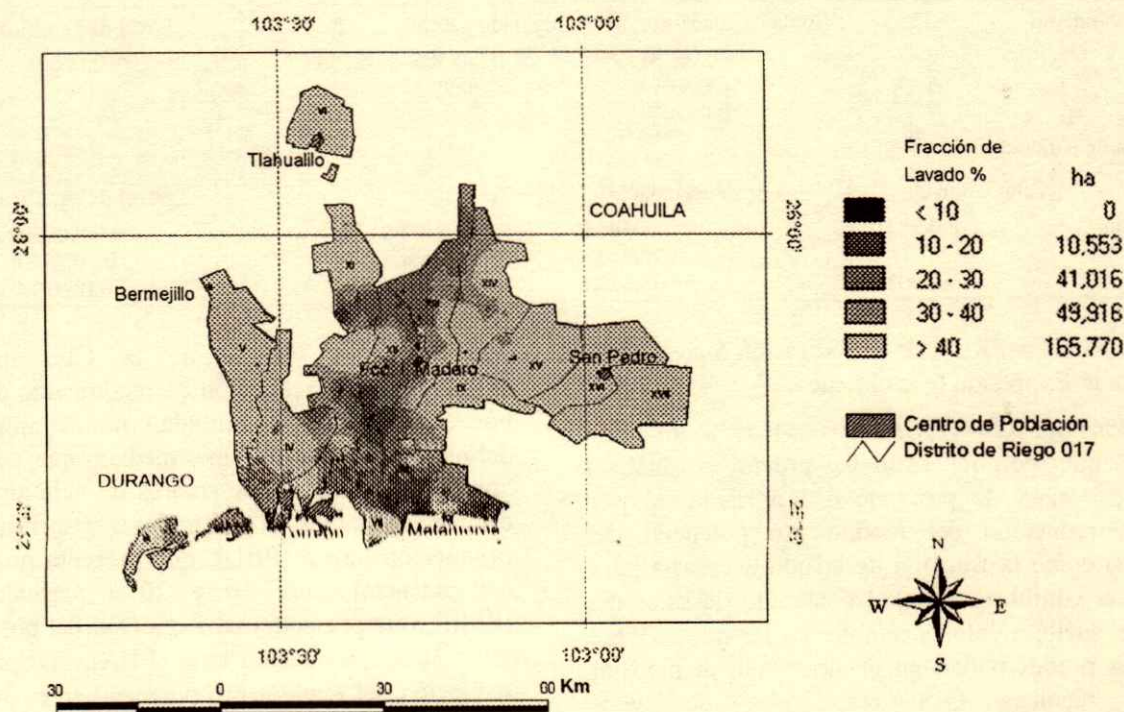


Figura 2. Distribución de la fracción de lavado requerida para el manejo de los riegos con agua salina para la alfalfa en el Distrito de Riego 017. Comarca Lagunera, 2002.

Cuadro 4. Por ciento de la reducción del rendimiento potencial de la alfalfa regada con agua salina del subsuelo por módulo de riego, Distrito de Riego 017. Comarca Lagunera, 2002

Módulo de riego	Reducción del rendimiento potencial de la alfalfa					Total
	> 40%	30 a 40%	20 a 30%	10 a 20%	< 10%	
	ha					
III	0	0	255	5426	3612	9293
IV	0	215	6165	11955	5462	23797
V	0	1737	14072	5580	120	21509
VI	954	9248	239	0	0	10438
VII	0	87	1304	3648	8166	13205
VIII	0	0	52	3491	18512	22055
IX	0	64	6105	6275	3522	15966
X	0	0	283	9967	8290	18540
XI	0	82	6500	4678	4370	15630
XII	0	0	103	3474	12190	15767
XIII	0	0	8	7475	14263	21746
XIV	0	0	379	17837	3549	21765
XV	0	0	4879	14408	0	19287
XVI	0	0	7642	9624	0	17266
XVII	0	41	6410	14646	0	21097
Total	954	11474	54396	118484	82056	267364

Durango. Las áreas de salinidad que pueden reducir entre 20 y 30% del rendimiento potencial suman 54 396 ha y representan un área considerable de la superficie total del distrito (20.58%); se localizan principalmente en: a) San Pedro (Módulos XV, XVI y XVII) con 18 931 ha; b) hacia el oeste, entre San Pedro y Francisco I. Madero, Coahuila, el Módulo IX con 6105 ha; c) al norte de Gómez Palacio, Durango, los Módulos IV y V con 20 237 ha; y d) al noroeste de Francisco I. Madero, el Módulo XI con 6500 ha. Las restantes 2623 ha se encuentran en pequeñas áreas en León Guzmán (255 ha) y Tlahualilo (239 ha), en Durango, así como en Matamoros (1356 ha), al norte de Francisco I. Madero (394 ha) y al norte de San Pedro (379 ha) en Coahuila.

El resto de la superficie del Distrito, 200 450 ha, que representan 75.86% de la superficie total, no tienen problemas con la calidad del agua de riego de pozo para uso agrícola por su contenido de sales solubles.

### CONCLUSIONES

- Existe una concordancia entre la distribución de la salinidad del extracto de saturación del suelo y el alto contenido de sales solubles en el agua de pozo de uso agrícola. El uso de agua de mala calidad, sin un manejo apropiado, ha generado áreas con alto contenido de sales solubles, disminuyendo así la productividad de la alfalfa hasta en 40% del rendimiento potencial de la alfalfa en aproximadamente 4.7% del Distrito de Riego 017 y 954 ha en Tlahualilo, Durango.

- La mayor superficie afectada por el contenido de sales solubles en el agua de pozo para uso agrícola, con una reducción entre 20 y 30% del rendimiento potencial de la alfalfa representa 20.58% del Distrito de Riego con 54 396 ha. Su localización es en San Pedro y al norte de Francisco I. Madero, Coahuila, y al norte de Gómez Palacio, Durango. Estos suelos requieren entre 20 y 40% de fracción de lavado.

### LITERATURA CITADA

- Bernstein, L. y L.E. Francois. 1973. Leaching requirement studies: Sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. *Soil Sci. Am. Proc.* 37: 931-943.
- Castellanos, J.Z., J.X. Uvalle B. y A. Aguilar S. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Colección INCAP. Segunda edición. San Miguel Allende, Guanajuato, México.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1997. Monitoreo de la calidad del agua y salinidad analizada en los suelos del distrito de Riego 017. Gerencia Regional Norte Distrito de Riego 017. Región Lagunera. Ciudad Lerdo, Durango, México.
- Doorenbos, J. y A.H. Kassam. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Food and Agricultural Organization. Roma, Italia.
- Inzunza I., A. 1989. Comportamiento de la alfalfa en respuesta del déficit evapotranspirativo en la fase de producción. Informe de Investigación 88. Gómez Palacio, Durango, México. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria, Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias 2: 31-71.
- Kovda, V.A. 1973. Quality of irrigation water. Soluble components in irrigation water. pp. 177-205. *In: Irrigation, drainage and salinity.* Food and Agricultural Organization/UNESCO. Hutchinson Publishers. London, UK.
- Letey, J. y A. Dinar. 1986. Simulated crop-water production functions for several crops, when irrigated with saline water. *Hilgardia* 54: 32.
- Maas, E.V. y G.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance current assessment. *J. Irrig. Drain. Div. American Society of Civil Engineering* 103 (IR2): 115-134.
- Maas, E.V. 1990. Crop salt tolerance. pp. 262-304. *In: Tanji, K.K. (ed.). Agricultural salinity assessment and management.* Chapt. 13. ASCE Manuals and Reports on Engineering 71. American Society of Civil Engineering. New York.
- Ojeda O., D. 1939. Estudio agrológico detallado del Distrito de riego en la Comarca Lagunera, Estados de Coahuila y Durango. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Lerdo, Durango, México.
- Santamaría, C.J., G. Núñez H., G. Medina G. y J.A. Ruiz C. 2000. Potencial productivo de la alfalfa en México. pp. 1-7. *In: Producción y utilización de la alfalfa en la zona norte de México.* Libro Técnico 2. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México.
- USDA. US Department of Agriculture. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook 60. Washington, DC.

# EVALUACIÓN DE ABONO ORGANO-MINERAL DE CACHAZA EN LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Evaluation of Organic-Mineral Fertilizer of Filter Cake on Yield and Quality of Sugarcane

Jesús Arreola-Enriquez<sup>1</sup>, David J. Palma-López<sup>1†</sup>, Sergio Salgado-García<sup>1</sup>, Wilder Camacho-Chiu<sup>2</sup>, J. Jesús Obrador-Olán<sup>1</sup>, J. Francisco Juárez-López<sup>1</sup> y Laureano Pastrana-Aponte<sup>3</sup>

## RESUMEN

En diversas partes del mundo y en México, la cachaza se ha utilizado como abono orgánico con resultados prometedores, con el inconveniente de que su uso requiere de grandes volúmenes por hectárea, dificultando su transporte y manejo. Se evaluaron los efectos de tres dosis de cachaza enriquecida con N (0.6%) y K (0.2%) sobre las propiedades del suelo, el rendimiento y la calidad del jugo de caña azúcar, además de la fórmula de fertilización convencional y un testigo, con un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. Los resultados indican que el suelo mejoró sus propiedades químicas con respecto al testigo absoluto y los tratamientos con 10 y 15 t ha<sup>-1</sup> de abono órgano-mineral de cachaza (AOMC) fueron los que respondieron en un incremento en variables, como: materia orgánica (15 y 24%), pH (6 y 8%), N total (48 y 70%), N mineral (144 y 162%), P (300 y 461%) y K (46 y 47%). Asimismo, el rendimiento de caña se incrementó significativamente cuando se fertilizó con 10 t ha<sup>-1</sup> de AOMC (84.6 t ha<sup>-1</sup>), en comparación con el testigo y la fertilización química (35 y 52 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Por otra parte, la calidad del jugo (grados Brix, sacarosa, pureza y fibra) no mostró efecto de tratamientos, por lo que se puede deducir que con 10 y 15 t ha<sup>-1</sup> AOMC es posible incrementar el rendimiento de caña de azúcar sin afectar la calidad del jugo y, simultáneamente, evitar la actual contaminación ambiental provocada por los fertilizantes químicos utilizados en este cultivo

**Palabras clave:** *Saccharum officinarum*, propiedades del suelo, nutrimentos.

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. 86500 H. Cárdenas, Tabasco, México.

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico Agropecuario No. 28. Villahermosa, Tabasco, México.

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Huimanguillo, Tabasco, México.

<sup>†</sup> Autor responsable (dapalma@colpos.mx)

Recibido: Febrero de 2001. Aceptado: Octubre de 2003.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 351-357.

y por la cachaza arrojada a los cuerpos de agua y suelo.

## SUMMARY

Around the world, including Mexico, filter cake has been used as organic fertilizer. Results have been very good but transportation and handling are difficult, as large amounts of filter cake are needed per hectare. Three fertilization rates of filter cake enriched with N (0.6%) and K (0.2%) were evaluated for soil properties, yield, and quality of sugar cane. A conventional fertilization formula and a soil control were also tested. The experiment had a random model with four replications. Results indicate that chemical properties improved the soil, with respect to the control soil. The treatments receiving 10 and 15 t ha<sup>-1</sup> AOMC corresponded to those that increased several variables: organic matter (15 and 24%), pH (6 and 8%), total N (48 and 70%), mineral N (144 and 162%), P (300 and 461%), and K (46 and 47%). Similarly, the yield of sugar cane increased significantly when 10 t ha<sup>-1</sup> AOMC (84.6 t ha<sup>-1</sup>) were applied, compared to the control soil and inorganic fertilizer (35 and 52 t ha<sup>-1</sup>, respectively). On the other hand, juice quality (Brix degrees, saccharose, purity, and fiber) was not different among treatments. For that reason we may assume that with 10 and 15 t ha<sup>-1</sup> of AOMC it is possible to increase the yield of sugar cane without detriment to juice quality. At the same time, the environmental pollution caused by the wasted filter cake, released into the soil and water bodies caused by chemical fertilizers currently used in sugar farming, may be avoided.

**Index words:** *Saccharum officinarum*, soil properties, nutrients.

## INTRODUCCIÓN

Para producir una tonelada de tallos molederos, el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) requiere de 1.2 kg de N, 0.7 kg de P y 3.0 kg de K, por lo cual es considerado extractivo, y con estos



nutrimentos la dosis de fertilización recomendada por el Ingenio Pdte. Benito Juárez (120-60-60) es insuficiente para satisfacer sus requerimientos en esta región (Salgado *et al.*, 2000); además, se ha detectado que sólo 30% del N del fertilizante es utilizado por el cultivo de la caña de azúcar (Salgado *et al.*, 2001b). Esto plantea la necesidad de buscar nuevas estrategias de fertilización que permitan conservar la fertilidad para producir caña de azúcar de manera sostenible.

La agroindustria de la caña de azúcar en Tabasco genera 40 500 t año<sup>-1</sup> de cachaza, cuyo material orgánico de color pardo oscuro proviene de la filtración y del lavado de los lodos sedimentados (tierra, ceras y raíces) del proceso de clarificación de los jugos de caña (Salgado *et al.*, 2001a).

La cachaza representa un problema en los ingenios por las grandes áreas que se requieren para su almacenamiento, además, genera mal olor y, en muchas ocasiones, es un foco de infección y un riesgo para la conservación del ambiente (Salgado *et al.*, 2001a). Sin embargo, lejos de ser un problema ambiental, este subproducto representa un abono orgánico con alto contenido nutrimental, dependiendo de la zona cañera y del proceso industrial. Se han encontrado que posee en base seca de 46 a 70% de materia orgánica (MO), 2.29% de N, 2.07% de P, 0.56% de K, 13% de Si, 0.68% de SO<sub>3</sub>, 0.11% de Cl, 5.63% de CaO, 0.07% de Na<sub>2</sub>O, 0.25% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.47% de MgO y 6.24% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Aloma, 1970).

Por esta razón, en diversas regiones cañeras del mundo, como Cuba, Brasil y México, la cachaza se ha utilizado en la fertilización del cultivo de caña con resultados prometedores y los incrementos en el rendimiento de caña son debidos a los cambios favorables en las propiedades físicas y químicas del suelo (Aso y Bustos, 1991). Una limitante para su uso masivo ha sido la cantidad que se tiene que aplicar para satisfacer la demanda nutrimental del cultivo (hasta 180 t ha<sup>-1</sup>), que trae como consecuencia problemas del manejo y de costo durante su transporte y la aplicación de la cachaza.

Una alternativa para darle uso a este subproducto de agroindustria es su aplicación como abono organo-mineral (AOMC) al cultivo de la caña de azúcar, de forma tal que las dosis por hectárea no dificulten y encarezcan el manejo por transporte y aplicación de la misma en campo; esta opción se refiere al composteo y enriquecimiento nutrimental de la cachaza, con la adición de urea, para producir un abono organo-mineral. Razón por la cual, el objetivo de este

trabajo fue evaluar el efecto de la fertilización con un AOMC en el comportamiento de algunas propiedades químicas de un Vertisol (MO, pH, N total, N mineral, P y K), en el rendimiento y en la calidad de la caña de azúcar.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización y Caracterización del Área de Estudio

El estudio se realizó durante un año, del 20 de mayo de 1999 al 20 de mayo de 2000 en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco (17° 59' N y 93° 34' O); el clima es cálido húmedo con lluvias durante todo el año, temperatura media anual de 26 °C y precipitación media anual de 2256 mm.

El suelo fue un Vertisol eútrico, con las siguientes propiedades iniciales de la capa arable: pH: 6.0; MO: 2.49%; Nt: 0.09%; P asimilable: 14.03 mg kg<sup>-1</sup>; K: 0.192 cmol (+) kg<sup>-1</sup>; Ca: 14.71 cmol (+) kg<sup>-1</sup>; Mg: 7.35 cmol (+) kg<sup>-1</sup>; Na: 0.13 cmol (+) kg<sup>-1</sup>; arena: 34%; limo: 28%; arcilla: 38% (textura migajón arcilloso). Los análisis correspondientes se realizaron de acuerdo con los métodos recomendados por Jones *et al.* (1991).

### Antecedentes y Manejo del Cultivo

El experimento se llevó a cabo con un cultivo de caña de azúcar variedad Mex-69-290 en resoca Número 5. Después de realizar la cosecha anterior, se procedió a la limpieza del campo para remover la paja y para alomar los residuos poscosecha por gavilla (cada seis surcos). Las prácticas agronómicas para el manejo del cultivo se realizaron de acuerdo con Salgado (1999) y éstas consistieron en un paso de subsoleo, un paso de cultivadora, una aplicación de herbicida Velpar K3 (Diuron: (3-(3,4-diclorofenil)-1,1-Dimetilurea) a razón de 2 L ha<sup>-1</sup> en 400 L de agua, aplicación de cebos envenenados con base en Warfarina (Cumarina) para el control de la rata cañera y seis chapeos manuales en callejones para facilitar el acceso a las parcelas durante los muestreos. La aplicación de los tratamientos de fertilización se realizó a dos meses de edad de la caña (julio de 1999). La cosecha se realizó en forma manual a 11 meses de edad, previamente se realizó la quema, con el propósito de facilitar el corte de caña.

## Elaboración del AOMC

El tratamiento previo de la cachaza utilizada consistió en apilarla en montones con 30 cm de espesor y 10 m de longitud sobre una capa de plástico para iniciar el proceso de composteo y evitar el efecto de lluvia y favorecer las altas temperaturas, y, por ende, un proceso de precomposteo y mineralización en el menor tiempo posible; cada cuatro días, se realizaba el volteo para favorecer la aireación. El pH del material se comportó estable por lo que no representó ningún problema. Posteriormente, se mezcló una tonelada de cachaza en base seca con 0.6 de N (urea) y 0.2% de K (KCl); el composteo tuvo una duración de 24 días y, de esta forma, se obtuvo abono organo-mineral de cachaza (AOMC). Previo a la aplicación de éste, se analizó su composición química (Jones *et al.*, 1991) (Cuadro 1).

## Diseño Experimental

Los tratamientos en estudio fueron cinco; en el Cuadro 2 se presentan las dosis aplicadas y la aportación total de N, P y K, por cada tratamiento de fertilización. Los cinco tratamientos se distribuyeron en el campo en un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. La parcela experimental fue de 7.8 m de ancho (seis surcos de 13 m) por 12 m de largo con parcela útil de 6.5 m (cinco surcos) por 10 m de largo.

Los tratamientos de fertilización se aplicaron a dos meses de edad de la caña de azúcar. El AOMC se aplicó en banda sobre la cepa de 20 a 30 cm de distancia del tronco, posteriormente se incorporó a 15 cm de profundidad sobre ambos lados del surco de caña. El fertilizante comercial se aplicó de manera simultánea como se acostumbra en la región semienterrado de 20 a 30 cm de la cepa de caña para simular la aplicación mecanizada (Salgado, 1999).

## Variables Evaluadas y Toma de Muestras

**Suelo.** Los muestreos de suelo se realizaron cada mes, a partir del mes de aplicados los tratamientos en

campo y continuaron durante nueve meses consecutivos (de agosto 1999 a abril de 2000). Se determinaron pH, MO, Nt, P asimilable, K intercambiable,  $\text{NH}_4$  y  $\text{NH}_3$  con los métodos descritos por Jones *et al.* (1991).

**Rendimiento de caña.** La cosecha se realizó en mayo de 2000. En cada unidad experimental se cortó la caña y se separó por componente (tallo moletero, mamón, punta y basura), se registró el peso fresco y los datos se transformaron a  $\text{t ha}^{-1}$ .

**Calidad del jugo de caña.** Está definida por los parámetros grados Brix, sacarosa, pureza y fibra; de cada tratamiento se tomaron 10 cañas al azar y se llevaron al laboratorio del Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ), donde se les realizaron las determinaciones indicadas (Golcher *et al.*, 1984).

## Análisis Estadístico

Los datos de cada una de las variables de estudio se analizaron estadísticamente por medio de un análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ( $P < 0.05$ ), con el programa computacional SAS, Versión 6.12 (SAS Institute, 1995).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Efectos del AOMC en las Propiedades Químicas del Suelo

El aporte de los elementos primarios (N, P, K) en los tratamientos se incrementó conforme a la dosis de aplicación de AOMC; la dosis de  $15 \text{ t ha}^{-1}$  presentó los mayores valores como era de esperarse (Cuadro 2).

En cuanto al comportamiento de las propiedades químicas, se observó la siguiente dinámica.

**Materia orgánica.** Se encontraron diferencias significativas en el contenido de MO del suelo cañero a nueve meses de la aplicación, por efecto del tipo y de la dosis de fertilización (Cuadro 3). El porcentaje de MO fue mayor en el tipo de fertilización organo-mineral, lo cual se atribuye a que estos tratamientos aportaron al suelo cantidades más altas de MO y que

Cuadro 1. Algunas características nutrimentales del abono organo-mineral de cachaza (AOMC) (base seca).

Humedad	MO <sup>†</sup>	N	P	K	Ca	Mg	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	pH
		%					mg kg <sup>-1</sup>		H <sub>2</sub> O (1:2)
59	68	2.58	2.03	1.31	4.13	0.31	127	987	6.7

<sup>†</sup> MO = materia orgánica.

**Cuadro 2. N, P, K promedio aportados por el abono organo-mineral de cachaza (AOMC) en un Vertisol cultivado con caña de azúcar, en la Chontalpa, Tabasco.**

Tratamiento <sup>†</sup>	Fertilización	Nutrimientos aportados		
		Nt	P	K
		----- kg -----		
T0	Testigo	0	0	0
T1	120-60-60	120.0	26.0	31.6
T2	5 t ha <sup>-1</sup>	129.0	101.5	65.5
T3	10 t ha <sup>-1</sup>	258.0	203.0	131.0
T4	15 t ha <sup>-1</sup>	387.0	304.5	196.5

<sup>†</sup>T2, T3 y T4 con base en materia seca.

la aplicación se realizó en forma localizada sobre el surco; los valores máximos se asociaron con la dosis de 15 t ha<sup>-1</sup> de AOMC, seguido por la de 10 t ha<sup>-1</sup> y la de 5 t ha<sup>-1</sup>; esto coincide con lo encontrado por Medina (1980), Rivera (1985), Paneque y Martínez (1992), Machado y Nieves (1993) y Armida *et al.* (1998), quienes encontraron aumentos significativos de MO en el suelo como efecto de las aplicaciones de cachaza sola o enriquecida al cultivo de caña de azúcar.

Entre el tratamiento de fertilización química y el testigo no se encontraron diferencias significativas. Los valores de MO en cada uno de los tratamientos, y en general durante el tiempo de muestreo, se mantuvieron en un valor considerado medio.

**pH.** El pH del suelo cañero fue ligeramente mayor en los tratamientos fertilizados con el AOMC, respecto al testigo y al tratamiento de fertilización química (Cuadro 3). Este incremento se considera benéfico porque la mayor disponibilidad de los elementos esenciales para el cultivo de caña ocurre a valores de pH entre 6 y 7 (Salgado *et al.*, 2001a) y, además, favorece la actividad bacteriana, responsable de la mineralización de la MO (Alexander, 1982). Resultados similares fueron encontrados por Arzola y Alonso (1982), Paneque y Martínez (1992) y Machado y Nieves (1993), pero discrepan de los encontrados por Arzola *et al.* (1981), Rivera (1985) y

Armida *et al.*, (1998) quienes, aplicando cachaza a un suelo cañero, no observaron incrementos significativos en el pH. El incremento del pH puede atribuirse al gran contenido de bases, en especial Ca que el AOMC contiene (Cuadro 1), que son suficientes para neutralizar los ácidos formados durante la descomposición de la MO o la acidez nativa del suelo. Parece ser que el alto porcentaje de bases (Ca y Mg) aportado por la cachaza fue capaz de neutralizar los iones H<sup>+</sup> presentes en la solución del suelo y mantener estos cambios al año de incorporados, ya que, según Prasad (1977), con aplicación de cachaza disminuyen considerablemente los valores de Al y Mn en suelos arcillosos y arenosos.

**Nitrógeno total.** El Nt tuvo un comportamiento muy similar al de la MO, es decir, el tipo y la dosis de fertilización influyeron significativamente sobre el contenido de Nt del suelo (Cuadro 3). El mayor contenido de Nt se encontró, en orden descendente, de 15 a 5 t ha<sup>-1</sup> de AOMC, seguido del tratamiento con fertilización química y, por último, del testigo. Leal (1987) encontró resultados similares, pero Armida *et al.* (1998) no encontraron aumentos significativos de Nt en suelo con tratamientos de cachaza sin enriquecer (de 10 hasta 45 t ha<sup>-1</sup>). Esta discrepancia de resultados se debe posiblemente a las diferencias químicas de la cachaza aplicada y, colateralmente, a la fertilidad del suelo experimental. La alta correlación entre los aumentos de Nt y los de MO se deben a que casi el total del primero se encuentra en forma orgánica (proteínas, vitaminas y aminoácidos), como lo indicó Kumada (1987).

**N mineral.** Las variables nitrato y amonio presentan respuesta significativa a los tratamientos, como se aprecia en el Cuadro 2. El mayor contenido de nitratos se obtuvo con 10 y 15 t ha<sup>-1</sup> de AOMC, el medio con 5 t ha de AOMC y el más bajo en los tratamientos de fertilización química y testigo. Esto coincide con Arzola y Alfonso (1982) y Arzola *et al.* (1981),

**Cuadro 3. Efecto de la fertilización con el abono organo-mineral de cachaza (AOMC) en algunas propiedades químicas de un Vertisol, nueve meses después de la incorporación del AOMC.**

Fertilización	MO <sup>†</sup>	Nt	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	pH	P	K
	----- % -----		----- mg kg <sup>-1</sup> -----			mg kg <sup>-1</sup>	cmol(+)kg <sup>-1</sup>
Testigo (T0)	2.57 d <sup>†</sup>	0.091 d	10.00 d	16.97 d	6.08 b	13.00 e	0.188 d
12-60-60 (T1)	2.57 d	0.098 d	13.88 c	17.16 d	6.04 b	18.77 d	0.225 c
5 t ha <sup>-1</sup> (T2)	2.86 c	0.116 d	20.66 b	20.02 c	6.45 a	31.88 c	0.252 b
10 t ha <sup>-1</sup> (T3)	2.97 b	0.135 b	34.00 a	32.02 b	6.49 a	52.11 b	0.276 a
15 t ha <sup>-1</sup> (T4)	3.19 a	0.155 a	36.55 a	35.36 a	6.59 a	73.44 a	0.278 a

<sup>†</sup>MO = materia orgánica. <sup>†</sup>Medias con la misma letra en columna son estadísticamente iguales Tukey (P < 0.05).

quienes midieron el efecto de la cachaza sobre algunas características del suelo y obtuvieron un incremento del N mineral de 43 y 70%, respectivamente, con relación al testigo absoluto; Rivera (1985), con 4 kg de cachaza por planta + N<sub>80</sub>PK, obtuvo mayor respuesta, con significancia estadística, respecto a los tratamientos N<sub>0</sub>PK, N<sub>80</sub>PK, estiércol 4 kg por planta + N<sub>80</sub>PK (106, 138, 675% más de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y 3, 0 y 176% más de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

La liberación del N de la MO del suelo durante el periodo de desarrollo de los cultivos depende del porcentaje y de la calidad de la MO presente, de la textura del suelo, de la temperatura y de las condiciones de humedad existentes. Cabe destacar que el coeficiente de variación encontrado en esta variable fue 26%, que se atribuye a la dinámica del N mineral evaluado a través del NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en los suelos.

El comportamiento del amonio (Cuadro 2) fue similar al de los nitratos; el contenido más alto se encontró en la dosis de 15 t ha<sup>-1</sup> de AOMC, disminuyendo en función de la dosis aplicada del AOMC, mientras que en los tratamientos de fertilización química y el testigo, no existieron diferencias significativas entre ellos, pero sí en los tratamientos de fertilización órgano-mineral. Por otra parte, las condiciones de humedad presentes en el Vertisol favorecieron la forma de ambas formas minerales de N.

**Fósforo.** Los tratamientos tuvieron efectos altamente significativos sobre el P asimilable en el suelo. Se encontraron diferencias entre todos los tratamientos (Cuadro 2), predominando las mejores respuestas en los tratamientos de fertilización con AOMC y las más bajas en el tratamiento de fertilización comercial y el testigo. Esto concuerda con Arzola *et al.* (1981), Arzola y Alfonso (1982), Rivera (1985), Leal (1987), Paneque y Martínez (1992), Machado y Nieves (1993) y Armida *et al.* (1998), quienes, con diferentes dosis de cachaza aplicada al suelo, lograron incrementos de P de 156, 300, 58, 150, 141, 100, 150, 232 y 163%, respectivamente, basándose en el testigo.

El efecto favorable de la MO del fertilizante organo-mineral o cachaza sola sobre la cantidad de P disponible para las plantas puede atribuirse al aporte de este nutrimento cuando ocurre el proceso de mineralización, quedando en libertad aniones de fosfato que pueden ser asimilados por las plantas. Por otra parte, el humus evita la fijación de P que se libera de la cachaza o que es aplicado mediante fertilizantes minerales. El aumento de pH encontrado eleva el contenido residual del P, esto debido a que al

reducirse la acidez del suelo, disminuye la fijación de los abonos fosfóricos (Cairo *et al.*, 1994).

Gran parte del requerimiento de P de la planta de caña de azúcar puede ser suministrado por la cachaza. La liberación de P a partir de la cachaza aplicada al suelo depende de su tasa de mineralización. Paneque y Martínez (1992) han calculado que alrededor de 60% del total de P en la cachaza puede ser liberado durante el primer año.

**K intercambiable.** La variable K también mostró efecto de los tratamientos (Cuadro 2); esto coincide con Guijarro *et al.* (1981), Arzola y Alfonso (1982), Rivera (1985) y Leal (1987), quienes también obtuvieron con las aplicaciones de cachaza aumentos de K en suelo de 11, 14, 144, 70 y 13%, respectivamente; sin embargo, esto discrepa con Paneque y Martínez (1992) y Armida *et al.* (1998). Esta divergencia en respuesta a tratamientos de cachaza sobre el contenido de K en suelo puede deberse a que la cachaza no posee una composición química cuantitativamente definida, pues depende principalmente de la zona cañera y del proceso seguido por la extracción (Arzola *et al.*, 1981), además de que los autores citados utilizaron cachaza sin enriquecer con K. Salgado *et al.* (2001a) reportaron que la cachaza presenta un bajo contenido de K<sub>2</sub>O, por lo que lo considera un abono incompleto para la caña de azúcar. Entre 10 y 15 t ha<sup>-1</sup> de AOMC no hubo diferencias estadísticas significativas, pero la dosis de 5 t ha<sup>-1</sup>, los tratamientos con fertilización química y el testigo sí lo mostraron, los cuales tuvieron sus valores en orden descendente (Cuadro 2). Los tratamientos de AOMC, tuvieron mayor tasa de liberación debido a que éstos, en su estado inicial (Cuadro 1) tenían mayor contenido de K, debido al enriquecimiento con cloruro de potasio.

#### Efecto del AOMC en el Rendimiento de Materia Fresca de Caña de Azúcar

En la producción agrícola, es más importante considerar la materia seca (MS) que la materia fresca (MF), pues esta última considera además de la MS al agua existente, la cual carece de valor económico. Sin embargo, en el caso del cultivo de caña de azúcar, la MF es importante debido a que en el jugo que contienen los tallos molidos se encuentra el azúcar, el cual es el producto final. La expresión del rendimiento de la caña de azúcar normalmente es en relación con el peso fresco de los tallos molidos.

En lo que respecta a tallos molederos, el rendimiento fue significativamente afectado por el tipo de dosis de fertilización de los tratamientos (Cuadro 4). Esto coincide con Arzola y Alfonso (1982), quienes obtuvieron un incremento en el rendimiento de caña de azúcar con aplicaciones de cachaza en plantilla y soca de 62 y 32%. Leal (1987) logró incrementar en ciclo plantilla y soca el rendimiento en 27 y 18%, aplicando 20 t ha<sup>-1</sup> de cachaza al cultivo de caña. Resultados similares encontraron Paneque y Martínez (1992) quienes, con utilización de cachaza enriquecida, en ciclos Soca 1 y Soca 3, lograron incrementos de 8 y 14%. Prieto y Nieto (1964) obtuvieron 45 y 40% más de caña de azúcar, con el fertilizante organo-mineral 12-8-8 + 10 t ha<sup>-1</sup> de composta de cachaza, e incrementos de sólo 7.4 y 8.8% de caña y azúcar, respectivamente, cuando aplicaron 10 y 15 t ha<sup>-1</sup> de cachaza sola, en comparación con el testigo. De forma similar, Cepero *et al.* (1989) observaron un rendimiento de tallos molederos 46% mayor que el testigo con 50 t ha<sup>-1</sup> de cachaza aplicada al cultivo.

Sin embargo, estos resultados discrepan con Machado y Nieves (1993) quienes, a pesar de mejorar la MO, el pH y el P del suelo con tratamientos de cachaza, no lograron incrementos significativos en el rendimiento; análogamente Armida *et al.* (1998), aplicando de 10 hasta 45 t ha<sup>-1</sup> de cachaza, no lograron incrementos significativos en el rendimiento del cultivo.

Cuando se fertilizó con 10 t ha<sup>-1</sup> del AOMC, se obtuvo el mayor rendimiento de tallos molederos (84.66 t ha<sup>-1</sup>), muy superior al obtenido con el testigo y la fertilización química (Cuadro 3), lo cual indica que la dosis de fertilización 120-60-60 es insuficiente para satisfacer los requerimientos nutricionales de la caña de azúcar, como lo señalaron Salgado *et al.* (2000); estos autores encontraron rendimientos de caña de azúcar de 130 t ha<sup>-1</sup> en Vertisoles, cuando la

caña se fertiliza con la dosis 160-80.80, y es aplicada a tres meses de edad en forma mecanizada. Esto, aunado a la baja eficiencia de utilización de los nutrimentos primarios: 29.3, 47.3 y 243.5%, para el caso de N, P y K, respectivamente, según reportaron Salgado *et al.* (2001b) hace necesario explorar nuevas alternativas para mejorar la fertilización de la caña de azúcar, como lo es el uso de abonos orgánicos y composta, por los beneficios que puede aportar al suelo.

La producción de mamonos fue similar en todos los tratamientos, sin embargo, las puntas, la basura y el total de la biomasa aérea, medida en peso fresco, tuvieron el mismo comportamiento que los tallos molederos (Cuadro 4). La mayor producción de biomasa aérea (incluyendo tallos molederos) con el fertilizante organo-mineral, se debió a que éste suministró mayor cantidad de nutrimentos (Cuadro 3).

#### Efecto del AOMC en la Calidad del jugo de Caña

De los parámetros de calidad del jugo (grados Brix, sacarosa, pureza y fibra) no hubo efecto de los tratamientos de fertilización, no obstante que se aplicaron dosis de N mayores que 200 kg ha<sup>-1</sup> (Cuadro 3). Esto coincide con Salgado *et al.* (2000), quienes probaron varias fuentes y formas de aplicación de fertilizantes químicos sobre el rendimiento y la calidad del jugo de caña de la variedad Mex 69-290 en un Vertisol, sin encontrar efectos de tratamientos sobre los parámetros de calidad del jugo de caña, como grados Brix, sacarosa, pureza y fibra (porcentaje en peso de sacarosa pura).

Este comportamiento de los parámetros de calidad por efecto de tratamientos obedece a que estos últimos influyeron directamente sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas de caña de azúcar, pero ejercieron escasa influencia sobre la formación directa y calidad de los jugos de tallos molederos.

Cuadro 4. Efecto de la fertilización en el rendimiento en materia fresca de caña, en la región de la Chontalpa, Tabasco.

Fertilización	Peso fresco				
	Tallos molederos	Mamonos	Puntas	Basura	Biomasa total
	----- t ha <sup>-1</sup> -----				
Testigo (T0)	35.31 c <sup>†</sup>	7.64 c	11.55 b	5.99 b	60.51 c
Fertilización química (T1)	50.42 c	8.50 c	14.83 b	9.82 ab	83.59 bc
5 t ha <sup>-1</sup> (T2)	64.27 ab	14.04 a	17.78 ab	9.03 ab	105.14 ab
10 t ha <sup>-1</sup> (T3)	84.66 a	8.45 a	25.21 a	13.06 ab	131.40 a
15 t ha <sup>-1</sup> (T4)	76.31 ab	9.17 ab	18.68 ab	16.29 a	120.47 a

<sup>†</sup> Medias con la misma letra en columna son estadísticamente iguales Tukey (P < 0.05).

## CONCLUSIONES

- El contenido de MO, N total, N mineral, pH, P y K en el suelo fue superior en los tratamientos con base en abono organo-mineral de cachaza (AOMC), respecto al testigo absoluto. Cuando se fertilizó con 10 y 15 t ha<sup>-1</sup> de AOMC, ésta superó a la fertilización química y mejoró las características químicas del suelo y la nutrición del cultivo. Además, produjo un incremento significativo en el rendimiento de la caña de azúcar.
- La mayor producción de biomasa aérea del cultivo de caña de azúcar se obtuvo cuando se fertilizó con 10 y 15 t ha<sup>-1</sup> de AOMC. Con la fertilización química convencional (120-60-60) se redujo 40.4% el rendimiento de la caña de azúcar, respecto a la fertilización con 10 t ha<sup>-1</sup> de AOMC.
- La calidad del jugo de caña de azúcar (grados Brix, sacarosa, pureza y fibra) no se vio afectada por el tipo y dosis de fertilización.
- La elaboración del AOMC es una alternativa factible para utilizar apropiadamente la cachaza producida en estos ingenios y contribuye al mejoramiento del suelo y del ambiente.

## LITERATURA CITADA

- Alexander, M. 1982. Denitrifying bacteria. pp. 1484-1486. *In*: Black, C.A. (ed.). *Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9. Part 2. 2a ed.* Soil Science Society of America. Madison, MI.
- Aloma, J. 1970. La cachaza como fertilizante de la caña de azúcar. pp. 392-421. *In*: Vol. 1. *Memorias, conferencias de la Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba.* Orbe, La Habana.
- Armida A., L., D.J. Palma López., J.J. Obrador O., J.F.F. Molina E.M. y U. López N.U. 1998. Uso de la cachaza en caña de azúcar. pp. 25-31. *In*: Juárez López, J.F., J.J. Obrador O. y D.J. Palma-López (eds.). *Resultados de Investigación en caña de azúcar.* Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México.
- Arzola, P., O. Fundora H. y J. Machado de A. 1981. Suelo, planta y abonado. Edit. Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.
- Arzola N., P. y J. Alfonso C. 1982. Evaluación de la aplicación de agua de cachaza en condiciones de producción. *Centro Agrícola* 9(2): 89-108.
- Aso, P.J. y V. Bustos N. 1991. Uso de residuos orgánicos, estiércol y cachaza, como abonos. *Avance Agroindustrial* 44. Estación Experimental Agroindustrial. Tucumán, Argentina.
- Buckman, H.O. y N.C. Brady. 1991. *Naturaleza y propiedades de los suelos.* Uthea. Grupo Noriega Editores. México, D.F.
- Cairo, C.P., N. Lamas R., S. Goya C., S. Cespero G. y J.A. Aguilar J. 1994. Influencia de la cachaza sobre las propiedades estructurales de un suelo oscuro plástico. *Centro Azúcar* 21(1): 40-48.
- Cepero G., S., A. Davila I. y P. Cairo C. 1989. Posibilidades de utilización de la cachaza como fertilizante en bancos de semilla en suelos oscuros plásticos de la costa norte de Villa Clara. *Centro Azúcar* 16(4): 78-86.
- Chapman, H.D. 1965. Total exchangeable bases. pp. 902-904. *In*: Black, C.A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9.* American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Golcher A., A., F. Hasbach R. y J.J. Infante M. 1984. *Manual para analistas de laboratorio azucarero.* AZÚCAR, S.A. de C.V.-GEPLACEA-PNUD. México, D.F.
- Guijarro, R., R. García y B. Díaz. 1981. Influencia de la cachaza sobre las propiedades químicas del suelo y el rendimiento del plátano fruta (Poyo). *Agrotecnia de Cuba* 13: 93-99.
- Jones, B.J., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. *Plant Analysis Handbook: A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide.* Micro-Macro Publishing. Athens, GA.
- Kumada, K. 1987. *Chemistry of soil organic matter.* Japan Scientific Societies. Press Tokio. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Leal G., J.F. 1987. Aprovechamiento de la cachaza en el campo cañero de la Región Huastecas. *Azúcar. Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar.* México, D.F.
- Machado A., J. y C. Nieves V. 1993. Influencia de la aplicación de cachaza sobre algunas características del suelo y los rendimientos en la caña de azúcar. *Centro Azúcar* 20(1): 64-72.
- Medina, N. 1980. Estudio comparativo de los efectos del encalado y la aplicación de cachaza sobre el mejoramiento de suelos ferralíticos amarillentos y los rendimientos de caña de azúcar. *Ciencia Técnica en la Agricultura. Caña de Azúcar* 2(1): 29-50.
- Paneque, V.M. y M.A. Martínez. 1992. La cachaza como sustituto de los fertilizantes químicos para la caña de azúcar cultivada en suelo ferralítico amarillento. *Cultivos Trop.* (2-3): 69-73.
- Prasad, M. 1977. Efecto de la aplicación de cachaza sobre la disponibilidad de macro y micronutrientes de dos suelos. *Información Express. Caña de Azúcar* 1(1-1): 30-31.
- Prieto L., C. y J. Nieto B. 1964. El sistema de fertilización organo-química para aumentar económicamente la producción de caña de azúcar. *Fertilizantes Orgánicos de México, S.A.* México, D.F.
- Rivera, R. 1985. Efecto de dosis de cachaza, estiércol y sulfato de amonio sobre el establecimiento de una plantación de caféto Variedad Caturra, a plena exposición solar. *Cultivos Trop.* 7(3): 2335.
- SAS Institute Inc. 1995. *Statistical Analysis System. Version 6.12.* Cary, NC.
- Salgado G., S. 1999. La fertilización NPK en rendimiento y calidad de la caña de azúcar. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Salgado G., S., R. Núñez E., J.J. Peña-Cabriales, J.D. Etchevers B., D.J. Palma L. y M.R. Soto H. 2000. Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* 34: 689-698.
- Salgado G., S., L. Bucio A., D. Riestra D. y L.C. Lagunes-E. 2001a. Caña de azúcar: Hacia un manejo sustentable. Campus Tabasco, - Colegio de Postgraduados-ISPOTAB. H. Cárdenas, Tabasco, México.
- Salgado G., S., R. Núñez E., J.J. Peña-Cabriales, J.D. Etchevers B., D.J. Palma L. y R.M. Soto. 2001b. Eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante en soca de caña de azúcar sometida a diferentes manejos de fertilización. *Terra* 19: 155-162.

# VARIABILIDAD DEL CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE LADERA DEL SURESTE DE MÉXICO

## Variability of Organic Carbon in Hillside Soils of the Southeast of Mexico

Miguel Ángel Vergara-Sánchez<sup>1†</sup>, Jorge D. Etchevers-Barra<sup>1</sup> y Mateo Vargas-Hernández<sup>2</sup>

### RESUMEN

Uno de los servicios ambientales que proporciona el suelo es el secuestro de carbono. La capacidad para llevarlo a cabo varía de acuerdo con el tipo de suelo y sus características, historial de manejo y factores ambientales. El efecto del manejo en la distribución de carbono en los suelos de ladera es poco conocido. El propósito de este estudio fue cuantificar el C orgánico en suelos de laderas (0 a 20 y 20 a 40 cm) en tres regiones de la Sierra Norte de Oaxaca, México (Mazateca, Cuicateca y Mixe, representadas por microcuencas experimentales), así como su variabilidad y las diferencias entre sistemas de uso del suelo (bosques secundarios, cultivos agrícolas permanentes, anuales y mixtos). El porcentaje medio de C orgánico del suelo de las microcuencas, el carbono de las profundidades y el carbono de los sistemas estudiados dentro de cada microcuenca presentaron diferencias que fueron significativas, mismas que se atribuyeron al uso del suelo actual, al historial y a las condiciones climáticas de cada región. Estos resultados sugieren que las estimaciones del potencial de secuestro de C del suelo, en estas regiones y sistemas de uso de la tierra, deberían tomar en consideración los factores anteriores para que el cálculo resulte lo más cercano a la realidad de cada una de ellas.

**Palabras clave:** Secuestro de C, reservorios de C, materia orgánica del suelo, variabilidad espacial.

### SUMMARY

Carbon sequestration is one of the environmental services provided by the soil. The capacity to carry

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

<sup>†</sup> Autor responsable (sesamo000@hotmail.com.mx)

<sup>2</sup> Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

Recibido: Septiembre de 2002. Aceptado: Marzo de 2004.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 359-367.

out this function varies in accordance with soil type and its characteristics, previous management and environmental factors. The effect of management on soil carbon distribution has not been studied under hillside conditions. The objective of this survey was to quantify the variability of soil organic carbon (0 to 20 and 20 to 40 cm) in the slopes of three regions (Mazateca, Cuicateca, and Mixe, represented by experimental microbasins) and landuse systems (secondary forest, permanent, annual, and multiple cropping) in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico. The soil organic carbon (average of all observations) in the microbasins, the 0 to 20 and 20 to 40 cm depths and landuse systems revealed significant differences related to present soil use, previous management, and climatic conditions of each region. These results suggest that future estimations of potential soil carbon sequestration in these regions and landuses should consider these factors to calculate figures closer to actual values.

**Index words:** Carbon sequestration, carbon stocks, soil organic matter, spatial variability.

### INTRODUCCIÓN

El contenido y la variabilidad espacial del carbono del suelo se ha poco estudiado en terrenos agrícolas y con alta pendiente. El diseño de estrategias para la captura de este elemento requiere de una mejor comprensión de dicho fenómeno.

El suelo tiene capacidad para acumular C y retenerlo por largos periodos de tiempo, fenómeno conocido como secuestro de C (Swift, 2001). La cantidad de C que un suelo puede secuestrar y su distribución son funciones de las características, del uso y manejo del suelo (Lal *et al.*, 1998; Schwager y Mikhailova, 2002). Prácticas que aumentan la producción de biomasa vegetal o que reducen la erosión y la oxidación microbiana de la materia orgánica, son efectivas para incrementar la captura del C atmosférico y mitigar los efectos ambientales negativos que causa el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico. Además, incrementan y preservan la calidad del suelo

y mejoran la productividad agrícola (Carter *et al.*, 1997).

En el suelo ocurre una parte importante del ciclo global del C (Bruce *et al.*, 1999; Follet, 2001). Se estima que el total del C acumulado en los suelos de todo el mundo es mayor que la suma de éste en la atmósfera y en la vegetación (Swift, 2001). El C que el suelo secuestra es considerado como un servicio ambiental de alto beneficio para la humanidad (Arnold *et al.*, 1990). Para aprovechar eficientemente este fenómeno, es preciso comprender mejor las diferencias que existen entre suelos y su variabilidad. La variabilidad en la distribución del C en el suelo se puede analizar mediante herramientas, como la geoestadística, que permite estudiarla independientemente del tamaño de la unidad de observación. Trangmar *et al.* (1985), Stein *et al.* (1997), Schomberg *et al.* (2000) y Yanai *et al.* (2001) han empleado el análisis geoestadístico como una herramienta para examinar y describir la variabilidad espacial de las propiedades del suelo.

En el estado de Oaxaca, México, el uso del suelo de la Sierra Norte era originalmente forestal, pero con el transcurso del tiempo ha cambiado a agrícola. Las áreas explotadas se ubican en laderas con elevada pendiente (de 20 a 60%), donde se practica una agricultura de tipo tradicional, con escaso uso de recursos y limitada productividad. De acuerdo con Acosta (2003), la modificación de las tecnologías tradicionales, como es la implantación de sistemas agroforestales con árboles frutales intercalados con cultivos anuales (1400 árboles ha<sup>-1</sup>, donde cada árbol tiene la capacidad de secuestrar 1 kg año<sup>-1</sup> de C) y la labranza de conservación que deja los residuos de cosecha en el terreno, crean una condición potencial para secuestrar carbono. Sin embargo, el efecto de estas tecnologías en la variabilidad espacial del C del suelo no es claro. Un mejor entendimiento de esta última ayudaría a predecir con mayor exactitud la verdadera capacidad de captura de este elemento por los suelos y los sistemas de uso de la tierra.

El objetivo de este estudio fue determinar los porcentajes del C del suelo en sistemas de uso con vegetación nativa secundaria y con cultivos agrícolas permanentes, anuales y mixtos, comunes en terrenos de ladera de tres regiones del estado de Oaxaca, México, así como su variabilidad espacial, para contribuir a tener mayores elementos para la estimación del potencial de secuestro del C en tales áreas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se condujo en tres regiones de la Sierra Norte del estado de Oaxaca, México (Mazateca, Cuicateca y Mixe) en las que el Proyecto Manejo Sostenible de Laderas (PMSL) (Acosta, 2003) tiene microcuencas experimentales. Las características generales de las regiones y de las microcuencas se reportan en el Cuadro 1.

En cada una de las microcuencas, se seleccionaron sitios con diferentes usos del suelo (forestales, cultivos agrícolas permanentes, agrícolas mixtos y agrícolas anuales) representativos de esa región. El PMSL introdujo nuevas tecnologías de producción en esas regiones, como son labranza de conservación y sistemas agroforestales (muro vivo), destinadas a mejorar la captura del C y reducir o eliminar la roza-tumba-quema como sistema de producción, mismas que se incorporaron en este estudio.

Para estimar la variabilidad del C orgánico en los bosques, café, pradera y labranza de conservación, los autores generaron el siguiente esquema de muestreo: se trazaron dos líneas paralelas de 22 m de largo, con una separación de 4 m entre ellas y dos perpendiculares (a 1/3 y 2/3 de la distancia del extremo). Sobre las líneas paralelas se tomaron muestras de suelo a una distancia de 2 m y una muestra en la parte central de cada línea perpendicular, obteniéndose un total de 26 muestras simples en cada sistema.

En los sistemas labranza tradicional, roza-tumba-quema, acahual y muros vivos sólo se tomaron tres muestras compuestas; cada una formada por cinco a siete submuestras repartidas en cada tercio de la parcela. El muestreo en estos sistemas fue menos intensivo, pues sólo interesaba tener una idea general de cuál era el porcentaje de C orgánico en el suelo.

Las muestras se secaron al aire y se tamizaron antes de determinar su contenido de C orgánico mediante combustión seca; se empleó un analizador automático de C, Shimadzu TOC 5000-A.

Se calcularon la media, varianza, desviación estándar, el valor mínimo y valor máximo del C orgánico de las microcuencas, de las profundidades y de los sistemas de uso por microcuenca, con ayuda del SAS (SAS Institute, 1985). Las pruebas de comparación de medias, entre los sistemas y profundidades de muestreo, con base en un diseño completamente al azar, se hicieron mediante el estadístico de Tukey.



**Cuadro 1. Características generales de las regiones y microcuencas de estudio (Acosta, 2003).**

Características	Mazateca	Cuicateca	Mixe
		<b>Características de la región</b>	
Coordenadas geográficas	18° 08' 57'' a 18° 10' 13'' N 96° 53' 30'' a 96° 54' 43'' O	17° 50' 20'' a 17° 51' 25'' N 96° 53' 30'' a 96° 54' 43'' O	18° 08' 57'' a 18° 10' 13'' N 96° 53' 30'' a 96° 54' 43'' O
Área	2301.33 km <sup>2</sup>	1329.67 km <sup>2</sup>	6 470 km <sup>2</sup>
Suelo <sup>†</sup>	Luvisol, Rendzina, Feozem y Acrisol	Luvisol, Rendzina, Feozem y Acrisol	Acrisol y Cambisol
Uso del suelo	Agricultura, bosque pino-encino, selva alta, pastizal	Agricultura, bosque pino-encino, pastizal	Agricultura, selva baja, pastizal cultivado y bosque
Altitud	200 a 3250 msnm	200 a 3000 msnm	200 a 3200 msnm
Pendientes	> 15% (25-45%)	>15%	>25%
Precipitación	> 2000 mm	500 a 700 mm	1500 a 2000 mm
Temperatura	16 a 27 °C	18 - 20 °C	17 a 27 °C
		<b>Características de las microcuencas</b>	
Nombre	Santa Catarina	Concepción Pápalo	Zompantle
Superficie	319 ha	149 ha	32 ha
Altitud	1380 a 1910 m	1700 a 2200 m	1280 a 1525 m
Pendiente	> 30% (60%)	> 30% (65%)	> 30% (65%)
Tipo de suelo <sup>†</sup>	Acrisol	Luvisol	Acrisol
Uso suelo			
Milpa	41.04 ha	65.31 ha	3.00 ha
Pastizal	16.49 ha	27.66 ha	-
Bosque	20.29 ha	49.00 ha	0.52 ha
Café	169.14 ha	-	8.39 ha
Acahual	72.29 ha	-	20.77 ha
Matorral	-	5.20 ha	-

<sup>†</sup> INEGI (1997).

La variabilidad espacial del porcentaje de C orgánico en los sistemas donde se muestreó intensivamente, se analizó mediante semivariogramas calculados con el programa GS<sup>+</sup> (Robertson, 1998). Se seleccionaron aquellos modelos con la mas alta  $r^2$  y la menor suma de cuadrados residual (RSS). Con el uso del programa Surfer 7 para Windows (Golden Software, 1999), se obtuvo un mapa de contornos para algunos de los sistemas estudiados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Estadísticas Descriptivas del Porcentaje de Carbono

En el Cuadro 2, se muestran los porcentajes de C orgánico por microcuenca, promedio de todas las muestras y promedio por profundidad (de 0 a 20 y de 20 a 40 cm). Los resultados se reportan en porcentaje porque el objetivo del presente trabajo fue estudiar la concentración de C en el suelo y su variabilidad espacial y no los almacenes del mismo. No existen estudios previos de C en el suelo en estas regiones,

por lo cual no es posible hacer una comparación en tiempo.

Los porcentajes promedio de C del suelo de las microcuencas experimentales representativas de las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe fueron diferentes. La Mixe y la Mazateca tuvieron porcentajes promedio de C en el suelo (0 a 40 cm) similares (4.16 y 3.88%, respectivamente), pero mayores que los de la Cuicateca (1.93%). El porcentaje de C en esta última microcuenca fue significativamente más bajo que en las dos anteriores. Las diferencias se explican por las características particulares de manejo, clima, suelo y uso de cada una de ellas. Por ejemplo, para la preparación de los suelos en la Cuicateca se usa la tracción animal, a pesar de las altas pendientes (mayores que 25%) existentes en esa región, lo cual explicaría la pérdida de la mayor parte del horizonte superficial en los sitios con vegetación diferente a bosque. En contraste, en las regiones Mixe y Mazateca, donde las pendientes alcanzan hasta 50% y el suelo es labrado manualmente, prácticamente no hay erosión. Observaciones de los autores y mediciones de

**Cuadro 2. Porcentaje promedio de carbono por microcuencas (Mazateca, Cuicateca y Mixe) y por profundidad (0 a 20 y 20 a 40 cm) en la Sierra Norte de Oaxaca, México y estadísticos asociados.**

Microcuenca	Profundidad cm	N <sup>†</sup>	Media <sup>‡</sup>	Desv. Std.	Mínimo	Máximo
----- % -----						
Promedio general por microcuenca						
Mazateca	0 a 40	372	3.88 a	1.53	0.40	11.60
Cuicateca	0 a 40	166	1.93 b	0.66	0.30	3.40
Mixe	0 a 40	214	4.16 a	2.18	0.70	11.60
DMS			0.30			
Promedio por microcuenca y profundidad						
Mazateca	0 a 20	186	4.67 b	1.54	0.70	11.60
Cuicateca	0 a 20	96	2.32 c	0.49	0.70	3.40
Mixe	0 a 20	107	5.63 a	1.80	2.40	11.60
DMS			0.44			
Mazateca	20 a 40	186	3.09 a	1.04	0.40	6.50
Cuicateca	20 a 40	70	1.43 c	0.49	0.30	2.60
Mixe	20 a 40	107	2.69 b	1.40	0.70	7.30
DMS			0.36			

<sup>†</sup> Número de muestras. <sup>‡</sup> Letras diferentes indican diferencias significativas (P = 0.01).

pérdidas de suelo por erosión en esas microcuencas (M. Martínez, 2002, Comunicación personal), indican que, en estas últimas, dichas pérdidas son escasas, aún en los suelos cultivados en pendientes mayores que 30%. En cuanto a clima, las regiones Mazateca y Mixe tienen precipitaciones pluviales más altas que la Cuicateca (2000 a 2500, 1500 a 2000 *versus* 500 a 700 mm año<sup>-1</sup>, respectivamente), por lo cual hay mayor producción de biomasa (Etchevers *et al.*, 2003) y, en consecuencia, mayor aporte de material vegetal al suelo, lo cual se refleja en el porcentaje de C encontrado en cada microcuenca. En cuanto a la profundidad del suelo, los autores anteriores reportaron que ésta es mayor que 60 cm en las microcuencas Mazateca y Mixe, mientras que en la Cuicateca es menor que ese valor. En cada microcuenca hay sistemas diferentes de uso de la tierra, con mayor presencia de bosques en la Mazateca y Mixe que en la Cuicateca. Los resultados del presente trabajo son consistentes con lo indicado por Lal *et al.* (1998) y Swift (2001), para quienes la capacidad de almacenamiento de C de un suelo depende de la vegetación que soporta, composición mineralógica, profundidad, drenaje, disponibilidad de agua y aire, además, del uso y manejo que se hace del mismo.

El porcentaje promedio de C de las profundidades 0 a 20 y 20 a 40 cm difirió entre las microcuencas, pero en todos los casos tuvo una tendencia decreciente similar. En general, fue entre 30 y 50% mayor en la capa superficial que en la subyacente. El porcentaje de este elemento en la última capa mencionada se

considera elevado, aún en el caso de la Cuicateca. La concentración de C que se determinó en los suelos de la Sierra Norte de Oaxaca fue, en general, alto, lo cual es un indicador de que poseen la capacidad para acumular este elemento. Se juzgó necesario analizar más profundamente el efecto que tenía el uso del suelo en dicho fenómeno.

En el Cuadro 3, se presenta el porcentaje de C por sistema de uso y por profundidad (0 a 20 y 20 a 40 cm) en las tres microcuencas y algunos estadísticos asociados. Los sistemas de uso de la tierra que se seleccionaron son representativos del área o son tecnologías alternativas propuestas para incrementar el secuestro de C y mejorar la productividad de la tierra y los ingresos del productor. La tecnología de muros vivos, una de las tecnologías ensayadas, se ha probado con anterioridad en otras zonas de México por miembros del grupo del PMSL (Turrent *et al.*, 1995)

El porcentaje de C en el suelo, dentro de cada microcuenca, fue función del sistema de uso de la tierra. En general, los sistemas agrícolas anuales presentaron porcentajes de C similares o incluso mayores que los de vegetación arbórea o con cultivos permanentes, tal es el caso de RTQ LC, RTQ LT, LT<30 y LC<30 en la Mazateca, LC y LT en la Mixe y LC(Y) en la Cuicateca.

El bajo porcentaje de C en los bosques de liquidámbur y de aile en la Mazateca se debe, según Acosta (2003), a que en el pasado éstos tuvieron un uso agrícola intenso y se habrían abandonado debido a la degradación. Con el tiempo, esas áreas se

convirtieron en bosques secundarios con lento crecimiento. En contraste, la producción de biomasa aérea de la milpa (que emplea variedades criollas de gran porte) alcanza, en algunos casos, aproximadamente  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (J.I. Cortés Flores, 2003. Comunicación personal). Se estima que la

biomasa de las raíces de los cereales es equivalente a 15% de la biomasa aérea (Rodríguez, 1993) que, sumada a los residuos de cosecha, constituye un importante aporte anual de carbono. Datos preliminares de la Mazateca muestran que el contenido de C en la zona de raíces de los sistemas

**Cuadro 3. Porcentaje de carbono por sistema de uso de la tierra y por profundidad (0 a 20 y 20 a 40 cm), en las microcuencas Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, México y estadísticos asociados.**

Uso de la tierra <sup>†</sup>	0 a 20 cm				20 a 40 cm			
	Media <sup>‡</sup>	S <sup>§</sup>	Mín.	Máx.	Media <sup>‡</sup>	S <sup>§</sup>	Mín.	Máx.
----- % -----								
<b>Mazateca</b>								
Sist. Naturales								
B. Aile	5.43 abc	1.07	3.3	8.1	3.15 ab	0.41	2.5	4.0
B. Liquidámbar	5.36 abc	0.56	4.2	6.3	3.29 ab	0.59	2.0	4.6
Sist. Agr. Permanente								
Café	4.99 abcd	2.54	0.7	11.6	3.36 ab	1.71	0.4	6.5
Pradera	3.85 bcd	0.36	2.7	4.5	2.43 b	0.56	1.1	3.2
Sist. Agr. Mixtos								
MVDUR	2.83 d	0.30	2.4	3.2	2.11 b	0.59	1.5	3.0
MVCAFE	5.02 abc	0.58	4.1	5.5	3.31 ab	0.57	2.5	4.1
Sist. Agr. Anual								
L C >30	3.14 cd	0.20	2.8	3.6	2.39 b	0.24	2.1	3.1
L T >30	2.93 d	0.25	2.7	3.2	4.50 a	0.95	3.9	5.6
L C <30	5.47 ab	0.97	2.2	6.9	3.65 ab	1.11	0.9	5.5
L T <30	5.40 abc	1.30	3.9	6.2	3.67 ab	0.45	3.2	4.1
R-T-Q								
RTQ LC	6.62 a	0.85	5.8	7.5	3.70 ab	0.34	3.3	3.9
RTQ LT	5.43 abc	2.88	2.1	7.2	4.63 a	1.04	3.8	5.8
DMS	2.29				1.69			
<b>Cuicateca</b>								
Sist. Agr. Permanente								
Pradera	1.99 ab	0.39	0.7	2.5	0.94 b	0.35	0.30	1.5
Sist. Agr. Mixtos								
MVDUR (Y)	2.10 ab	0.25	1.7	2.4	1.62 a	0.20	1.4	2.0
MVDUR (C)	2.28 ab	0.31	1.8	2.7	1.80 a	0.19	1.5	2.0
Sist. Agr. Anual								
LC (Y)	2.70 a	0.57	0.7	3.4	1.69 a	0.38	0.8	2.6
LT (Y)	1.77 b	0.23	1.5	1.9	1.86 a	0.25	1.6	2.1
LC (C)	2.42 ab	0.31	1.7	2.9	---	---	---	---
LT (C)	2.17 ab	0.21	2.0	2.4	1.70 a	0.20	1.5	1.9
DMS	0.70				0.59			
<b>Mixe</b>								
Sist. Naturales								
Bosque	4.73 c	0.94	2.8	7.1	2.12 b	0.88	0.7	4.5
Acahual (2)	4.38 c	1.15	2.4	6.9	1.99 b	0.88	0.8	3.8
Sist. Agr. Permanente								
Café	4.60 c	0.70	2.9	5.7	1.80 b	0.54	1.0	3.4
Sist. Agr. Mixtos								
MVCAFE	6.63 b	0.62	5.5	7.8	4.19 a	1.46	2.0	6.7
Sist. Agr. Anual								
L C	7.85 a	1.59	4.9	11.6	3.76 a	1.24	1.9	7.3
L T	9.40 a	0.95	8.5	10.4	3.97 a	1.95	2.1	6.0
DMS	1.55				1.33			

<sup>†</sup> MVDUR y MVCAFE = muro vivo de durazno y café intercalado con maíz; LT y LC = labranza tradicional y de conservación; < y > 30 = pendiente del terreno en porcentaje; R-T-Q = roza-tumba-quema; Acahual(2) = acahual de dos años de edad; Y y C = sitio Yacuay y Las Coloradas; DMS = diferencia mínima significativa. <sup>‡</sup> Letras diferentes dentro de cada microcuenca indican diferencias significativas. <sup>§</sup> Desviación estándar

anuales de cultivo (2.3 a 4.3 Mg ha<sup>-1</sup>) en la profundidad de 0 a 105 cm, son similares a los medidos en los Bosque de aile y liquidambar (2.31 a 4.14 Mg ha<sup>-1</sup>) (Acosta, 2003).

El porcentaje de C en la profundidad de 0 a 20 cm de RTQ LT (5.43%) y LT<30 (5.40%) en la microcuenca Mazateca, fue similar al medido en el Bosque de aile (5.43%) y Bosque de liquidambar (5.36%), pero más elevado que en el de los sistemas permanentes: Café (4.99%) y Pradera (3.85%). El mayor porcentaje correspondió al sistema RTQ LC (6.62%). Parte del C de este sistema es C condensado o carbón vegetal, residuo de las quemadas.

En la microcuenca Mixe, el porcentaje de C en el suelo (0 a 20 cm) en los sistemas agrícolas LT y LC fue aproximadamente el doble (9.40%) que en el Bosque, el Acahual y el Café (4.73, 4.38 y 4.60%, respectivamente). En esta microcuenca y en la Mazateca, los agricultores preparan el terreno manualmente, lo cual reduce la probabilidad de oxidación de la materia orgánica, permitiendo su acumulación. Contrariamente a lo que habitualmente se piensa, el manejo tradicional que dan los agricultores de las regiones Mazateca y Mixe al suelo y a los cultivos, permite conservar las reservas de C en valores similares a los encontrados en los sistemas de bosque incluidos en este estudio.

En la microcuenca Cuicateca, la LC(Y), LT(C) y LC(C) y la Pradera presentaron entre 2.70 y 1.99% de C en el suelo (0 a 20 cm), valores estadísticamente iguales, lo cual determinó que la media del porcentaje de C en la Cuicateca fuera inferior a la media de las otras dos microcuencas.

Los sistemas de producción con muro vivo en la Mazateca y la Mixe tuvieron, en general, menor porcentaje de C orgánico [2.83% el muro vivo de durazno (MVDUR) en la Mazateca y 6.63% el muro vivo de café (MVCAFE) en la Mixe], que los sistemas anuales. Esto se atribuyó a que durante la preparación del terreno para la plantación de los frutales que forman el muro vivo, se modificó la pendiente del mismo, desplazando suelo de la parte alta hacia la parte baja para formar la terraza; sin embargo, MVCAFE en la Mazateca y MVCAFE en la Mixe mostraron porcentajes de C orgánico similares o mayores que en los sistemas con vegetación arbórea. Los sistemas de LC y MV, que se introdujeron en la región en 1999, no muestran aún efecto claro sobre el contenido de C orgánico (Vergara, 2003).

### Variabilidad Espacial del Porcentaje de Carbono

En el Cuadro 4, se presentan algunos parámetros geoestadísticos correspondientes al porcentaje de C orgánico en el suelo (profundidades de 0 a 20 y de 20 a 40 cm) en sistemas de uso de la tierra seleccionados. Estos sistemas corresponden a aquellos donde se hizo un muestreo intensivo con este propósito. Se consideró que no hubo ajuste del modelo cuando el valor de  $r^2$  era menor que 0.50. En este cuadro, sólo se muestran los sistemas con  $r^2$  mayor que 0.50.

En los sistemas naturales y permanentes fue posible ajustar un mayor número de modelos que en los sistemas anuales (Cuadro 4), lo cual significa que la distribución del C es más uniforme en sistemas donde no ocurre movimiento del suelo durante largos periodos.

El rango parámetro que indica el límite de la dependencia espacial, fue pequeño en la mayoría de los casos, pero los valores de semivarianza fueron muy amplios. Esto indica que existe una considerable variabilidad en los porcentajes de C en el suelo. La heterogeneidad observada en la distribución del porcentaje de C en el suelo era esperada, ya que éste no es un cuerpo natural homogéneo y sus propiedades no se distribuyen uniformemente. Conocer la magnitud de esa heterogeneidad permite reducir errores en las extrapolaciones.

En la microcuenca Mazateca no fue posible ajustar un modelo con  $r^2$  mayor que 0.5 en los sistemas LC > 30 y Pradera. Haynes y Williams (1993) señalaron que, en las praderas, la elevada heterogeneidad se debe a la distribución aleatoria de las excretas que deja el ganado; éste, además, modifica sustancialmente la remoción y distribución de los nutrimentos en los sitios donde pasta. En esta microcuenca, los valores de la semivarianza, considerando ambas profundidades, fueron de 0.24 en Bosque de aile hasta de 7.86 en Café. En la microcuenca Cuicateca para LC(C) sólo se contó con resultados de la profundidad de 0 a 20 cm a los que fue posible ajustarles un modelo, al igual que en LC(Y), profundidad de 20 a 40 cm. La semivarianza fue de 0.14 en LC(C) a 0.31 en Pradera cuando se consideraron ambas profundidades. Para LC de la microcuenca Mixe sólo fue posible ajustar un modelo en la profundidad de 20 a 40 cm. La semivarianza, considerando ambas profundidades, fue de 0.37 en Café a 1.79 en LC.

**Cuadro 4. Resumen del análisis geostatístico para algunos sistemas de uso de la tierra en las microcuencas Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, México.**

Uso de la tierra <sup>†</sup>	Profundidad cm	Modelo	C <sub>0</sub> <sup>‡</sup>	C <sub>0</sub> +C <sup>§</sup>	Rango	RSS <sup>¶</sup>	r <sup>²</sup>
<b>Mazateca</b>							
Sist. Naturales							
B. Aile	20 a 40	Linear/sill	0.12	0.24	20.26	0.003	0.82
B. Liquidámbar	0 a 20	Esférico	0.12	0.33	5.79	0.006	0.56
	20 a 40	Linear/sill	0.03	0.42	6.55	0.013	0.80
Sist. Agr. Perm.							
Café	0 a 20	Linear/sill	3.24	7.86	10.37	0.450	0.95
	20 a 40	Gausiano	0.90	2.91	13.51	0.227	0.87
Sist. Agr. Anual.							
LC <30	0 a 20	Linear/sill	0.21	1.00	8.42	0.100	0.74
	20 a 40	Exponen.	0	1.87	8.32	0.017	0.97
<b>Cuicateca</b>							
Sist. Agr. Perm.							
Pradera	0 a 20	Gausiano	0.118	0.25	24.58	0.0005	0.93
	20 a 40	Gausiano	0.036	0.31	22.87	0.0012	0.97
Sist. Agr. Anual.							
LC (Y)	20 a 40	Exponen.	0.012	0.18	3.02	0.0001	0.96
LC (C)	0 a 20	Exponen.	0.025	0.14	7.54	0.0005	0.98
<b>Mixe</b>							
Sist. Naturales							
Bosque	0 a 20	Linear/sill	0.60	0.84	6.55	0.016	0.54
	20 a 40	Linear/sill	0.44	0.96	12.31	0.060	0.65
Acahual (2)	0 a 20	Linear/sill	0.13	1.40	4.56	0.220	0.94
	20 a 40	Linear/sill	0.48	1.06	10.38	0.560	0.69
Sist. Agr. Perm.							
Café	0 a 20	Esférico	0.21	0.60	8.17	0.002	0.94
	20 a 40	Linear/sill	0.12	0.37	10.36	0.006	0.86
Sist. Agr. Anual.							
LC	20 a 40	Esférico	0.90	1.79	14.28	0.067	0.78

<sup>†</sup> LT y LC = labranza tradicional y de conservación; < y > 30 = pendiente del terreno; Acahual(2) = Acahual (2)-Acahual de dos años de edad; Y y C = sitio Yacuay y Las Coloradas. <sup>‡</sup> Nugget (variabilidad espacial no explicada debido al esquema de muestreo usado, es la ordenada al origen). <sup>§</sup> Sill (valor máximo de la semivarianza). <sup>¶</sup> Suma de cuadrados de residuales.

La mayor amplitud de los valores de la semivarianza en las microcuencas Mazateca y Mixe, con respecto a la Cuicateca, indican una mayor variabilidad de C del suelo en esas cuencas. La imposibilidad de ajustar un modelo a los datos de los sistemas de LC se debe a que los residuos de las cosechas no se distribuyeron uniformemente, por lo que no se encontró una dependencia espacial entre muestras colindantes.

Para ilustrar la variabilidad de C en las áreas de estudio, se seleccionaron tres sistemas de uso de la tierra. Los sistemas se diferencian por la vegetación que sostienen, el régimen climático y el manejo, por lo que la media, la desviación estándar y los valores mínimo y máximo de C orgánico del suelo que exhiben es contrastante (Cuadro 5).

Los mapas de contorno, generados por el programa Surfer 7 para Windows (Golden Software, 1999) para dos sistemas contrastantes, se muestran en la Figura 1.

Las líneas de contorno indican puntos con igual porcentaje de C orgánico. En condiciones de pendientes pronunciadas, la distribución del C resultó ser muy heterogénea. Así, por ejemplo, el porcentaje de este elemento en el sistema Café de la microcuenca Mazateca, va de un mínimo de 0.7% a un máximo de 11.6%, mientras que en el sistema LC(C) de la Cuicateca el intervalo es de 1.7 a 2.9% de C orgánico. La alta variabilidad de estos resultados permiten indicar que las mediciones de C que se realicen para establecer líneas bases o estudios referentes a proyecciones de captura de C, en terrenos de ladera,

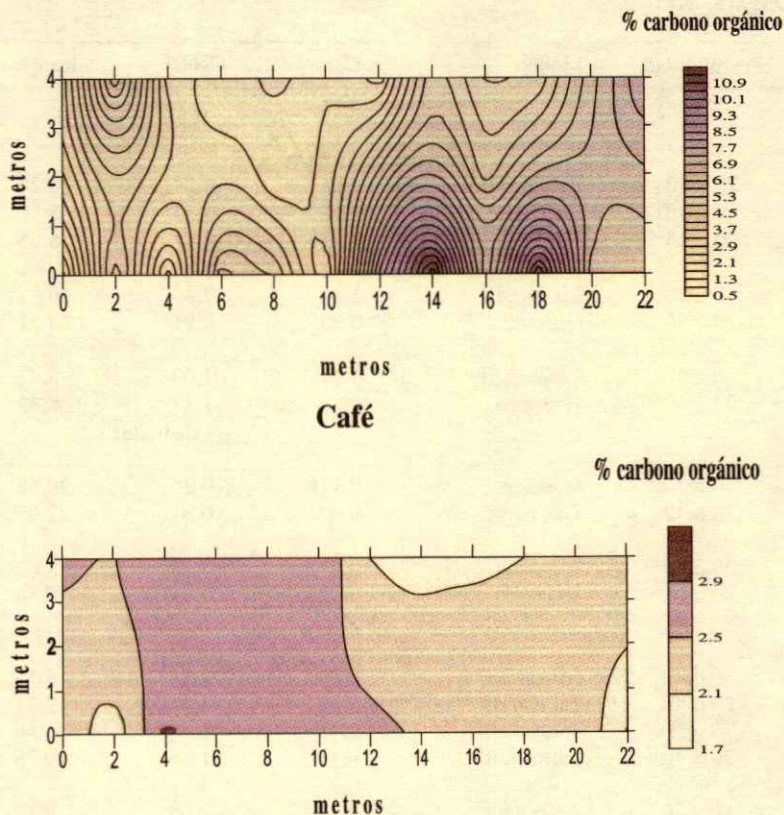


Figura 1. Mapas de contornos para Café (Mazateca) y Labranza de Conservación en Las Coloradas (Cuicateca), profundidad de 0 a 20 cm, en la Sierra Norte de Oaxaca, México.

deben tomar en cuenta la heterogeneidad de la concentración de C en el suelo.

**CONCLUSIONES**

- Los porcentajes de C del suelo en las microcuencas experimentales fueron muy variables. Las medias de éstos en la profundidad de 0 a 20 cm de la Mazateca se ubicó en el intervalo de 0.7 a 11.6%, en la Cuicateca de 0.7 a 3.4% y en la Mixe de 2.4 a 11.6%.

**Cuadro 5. Sistemas seleccionados para ilustrar la variabilidad del porcentaje de carbono orgánico en las áreas de estudio (datos de la profundidad de 0 a 20 cm).**

Microcuenca	Sistema <sup>†</sup>	Media	S <sup>‡</sup>	Mín.	Máx.
Mazateca	Café	4.99	2.54	0.7	11.6
Cuicateca	Pradera	1.99	0.39	0.7	2.5
Cuicateca	LC (C)	2.42	0.31	1.7	2.9

<sup>†</sup>LC(C)-Maíz en labranza de conservación. Sitio Las Coloradas.  
<sup>‡</sup> Desviación estándar.

En la profundidad de 20 a 40 cm, los porcentajes de C del suelo fueron 30 a 40% menores. Las diferencias en porcentajes de C fueron explicadas por las diversas condiciones ecológicas y de manejo presentes en los sitios estudiados.

- Los porcentajes de C del suelo en las microcuencas, sistemas de uso de la tierra dentro de cada microcuenca y profundidades fueron significativamente diferentes. El conocer dichas diferencias permitirá realizar estimaciones del C más cercanas a la realidad, así como una mejor planeación de los trabajos futuros de medición de este elemento en las áreas de estudio.

- La variabilidad espacial del porcentaje de C en los suelos de ladera de la Sierra Norte de Oaxaca fue considerable. Las semivarianzas tuvieron un rango de 0.14 a 7.86 en la profundidad de 0 a 20 cm y de 0.18 a 2.91 en la profundidad de 20 a 40 cm. La variabilidad, aun en los sistemas ubicados dentro de la misma cuenca es amplia, como resultado de la alta heterogeneidad en la distribución del carbono. En los

sistemas no-agrícolas se obtuvieron, en general, más y mejores ajustes de los modelos geoestadísticos que de los agrícolas. Estudios subsecuentes deben elucidar cómo las prácticas de manejo, propias de cada sistema, afectan la variabilidad del C, permitiendo valorar, de manera indirecta, el efecto de éstas sobre la dinámica y potencial del secuestro de C y proporcionar información para el manejo sitio-específico y la toma de muestras

- Futuras extrapolaciones, a escala de cuenca, que tomen como base los resultados aquí obtenidos deben considerar la heterogeneidad en el contenido de C de los sistemas de uso de la tierra y profundidades estudiadas.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al GEF-BM por el apoyo económico para la realización de esta investigación, así como a los directivos, técnicos y productores del Proyecto Manejo Sostenible de Laderas (PMSL) y al personal administrativo y operativo del Laboratorio de Fertilidad de Suelos, Edafología, Instituto de Recursos Naturales, del Colegio de Postgraduados, por su ayuda y colaboración en el muestreo y análisis de suelos.

### LITERATURA CITADA

- Acosta M., M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícola de ladera en México. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Arnold, R.W., I. Szabolcs y V.O. Targulian (eds.). 1990. Global soil change. International Institute for Applied Systems Analysis-International Soil Science Society-United Nations Environmental Program. Laxenburg, Austria.
- Bruce, J.P., M. Frome, E. Haites, H. Janzen, R. Lal y K. Paustian. 1999. Carbon sequestration in soils. *J. Soil Water Conserv.* 54: 382-389.
- Carter, M.R., E.G. Gregorich, D.W. Anderson, J.W. Doran, H.H. Janzen y F.J. Pierce. 1997. Concepts of soil quality and their significance. pp. 1-19. *In: Gregorich, E.G. y M. Carter (eds.). Soil quality for crop production and ecosystem health.* Elsevier Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands.
- Etchevers, J.D., M. Acosta, C. Monreal, C. Hidalgo, J. Padilla y L. Jiménez. 2003. Below-ground (roots and soil) compartments of carbon in forest and agricultural systems on hillsides in Mexico. pp. 163-172. *In: Scott Smith, C.A. (ed.). Soil organic carbon and agriculture: Developing indicators for policy analyses.* Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development. Paris, France.
- Follet, R.F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Tillage Res.* 61: 77-92.
- Golden Software, Inc. 1999. Surfer, Versión 7. Golden, CO.
- Haynes, R.J. y P.H. Williams. 1993. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Adv. Agron.* 49: 119-199.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1997. Carta edafológica (disco compacto): Cobertura nacional, Serie 1. ISBN 970-13-1812-9. Aguascalientes, México.
- Jobbágy, E. y R.B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Applications* 10: 423-436.
- Lal, R., J. Kimble, R. Follet y B.A. Stewart 1998. Soil processes and the carbon cycle. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Robertson, G.P. 1998. GS+: Geostatistics for the environmental science. Gamma Design Software. Plainwell, MI.
- Rodríguez S., J. 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Colección de Agricultura. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- SAS Institute. 1985. Introductory guide for personal computers. 6th ed. Raleigh, NC.
- Schomberg, H.H., J.A. Stuedemann, A.J. Franzluebbbers y S.R. Wilkinson. 2000. Spatial distribution of extractable phosphorus, potassium, and magnesium as influenced by fertilizer and tall fescue endophyte status. *Agron. J.* 92: 981-986.
- Schwager, S.J. y E.A. Mikhailova. 2002. Estimating variability in soil organic carbon storage using the method of statistical differentials. *Soil Sci.* 167: 194-200.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre. México, D.F.
- Stein, A., J. Brouwer y J. Bouma. 1997. Methods for comparing spatial variability patterns of millet yield and soil data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 861-870.
- Swift, R.S. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci.* 166: 858-871.
- Trangmar, B.B., R.S. Yost y G. Uehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.* 38: 45-94.
- Turrent F., A., S. Uribe G., N. Francisco N. y R. Camacho C. 1995. La terraza de muro vivo para laderas del trópico subhúmedo de México. I. Análisis del desarrollo de la terraza durante 6 años. *Terra* 13: 276-298.
- Vergara S., M.A. 2003. Identificación y selección de indicadores de calidad del suelo y sustentabilidad en sistemas naturales y agrícolas de ladera en Oaxaca. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Yanai, J., C.K. Lee, T. Kaho, M. Lida, T. Matsui, M. Umeda y T. Kosaki. 2001. Geostatistical analysis of soil properties and rice yield in a paddy field and application to the analysis on yield-determining factors. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47: 291-301.

# ALMANAQUE TECNOLÓGICO: UN MEDIO PARA DIFUNDIR INNOVACIONES A PRODUCTORES DURAZNEROS DE JEREZ, ZACATECAS, MÉXICO

Technological Almanac: a Mean for Making Fruit Growing Innovations Known to Peach Farmers of Jerez, Zacatecas, Mexico

Guillermo Galindo-González<sup>1†</sup> y Jaime Mena-Covarrubias<sup>1</sup>

## RESUMEN

Durante el año 2000, en la región productora de durazno denominada Jerez de García Salinas, estado de Zacatecas, se realizó un estudio con el objetivo de conocer el grado de exposición de los productores a un almanaque tecnológico que contenía mensajes técnicos frutícolas. Para realizar lo anterior, se diseñó e imprimió un almanaque (tipo "lámina americana") que contenía recomendaciones para el cultivo del duraznero (*Prunus persica* Batch), asociadas con la secuencia lógica del calendario y los cambios fenológicos de este frutal. En enero de 2000, se entregaron almanaques a un grupo de 250 productores; posteriormente, a una muestra compuesta de 25 fruticultores se les aplicó un cuestionario integrado por 52 preguntas de tipo cerrado y abierto, para medir variables relacionadas con el almanaque tecnológico, los hábitos de comunicación del productor, sus unidades de producción y algunas de sus características personales. En este estudio, se concluyó que fue alta la exposición de los productores al almanaque, ya que éstos se enteraron de su contenido y aplicaron en sus huertas algunas de las recomendaciones que se difundieron en éste.

*Palabras clave:* Difusión técnica, transferencia de tecnología, desarrollo rural.

## SUMMARY

To determine the degree of exposure of peach growers to a technological almanac with recommendations for fruit growing, a study was carried out in Jerez de García Salinas, in the state of

Zacatecas, Mexico, during 2000. To this end, an almanac ("American sheet" type) was designed and printed. This contained technical recommendations for growing peaches, linked to a logical sequence of the calendar based on the phenological development of this fruit tree. During January of that year, almanacs were given to a group of 250 peach growers; afterwards, a 52-question interview (open and closed questions) was applied to a sample of 25 randomly selected growers. The variables measured were related to the technological almanac, the fruit growers' habits of communication, their production units, and some specifics of their personal characteristics. A high level of exposure of the peach growers to the almanac was found: they expressed knowledge of its content and they applied some of the recommendations given in the calendar on their orchards.

*Index words:* Technical extension, technology transfer, rural development.

## INTRODUCCIÓN

En Zacatecas, aproximadamente 3000 fruticultores tienen plantadas 26 402 ha con duraznero, de las cuales se cosechan 18 425 ha (88% de temporal y 12% de riego); en 1999, la producción fue de 13 114 t, la cual se considera baja debido, en parte, a la escasez del agua de lluvia, así como a la presencia de heladas tardías (Sánchez *et al.*, 2000). Las principales regiones productoras de durazno son Jerez de García Salinas, Valparaíso, Sombrerete y Chalchihuites; la presente investigación se realizó en la primera de éstas, región donde se concentra la mayor superficie cultivada con este frutal, ya que se tienen plantadas alrededor de 5000 ha (de las cuales 2540 ha son de riego), con rendimiento que oscila de 1 a 2 t ha<sup>-1</sup> en temporal y de 4 a 9 t ha<sup>-1</sup> en riego.

Los fruticultores del estado enfrentan problemas climáticos (presencia de heladas durante la primavera, baja disponibilidad de agua de lluvia y erosión del suelo), biológicos (presencia de plagas -barrenador de

<sup>1</sup> Campo Experimental Zacatecas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 18, 98500 Calera de Víctor Rosales, Zacatecas.

<sup>†</sup> Autor responsable (galindogg\_mx@yahoo.com.mx)



las ramas, araña roja, trips y pulgón negro- y enfermedades -cenicilla polvorienta, pudrición café del fruto, verrucosis, tiro de munición, roya, pudrición del cuello, cáncer perenne, cáncer bacterial y agalla de la corona-) y de manejo de huertos (existe heterogeneidad dentro de las huertas, ya que casi todas se han establecido con plantas propagadas por semilla, deficiente sistema de conducción y formación de los árboles, poco uso de fertilizantes, control inadecuado de maleza y poda invernal inadecuada); lo anterior fue señalado por Rumayor (1993) y Zegbe *et al.* (2000).

Con el propósito de acelerar el proceso de adopción de innovaciones en este estrato de fruticultores, en 1995, se implementó un programa de asistencia técnica; entre los medios que emplean los agentes de cambio para transmitir información a los fruticultores destacan: reuniones, visitas a las parcelas, demostraciones y algunas ayudas visuales (Galindo *et al.*, 2000b).

El grado de exposición que pueden tener los productores a un almanaque con información tecnológica no se ha medido, por lo cual existe un desconocimiento casi total del uso de este medio; por lo anterior, se diseñó y se distribuyó un almanaque con recomendaciones para el cultivo del duraznero generadas o validadas en el Campo Experimental Zacatecas (CEZAC).

Las variables seleccionadas en el presente estudio fueron: uso que le dio el productor al almanaque, retención de imágenes fotográficas, frecuencia de lectura de los mensajes impresos sobre el cultivo del duraznero, retención de mensajes escritos, utilidad de los mensajes transmitidos, mensajes aplicados y deseo de seguir recibiendo calendarios con temas agropecuarios. Otras variables, relacionadas con sus **hábitos de comunicación**, fueron: uso de medios masivos de comunicación, contacto con agentes de cambio y relación con casas comerciales que distribuyen productos para el campo. También se tomaron en consideración variables que están relacionadas con sus **unidades de producción**; éstas son: superficie cultivada anualmente, número de cultivos que atienden los productores y prácticas culturales que realizan en sus huertas. Finalmente, se establecieron otras variables de tipo social sobre el productor, que fueron: edad del productor, número de personas que habitan en la casa del productor, número de personas que saben leer y escribir de los que habitan en su casa, escolaridad del productor, número de hijos y grado de organización.

La hipótesis nula planteada en este estudio fue que no existe correlación entre las variables seleccionadas, con excepción de: uso que le dio el productor al almanaque y deseo de seguir recibiendo calendarios con temas agropecuarios.

Sobre la comunicación, Pérez (1987) afirmó que ésta es la relación establecida por la transmisión de estímulos y la provocación u obtención de respuestas; es a través de la comunicación como se logran transmitir las ideas entre personas, desarrollar el proceso de enseñanza aprendizaje de nuevos conocimientos y prácticas, cambiar las actitudes y modificar la conducta de los individuos (Galindo, 2001). Por su parte, Bertino (1991) señaló que para que se dé una comunicación eficiente, la fuente y el receptor deben tener algunas características semejantes, como son: habilidades en la comunicación, grado de conocimiento y nivel sociocultural. Sobre los factores que afectan la comunicación escrita, por parte de la fuente, destacan: a) su habilidad para escribir, b) su actitud respecto al tema o asunto del mensaje, c) su conocimiento del receptor, y d) el contacto sociocultural en el que opera la fuente (Galindo, 1996b).

La comunicación puede ser individual, grupal y masiva; la última de éstas presenta las siguientes características: a) su auditorio es numeroso, heterogéneo y anónimo, b) los mensajes se transmiten en forma pública, c) los receptores están distantes de la fuente y d) el comunicador suele pertenecer a una organización compleja (Blake y Haroldsen, 1984).

Los medios masivos son los canales que se emplean para la transmisión de mensajes, en los cuales interviene un medio de masas (Rogers y Shoemaker, 1974); éstos se clasifican en impresos y electrónicos.

Rogers y Beal (1960) determinaron que los medios de comunicación masiva juegan un papel importante en las dos primeras etapas del proceso de adopción (conocimiento, interés, evaluación, prueba y adopción). Las fuentes de carácter no formal (amigos y vecinos) revisten importancia en la etapa de prueba y adopción, les siguen los extensionistas.

Un medio que se ha utilizado esporádicamente para transmitir mensajes a los productores es el almanaque (del árabe al-mañaj, y éste del latín mañachus, círculo de los meses), el cual se clasifica como medio escrito; éste incluye un calendario (sistema de medida del tiempo para las necesidades de la vida civil, con la división del tiempo en días, meses y años) y, en algunas ocasiones, con datos

astronómicos, como ortos y ocasos del sol, su entrada a cada signo del zodiaco, principio de las estaciones, fases de la luna, así como épocas relativas a los actos religiosos y civiles, principalmente de santos y festividades (Real Academia Española, 1970).

Los almanaques de las más variadas formas provienen de la antigüedad, los cuales se tallaban en bastones de madera y en bloques de piedra. En España y Latinoamérica, al igual que en otros países europeos, el almanaque constituyó un medio de transición de cultura entre las clases populares, ya que, aparte de datos sobre fechas, acontecimientos astrológicos y fiestas religiosas (santoral), ofrecía predicciones del tiempo para todo el año, consejos para agricultores y ganaderos, citas y proverbios, pequeñas historias didácticas y moralistas en rima, anécdotas humorísticas y parodias satíricas, en particular irreverentes con el poder, entre otros añadidos.

En la actualidad, uno de los almanaques más comunes es el denominado: "lámina americana", que consiste en una hoja de cartulina con impresión de cromos, un espacio para publicidad y en la parte inferior aparecen los meses del año, los cuales en ocasiones son desprendibles; en general, los cromos ilustran paisajes, motivos infantiles y religiosos.

Sobre el almanaque tecnológico, Caetano (1980) afirmó que en el medio rural, éste permite inducir al destinatario a la acción, ya que puede motivar la toma de conciencia sobre la necesidad de aplicar una determinada tecnología. Entre las ventajas que presenta este medio destacan: a) goza de gran fuerza de uso-tradición en las áreas rurales; b) opera 24 horas del día; c) es un medio barato, en comparación con otros; d) puede ser un medio lleno de colorido y llamativo; e) inspira confianza, debido a la seriedad que la gente asigna a lo que ve impreso; y f) es un complemento eficaz de otros medios. Entre sus desventajas destacan: a) el mensaje que se transmite tiene que ser breve y sencillo, b) el grado de escolaridad de los receptores influye para que éstos decodifiquen los mensajes y c) su producción demanda conocimientos y destrezas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño, Contenido y Distribución del Almanaque

Se diseñó e imprimió, en papel lustrolito de 67 kg, un almanaque tipo "lámina americana" (de 50 cm de

ancho por 70 cm de largo), con un espacio para cromos (de 44 por 46 cm). En la parte inferior de éste, en 12 hojas desprendibles de papel bond de 49.5 kg (de 50 por 23 cm) aparecen los meses del año 2000 y 46 mensajes en forma de recomendaciones (distribuidos en los 12 meses del año), asociadas con la secuencia lógica del calendario y los cambios fenológicos del duraznero. En la redacción de los mensajes, se utilizaron palabras conocidas por los destinatarios y se redactaron frases cortas, para lograr un alto grado de legibilidad.

En la parte superior del espacio para cromos (cuyo fondo fue de color azul fuerte), se imprimieron a color logotipos (de 4.5 por 4.5 cm cada uno) de instituciones del sector agropecuario; posteriormente, aparece el siguiente encabezado con letras mayúsculas caladas en blanco: MANEJO INTEGRADO DEL CULTIVO DEL DURAZNERO. En el centro del espacio para cromos, siguiendo la forma de un óvalo, se imprimieron 12 fotografías (de 6 por 6 cm), cuyo contenido se refiere al desarrollo fenológico del cultivo o a la práctica más importante que se tiene que realizar en el mes correspondiente. En la parte superior de las fotografías, se imprimieron, con letras mayúsculas caladas en blanco, los meses del año y, en la inferior, los temas de las fotografías.

En la parte superior de las 12 hojas desprendibles, en un rectángulo de color amarillo (de 46 por 10 cm), se muestran, con letras mayúsculas y minúsculas en color negro, 46 mensajes relacionados con el cultivo del duraznero. En el resto de estas hojas, en letras negras, aparece el nombre del mes, el año y los días que lo integran; en color rojo se imprimieron los días de asueto.

El tipo de letra empleada en el diseño del almanaque fue Arial, ya que es legible y atractiva; además, se evitó el uso de muchos colores (plastas), para evitar confusión y pérdida de armonía.

En el área de estudio existen un total de 622 productores que cultivan duraznero en condiciones de riego en 2540 ha; de éstos, 250 reciben asistencia técnica por parte del personal del Programa Elemental de Asistencia Técnica (PEAT) y a estos productores se les entregó el almanaque, durante enero del 2000. Los productores de durazno de riego presentan características semejantes, en cuanto a: asistencia técnica, tamaño de las unidades de producción, edad de las plantaciones y uso de tecnología.

### Determinación de Tamaño de Muestra

Para determinar el tamaño de muestra, se tomó como referencia el porcentaje de productores que habían asistido a un plantel de enseñanza formal y los que no asistieron, de acuerdo con los resultados obtenidos por Galindo *et al.* (2000a); con base en lo anterior, se aplicó la fórmula:

$$n = N Z^2 PN QN / N d^2 + Z^2 PN QN$$

Donde: N = marco de muestreo (250),  $Z^2$  = confiabilidad (1.60), d = precisión deseada (10%), PN = probabilidad de éxito, QN = probabilidad de fracaso.

Entonces:

$$n = (250) (1.60)^2 (0.123) (0.877) / (250) (0.10)^2 + (1.60)^2 (0.123) (0.877) = 25$$

Después de obtener el tamaño de muestra, del total de los productores que recibieron el almanaque tecnológico, aleatoriamente se seleccionaron 25, a los cuales se les aplicó el cuestionario.

### Diseño y Aplicación de Cuestionarios

De acuerdo con los objetivos del estudio, se elaboró y se probó un cuestionario integrado por 52 preguntas, principalmente de tipo cerrado; éste se aplicó en diciembre del 2000, por extensionistas del PEAT, a quienes se les capacitó para su llenado.

### Análisis de la Información

Para el análisis de la información, se empleó la estadística descriptiva. Para la prueba de hipótesis, se aplicó el coeficiente de rangos ordenados, cuya fórmula es:

$$rs = 1 - 6 \sum d_i^2 / N^3 - N$$

Donde:  $d_i^2$  es la diferencia elevada al cuadrado del rango de la variable X menos el rango de la variable Y y N es el número de series.

Sobre este coeficiente, Pérez y Haroldo (1987) afirmaron que es una prueba no paramétrica, útil en caso de ser pequeño (< 30) el número de pares de puntajes que se desean asociar. Por su parte, Hernández *et al.* (1991) afirmaron que éste es una medida de correlación para variables en un sistema de

medición ordinal y de intervalo. Para probar la hipótesis de nulidad ( $H_0$ : no existe asociación entre las variables), se emplearon los valores críticos de rs que presentó Siegel (1975), en una tabla para muestras pequeñas (< 30), que tiene una probabilidad asociada, conforme a  $H_0$ , de  $P = 0.05$  y de  $P = 0.01$ . En el presente estudio, se estableció un grado de significancia de 0.05, por lo cual, con  $n = 25$ , el valor crítico de rs fue de 0.329.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Almanaque Tecnológico

De los entrevistados, 100% afirmaron haber recibido el calendario tecnológico y haberlo colgado en: sala (24%), cocina (24%), tienda (16%), pasillo (8%), comedor (4%), recámara (8%), cochera (4%), bodega (4%), cuarto de televisión (4%) y cuarto de herramienta (4%); también, de éstos 100% informaron recordar el contenido de alguna(s) de las 12 fotografías que aparecen en el espacio para cromos; los temas recordados fueron: poda del duraznero (88%), daños de araña roja (*Eotetranychus lewisi* McGregor) (72%), floración (68%), cosecha de durazno (68%), daños por gusano barrenador (*Anarsia lineatella* Zéller) (60%), frutos dañados por cenicilla (*Sphaeroteca pannosa*) (52%), pudrición amarga (ocasionado por un agente causal no identificado, la cual inicia en áreas probablemente dañadas por chinches de la familia Pentatonidae) (40%), caída de hojas (40%), injertación (36%), poda en verde (28%), letargo invernal (20%) y aplicación del cuarto riego (16%); lo anterior debido a que las imágenes fotográficas permanecen siempre a la vista. Se determinó que existe correlación positiva entre la retención de imágenes fotográficas y el número de prácticas culturales que realizan los productores en sus huertos.

Sobre la frecuencia de lectura de los mensajes impresos sobre el cultivo del duraznero, 22 de los entrevistados afirmaron haberse enterado de su contenido, 12 de éstos cada mes, cinco cada bimestre, tres cada trimestre, dos una sola vez y tres fruticultores nunca. Por otra parte, se determinó que esta variable correlaciona significativamente con la utilidad de los mensajes transmitidos, los mensajes aplicados y la edad de los productores (en forma positiva).

Con respecto a la retención de los mensajes escritos, 20 fruticultores los recordaron; la frecuencia

de los mensajes recordados fue: tres mensajes (siete productores), uno (cuatro), cinco (cuatro), cuatro (tres), dos (uno) y seis (uno). Los principales mensajes se refieren a: aplicación de pesticidas contra cenicilla durante la floración y otra vez a la caída de los pétalos (44%), control de plagas y enfermedades (44%), roza de la maleza presente en la huerta (36%), colocación de trampas con feromonas para capturar los adultos del gusano barrenador (36%), presencia de araña roja en inviernos con poco frío (heladas) (28%), poda del huerto (24%), fertilización de las huertas con fósforo y potasio al inicio de las lluvias (20%), y cortar y quemar de los brotes infectados con cenicilla y la madera de poda (20%), entre otros; sobre esta variable, se encontró que correlaciona positivamente con mensajes aplicados, contacto con agentes de cambio y edad de los productores.

Sobre la utilidad de los mensajes transmitidos, tres fruticultores afirmaron que éstos fueron muy útiles, 20, útiles y dos, poco útiles; además, se determinó que, al aumentar la relación de los productores con los agentes de cambio, se incrementa la utilidad de los mensajes difundidos en el almanaque por parte de los entrevistados, ya que el almanaque resulta ser un apoyo importante para reforzar los mensajes que éstos reciben por parte de los extensionistas; además, se determinó que esta variable correlaciona positivamente con el uso de medios de comunicación y con la frecuencia de lectura de los mensajes sobre el cultivo del duraznero.

De los productores que se enteraron de los mensajes que aparecieron en el almanaque, 16 afirmaron haber puesto en práctica las recomendaciones impresas en el calendario; las más señaladas fueron: control de la araña roja (40%), control del barrenador de las ramas del duraznero (24%), control de la cenicilla (20%), control de plagas y enfermedades (8%), fertilización al inicio del temporal (8%), poda en verde (8%), primer riego (4%), cuarto riego (4%), fertilización después de la cosecha (4%) y limpieza de la huerta (4%). Se encontró que la variable mensajes aplicados correlaciona positivamente con la retención de los mensajes escritos.

Sobre el deseo de recibir almanaques que contengan información de tipo agropecuario, 100% de los entrevistados comentaron que les gustaría seguir recibiendo.

### Hábitos de Comunicación

Sobre el uso de medios masivos de comunicación, 18 productores afirmaron no leer ningún periódico, principalmente porque no se venden en sus comunidades. Por lo que respecta al uso de revistas con temas agropecuarios, sólo un productor afirmó exponerse a este medio; los demás no lo hacen debido a que no saben dónde conseguirlas o desconocen que éstas existan. En lo que se refiere al uso de folletos agrícolas, 17 fruticultores afirmaron utilizar éstos, los cuales son proporcionados por los extensionistas del PEAT. El nivel de tecnología agropecuaria está altamente asociado con el uso de medios impresos (Canizales y Myren, 1967).

El total de los entrevistados escuchan el radio, poseen por lo menos un radioreceptor; el promedio de horas que lo escuchan es de 13.3 h semana<sup>-1</sup> y su horario preferido es entre 6:00 y 8:00 h de la mañana.

Sobre la correlación que existe entre el uso de medios masivos y las demás variables, se determinó que está relacionado con el número de personas que saben leer y escribir, y que habitan en la casa del productor, así como con la utilidad de los mensajes transmitidos.

Sobre el contacto que tienen los productores con los agentes de cambio, 20 de éstos afirmaron haber tenido relación, en los últimos tres meses, con algún extensionista del PEAT; el promedio de veces que los productores y los agentes de cambio establecieron alguna conversación relacionada con sus cultivos o ganado fue de siete. Se determinó que se asocia positivamente la relación de los agentes de cambio con la retención de los mensajes transmitidos y su utilidad.

Con respecto a la relación que tienen los entrevistados con casas comerciales que distribuyen productos para el campo, se encontró que durante el año 2000, 22 fruticultores acudieron a éstas, con un promedio de tres veces; se encontró correlación positiva entre las variables relación con casas comerciales que distribuyen productos para el campo y superficie cultivada cada año por los productores.

### Unidades de Producción

El promedio de hectáreas que cultivan anualmente los productores es de 21.44. Los cultivos que atienden, en condiciones de temporal, son: avena forrajera (*Avena sativa* L.), maíz (*Zea mays* L.) y frijol

(*Phaseolus vulgaris* L); con riego se siembran, con menor frecuencia, duraznero, avena forrajera, maíz (grano y forraje), chile (*Capsicum annuum* L.) y ciruelo (*Prunus salicina* Lindl.). Se determinó correlación negativa entre el número de cultivos que los productores atienden y la edad de los mismos. Con respecto al número de prácticas culturales que realizan los fruticultores en sus huertas de duraznero, 24 de éstos afirmaron podar, 22 controlan plagas, 21 eliminan maleza, 15 fertilizan, 14 dan riegos de auxilio, 13 controlan enfermedades y tres aclaran frutos.

### El Productor

La edad promedio de los fruticultores entrevistados fue de 55 años, con una moda de 54 (Cuadro 1). Se encontró correlación negativa entre la edad de los agricultores y el número de personas que habitan en la casa del productor, con la escolaridad de los entrevistados, la retención de mensajes escritos y con el número de cultivos que atienden; por otra parte, se encontró correlación positiva entre la edad de los receptores y el número de hijos de éstos, y la frecuencia de lectura de los mensajes impresos en el almanaque tecnológico.

El promedio de personas que habitan en la casa de los fruticultores fue de cuatro, con una máxima de ocho y una mínima de dos; de éstas, una media de cuatro saben leer y escribir. El promedio de hijos que tienen los entrevistados fue de cinco. También, se determinó que, al aumentar el número de personas que saben leer y escribir, de los que habitan en la casa del productor, se incrementa el uso de medios masivos por parte del receptor. Su promedio de escolaridad fue de tres años cursados de educación primaria. También, se concluyó que, al aumentar el número de personas que habitan en la casa del productor, disminuye la edad de los entrevistados.

**Cuadro 1. Características de los fruticultores entrevistados.**

Característica	Promedio
Edad	55 años
Número de personas que habitan en la casa del productor	4
Número de hijos del productor	5
Años cursados por el productor en un plantel de enseñanza formal	4
Número de personas que saben leer y escribir de los que viven en la casa del productor	4

El total de los entrevistados afirmaron haber asistido a algún plantel de enseñanza formal, nueve de éstos cursaron hasta 6° grado de educación primaria, cuatro sólo 1° de primaria, cuatro hasta 3° de secundaria, tres hasta 3° de primaria, tres hasta 2° grado de primaria y dos hasta el 4° grado de educación primaria; el promedio de años cursados por el productor en un plantel de enseñanza formal fue de cuatro. Se determinó correlación negativa entre la escolaridad de los productores y su edad, así como con el número de hijos que tienen. Sobre esta variable, Álvarez *et al.* (1985) determinaron que el grado de escolaridad influye en el uso de tecnología; además, se ha determinado que ésta correlaciona con: exposición a medios de comunicación, relación con agentes de cambio, contacto con casas comerciales y cosmopolitismo (Galindo, 1994, 1996a).

El total de los entrevistados pertenecen a alguna organización, entre las que destacan: Asociación de Productores de Durazno (19), Asociación Ganadera Local (5), Asociación de Usuarios de la Presa Ramón López Velarde (4), Asociación Civil de la Micro-Industria (2), Sorteadora de Durazno "Los Haro" (2), y Club de Jerezanos Internacionales y Amigos (1).

### CONCLUSIONES

- El almanaque se colocó en lugares visibles para los productores y sus familias y, en algunas ocasiones, para el público en general.
- Fue alto el grado de exposición de los productores al almanaque tecnológico, ya que la mayoría de éstos se enteraron mensualmente del contenido de los mensajes que aparecieron en el almanaque, recordaron su contenido y los aplicaron en sus huertas.
- El analfabetismo no constituye una barrera para el flujo de información, ya que en el total de las casas de los productores existe por lo menos una persona que sabe leer y escribir.
- El almanaque puede ser un auxiliar valioso para transmitir mensajes a productores del campo; sin embargo, su uso debe complementarse con otros medios (masivos, grupales e interpersonales), para reforzar la transmisión de mensajes, ya que dentro del proceso de adopción de innovaciones, cada medio juega un papel importante.

### LITERATURA CITADA

- Álvarez, G., V. Martínez G. y C. Díaz H. 1985. La utilización de la tecnología en dos comunidades del Plan Mixteca Alta,

- estado de Oaxaca: El caso de recomendaciones para el maíz de temporal. *Agrociencia* 61: 113-123.
- Bertino, D. 1991. Comunicación. Centro de Estudios Agrícolas Borgo a Mozzano. Lucca, Italia.
- Blake, H. y O. Haroldsen. 1984. Una taxonomía de conceptos de la comunicación. Nuevomar. D.F., México.
- Caetano O., A. 1980. Proposición de una estrategia de difusión de tecnología en el INIA. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. D.F., México.
- Canizales, A. y T. Myren D. 1967. Difusión de información agrícola en el Valle del Yaqui, Sonora. Folleto Técnico 51. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. D.F., México.
- Galindo G., G. 1994. Informe de actividades del Programa de Divulgación Técnica del CECAL. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. D.F., México.
- Galindo G., G. 1996a. Canales de comunicación de los productores agropecuarios del estado de Zacatecas. *Ciencia* 47: 371-379.
- Galindo G., G. 1996b. Legibilidad y comprensión de publicaciones dirigidas a productores y extensionistas de Zacatecas. *Información Técnica Económica Agraria* 92a(2): 115-125.
- Galindo G., G. 2001. Estrategia de comunicación en el medio rural zacatecano como medio para transferir innovaciones agrícolas. *Terra* 19: 393-398.
- Galindo G., G., W.C. Tabares R. y G. Gómez A. 2000a. Caracterización de productores agrícolas de seis Distritos de Desarrollo Rural de Zacatecas. *Terra* 18: 83-92.
- Galindo G., G., G. Gómez A. y W.C. Tabares R. 2000b. Caracterización de los extensionistas del Programa Elemental de Asistencia Técnica. *Fitotecnica Mexicana* 23: 307-320.
- Hernández S., R., C. Fernández C. y P. Baptista L. 1991. Metodología de la investigación. McGraw Hill. D.F., México.
- Pérez, T. y E. Haroldo. 1987. Estadística para ciencias del comportamiento. Harla. D.F., México.
- Pérez L., E. 1987. Comprensión de palabras técnicas por ejidatarios del municipio de Cotaxtla, estado de Veracruz. Folleto de Investigación 69. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. D.F., México.
- Real Academia Española. 1970. Diccionario de la lengua española. 17ª ed. Editorial Escasa-Calpe. Madrid, España.
- Rogers, M.E. y M. Beal. 1960. The adoption of the farm practices in a central Iowa community. Special Report 26. Agricultural Extension Service. Ames, IA.
- Rogers, M.E. y F. Shoemaker. 1974. Communication of innovations a cross-cultural approach. McMillan. New York.
- Rumayor R., F. 1993. Sistema producto durazno. pp. 24-27. In: G. Galindo G. (ed.). Situación del sector agrícola en Zacatecas de acuerdo al potencial productivo y tecnología mejorada. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Zacatecas, México.
- Sánchez R., R., R. Bautista O., F. Rodríguez O. y J. Zavaleta R. 2000. El durazno mexicano: un mercado para explorar. *Claridades Agropecuarias* 88: 4-10.
- Siegel, S. 1975. Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta. Trad. al español por J. Aguilar Villalobos. Trillas. D.F., México.
- Zegbe D., J., J. Mena C. y F. Rumayor R. 2000. Guía para cultivar duraznero criollo en Zacatecas. Folleto para Productores 24. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Zacatecas, México.

# TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN CORRIENTES NATURALES: REVISIÓN TÉCNICA DE ECUACIONES EMPÍRICAS DE PREDICCIÓN DEL ARRASTRE DE SEDIMENTOS DE FONDO

## Sediment Transport in Natural Channels: Technical Review of Empirical Bedload Equations

Miguel Bravo-Espinosa<sup>1†</sup>, Waite R. Osterkamp<sup>2</sup> y Vicente L. Lopes<sup>3</sup>

### RESUMEN

Para estimar la descarga de sedimentos de fondo en corrientes naturales, se ha sugerido el uso de ecuaciones empíricas. En México, son pocos los estudios de transporte de sedimentos. Por lo tanto, se desarrolló el presente trabajo para describir y analizar cinco ecuaciones empíricas de predicción del transporte de fondo, como las propuestas por Meyer-Peter y Muller, Bagnold, Yalin, Parker *et al.* y Schoklitsch. Estas ecuaciones se seleccionaron considerando su fundamento teórico y frecuencia de uso. Con base en la teoría del transporte de sedimentos y las relaciones hidráulicas reportadas en la explicación original, se determinaron la estructura, las principales asunciones y las limitaciones de cada ecuación. En las cinco ecuaciones se asume, de manera explícita, una disponibilidad ilimitada de sedimento y, además, que ninguna incluye parámetros relacionados con la magnitud del pavimento del cauce. Del análisis de la evaluación de las ecuaciones se estableció que, al incluir el entendimiento del régimen de transporte de sedimentos en la predicción de la descarga, se mejora la capacidad predictiva de dichas ecuaciones. Los resultados del estudio establecieron que las ecuaciones de Parker *et al.*, Schoklitsch y Meyer-Peter y Muller presentan una mejor capacidad predictiva en cauces con una condición no limitada por disponibilidad de sedimento, mientras que las de Bagnold y Schoklitsch para cauces con escasa disponibilidad de sedimento.

**Palabras clave:** Carga de fondo, cauce natural.

<sup>1</sup> Centro Nacional de Investigación para Producción Sostenible, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 7-116, 58260 Morelia, Michoacán, México.

<sup>†</sup> Autor responsable (bravo\_miguel@infosel.net.mx)

<sup>2</sup> US Geological Survey, Tucson, AZ.

<sup>3</sup> University of Arizona, Tucson AZ.

Recibido: Noviembre 2001. Aceptado: Marzo 2004.  
Publicado como ensayo en *Terra Latinoamericana*: 377-386.

### SUMMARY

It is suggested that empirical equations be used to predict bedload discharge in alluvial channels. In Mexico, very few studies of sediment transport have been conducted. Five prominent equations to predict bedload discharge, those of Meyer-Peter and Muller, Bagnold, Yalin, Parker *et al.*, and Schoklitsch were described and analyzed. The five equations were selected considering their theoretical basis and extent of use. Based on the sediment-transport theory and hydraulic relations described in the original references, the structure, main assumptions, and limitations of each equation were determined. From the analyses it was concluded that the five equations were developed assuming non-limiting conditions of sediment availability, and that none of the equations explicitly include parameters related to the magnitude of channel armoring. From the equation-evaluation review it was established that including an understanding of the sediment-transport regime in the prediction of bedload discharge improves an equation's predictive ability. Results of the study established that equations by Parker *et al.*, Schoklitsch, and Meyer-Peter and Muller perform well for channels with a condition of unlimited sediment availability, and equations of Bagnold and Schoklitsch performed well for channels with limited sediment availability.

**Index words:** Bedload transport, empirical prediction equations, alluvial channel.

### INTRODUCCIÓN

El sedimento en movimiento puede clasificarse de dos maneras: con respecto a su origen y de acuerdo con su modo de desplazamiento (Figura 1). En el primer tipo, si el sedimento proviene del fondo del cauce, se le conoce como descarga de lecho; por el contrario, si el sedimento proviene de una fuente externa al cauce o incluso de fuentes temporales de material de lecho, entonces se le conoce como



Figura 1. Clasificación del transporte de sedimentos en corrientes naturales.

material o carga de lavado; en este caso, son partículas finas. En el segundo tipo, si las partículas se sostienen en el agua por efectos ascendentes de la turbulencia, entonces se le conoce como transporte suspendido, y si las partículas se desplazan por arrastre o por saltos sobre o muy cerca del fondo del cauce, el transporte se conoce como arrastre de fondo (Naden, 1988).

Aun cuando el arrastre de fondo representa menos de 20% de la descarga total de sedimentos de una corriente natural (Reid y Frostick, 1987), éste tiene importancia inmediata en la planeación para el manejo de cuerpos de agua, para aumentar el conocimiento de los impactos de la sedimentación sobre hábitats acuáticos, azolve de vasos de almacenamiento y cauces naturales, y para identificar cambios climáticos según estudios recientes (Osterkamp y Parker, 1991; Leopold, 1994; Lane *et al.*, 1996). No obstante lo anterior, se carece de una fuente organizada y sumariada sobre transporte de sedimentos de fondo disponible en español.

El enfoque tradicional para la predicción de la descarga de sedimentos de fondo en corrientes naturales ha sido a través del uso de ecuaciones empíricas. La importancia de elegir una ecuación con gran capacidad predictiva permite, además de mejorar la habilidad para implementar acciones que reduzcan la descarga de sedimentos en cauces, vasos de almacenamiento e infraestructura, describir la dinámica del sedimento en un flujo uni-dimensional en un canal con la ecuación diferencial general:

$$\frac{\partial(CQ)}{\partial x} + \frac{\partial(A_f C)}{\partial t} + (1-p)\rho_s g \frac{\partial(W_b z)}{\partial t} - q_s = 0 \quad (1)$$

Donde: C = concentración actual de sedimento ( $M L^{-3}$ ); Q = gasto de la corriente ( $L^3 T^{-1}$ );  $A_f$  = área transversal de flujo ( $L^2$ );  $\chi$  = distancia aguas abajo (L); t = tiempo (T); p = porosidad del sedimento depositado ( $M L^{-3}$ );  $\rho_s$  = densidad de partículas de

sedimento ( $M L^{-3}$ ); g = aceleración de la gravedad ( $LT^{-2}$ );  $W_b$  = ancho de la sección en la cual ocurre la deposición o dislocamiento de partículas (L); z = altura del sedimento depositado (L);  $q_s$  = flujo de sedimento lateral por unidad de longitud de canal ( $M L^{-1} T^{-1}$ ); L representa longitud, T es tiempo, M es masa en la magnitud de las variables.

En México, la demanda de información sobre transporte de sedimentos se ha relacionado fundamentalmente con la capacidad de almacenamiento y vida útil de la infraestructura hidráulica. Martínez y Fernández (1983) estimaron que las corrientes naturales transportan  $365 \times 10^6$  t año<sup>-1</sup> de sedimento, de los cuales la tercera parte se deposita en obras de infraestructura y el resto se descarga al océano. Las motivaciones ecológicas del arrastre de sedimentos también son importantes; un estudio sobre la disponibilidad de agua en México mostró que las partículas de sedimento modifican la calidad de los cuerpos de agua superficiales para uso doméstico, debido a que son portadores o son fuentes potenciales de contaminantes (Jiménez *et al.*, 1998). La disponibilidad de agua para uso agrícola y para la protección de la vida acuática, también está restringida principalmente por contaminantes sólidos. En la literatura se reporta que los contaminantes que poseen coeficientes de distribución suelo-agua muy altos, merecen una atención especial en estudios de calidad del agua porque la concentración del contaminante es mayor en la superficie de las partículas de sedimento, en suspensión o de fondo, que el disuelto en el agua (Oliver y Charlton, 1984).

El objetivo del presente trabajo fue describir y analizar cinco ecuaciones empíricas de predicción del transporte de sedimento de fondo. Las ecuaciones evaluadas fueron las propuestas por Meyer-Peter y Muller (1948), Schoklitsch (1962), Yalin (1963), Bagnold (1980) y Parker *et al.* (1982).



## MECÁNICA DEL ARRASTRE DE SEDIMENTOS DE FONDO

La teoría del transporte de sedimentos establece que las variables que controlan el movimiento de sedimentos en un cauce natural son la capacidad de transporte del cauce y la disponibilidad de sedimento (Graf, 1971; Simons y Senturk, 1992). La capacidad de transporte es la máxima carga que puede transportar un flujo y la disponibilidad de sedimentos es la existencia de material lo suficientemente fino para ser movilizado por un flujo. Los procesos que controlan la disponibilidad y el almacenamiento de sedimentos, al igual que el transporte, son altamente dependientes de la escala, como lo mencionaron Osterkamp y Toy (1997).

El arrastre de fondo es aquella fracción del sedimento total que una corriente transporta, sobre o muy cerca del fondo del cauce, la cual se mueve por saltos, arrastre o rodando (Garde y Ranga Raju, 1985; Chang, 1988). En general, el flujo de sedimento de fondo es pequeño comparado con la descarga de sedimento suspendido que una corriente natural transporta. Sin embargo, el arrastre de fondo es importante por su contribución a la morfología del cauce. Más aún, es el factor dominante en la determinación de la estabilidad del canal natural, en la forma del fondo del cauce y, por lo tanto, responsable de la resistencia hidráulica, del gradiente de energía del cauce y de algunas propiedades del flujo (Shen y Cheong, 1978; Leopold, 1992; Carbonneau y Bergeron, 2000).

Aunque existe un conocimiento incompleto del tipo de fuerzas y sus magnitudes que actúan sobre una partícula que reposa en el fondo de un cauce, o que se encuentra muy cerca de éste, en general se acepta que dicha partícula se encuentra bajo la acción de dos fuerzas opuestas. Una que tiende a mantener la partícula en reposo y la otra que trata de rodar o levantar esa misma partícula (Simons y Senturk, 1992; Hu y Hui, 1996). A continuación se describen estas fuerzas.

1. La fuerza de gravedad que actúa sobre una partícula se expresa como el producto entre el volumen y el peso sumergido de la partícula ( $F_g$ ). Esta fuerza actúa de manera vertical descendente:  $F_g = K_1 D^3 (\rho_s - \rho)g$ .
2. El esfuerzo hidráulico cortante ( $F_d$ ), también conocido como esfuerzo hidráulico, es la resultante de la fricción que ocurre sobre la superficie de la partícula y el esfuerzo causado por la diferencia de presiones aguas arriba y aguas abajo de la partícula.

Esta fuerza actúa en sentido paralelo a la dirección de la corriente (Hu y Hui, 1996):

$$F_d = C_d \left[ \rho \frac{V_r^2}{2} \right] A'$$

3. La fuerza ascendente ( $F_L$ ) surge de dos maneras. Una debida a diferencias en la velocidad del flujo que crea un gradiente vertical de presiones, y la segunda, por efecto de la turbulencia. Esta fuerza actúa en un sentido vertical ascendente (Hu y Hui, 1996):

$$F_L = C_L \left[ \rho \frac{V_r^2}{2} \right] A'$$

Donde:  $K_1$  = factor de proporcionalidad (si la partícula es esférica,  $K_1 = \pi/6$ );  $D$  = diámetro de partícula (L);  $\rho$  = densidad del fluido ( $M L^{-3}$ );  $C_d$  = coeficiente de esfuerzo;  $V_r$  = velocidad media de la partícula con relación al fluido ( $L T^{-1}$ );  $A'$  = área transversal de una partícula ( $L^2$ );  $C_L$  = coeficiente de ascenso;  $F$  representa la fuerza en la magnitud de las variables.

El desplazamiento de una partícula se inicia cuando el esfuerzo cortante excede un valor crítico. Esto es, cuando ocurre una tasa baja de transporte, la partícula se desplazará rodando sobre la superficie de la cama del cauce. Si el esfuerzo hidráulico aumenta, la partícula se desplazará saltando, debido a la rugosidad del fondo y a la fuerza de ascenso. De manera recurrente, la partícula experimentará nuevos saltos por efecto del impacto sobre el fondo del cauce y de la fuerza de ascenso (Yalin, 1972; Bagnold, 1973; Wiberg y Smith, 1985).

El transporte de fondo es un proceso con variabilidad temporal y espacial (Gomez, 1983). Dicha variabilidad la explican aquellos factores que determinan la disponibilidad de sedimento. De acuerdo con Gomez (1991) y Reid y Frostick (1994), tanto el colapso del fondo de un cauce, como la socavación y sedimentación, los cuales modifican la sección transversal de un cauce, cambian las condiciones de flujo y, por ende, el arrastre de fondo. Además, la cantidad de sedimento de fondo varía drásticamente en las porciones de la sección transversal. Un estudio de campo, realizado en condiciones de flujo uniforme, mostró que las mayores tasas de transporte ocurren en el centro del cauce (Pitlick, 1988). A pesar del progreso obtenido en la mecánica del arrastre de fondo, aún es vigente la necesidad de identificar una ecuación o grupo de ecuaciones que tengan una capacidad de predicción, razonable o satisfactoria, de las mediciones obtenidas en una corriente natural.

## ECUACIONES DE TRANSPORTE DE FONDO

Tradicionalmente, los modelos de erosión y transporte de sedimentos se clasifican en modelos basados en procesos físicos y en modelos empíricos. Los primeros describen los procesos con base en fundamentos hidrológicos y de mecánica de la erosión-transporte a partir de las leyes de conservación de masa, *momentum* y varias formas de energía. Los modelos empíricos no se basan en las leyes generales y son tipificados por la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS). La combinación de estos dos tipos de modelos también existe. Considerando el factor tiempo, los modelos pueden clasificarse como estáticos y dinámicos. Los modelos estáticos o invariantes incluyen ecuaciones empíricas donde el tiempo no es una variable independiente, mientras que los modelos dinámicos requieren ecuaciones diferenciales donde el tiempo sí es una variable independiente (Woolhiser, y Brakensiek, 1982). En adición, existen modelos agregados y distribuidos dependiendo del grado de discretización de las variables de entrada; por ejemplo, el modelo distribuido WEPP (Water Erosion Prediction Project), que cuantifica el desprendimiento, transporte de partículas de suelo y la sedimentación, incluye parámetros y variables con distribución espacial y temporal, entre ellos, cantidad e intensidad de la lluvia, parámetros de erosionabilidad laminar y acanalada, propiedades del suelo, longitud, forma, orientación, e inclinación de la pendiente (Lafien *et al.*, 1991). El desarrollo de una tecnología de predicción con el uso de modelos con fundamento en procesos requiere de mayores y mejores bases de información, además de un mayor conocimiento de los modelos empíricos.

Existe un gran número de ecuaciones empíricas para predecir la descarga de sedimento de fondo de una corriente natural. A pesar de que tienen su fundamento en diferentes enfoques, las ecuaciones poseen principios generales comunes. Estos son: (a) el modo de circulación del agua y sedimento corresponden a un régimen continuo y uniforme; (b) la disponibilidad de sedimento para su transporte es igual a la capacidad de transporte de la corriente natural; y (c) existe una relación única entre la tasa de transporte de los sedimentos y los parámetros hidráulicos y sedimentológicos (Graf, 1971; Reid y Dunne, 1996; Yang, 1996). En el presente trabajo, se eligieron cinco ecuaciones, considerando su fundamento teórico y frecuencia de uso. Cada

ecuación se acompaña de los principios que la fundamentan. Éstos se definieron a partir de las relaciones hidráulicas reportadas en la explicación original de la ecuación, análisis de la estructura de la ecuación y de la teoría del transporte de sedimentos. Se reconoce que el conocimiento y cumplimiento de las asunciones que fundamentan a una ecuación de transporte promoverán su mejor uso. Las ecuaciones se expresan en el Sistema Internacional de Unidades y la descarga del arrastre de fondo se indica en peso seco por unidad de tiempo.

### Ecuación de Meyer-Peter y Muller

Meyer-Peter y Muller (1948) desarrollaron una ecuación empírica a partir de estudios efectuados en aforadores con gastos que fluctuaron de 0.002 a 2 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, pendiente de 0.004 a 0.2 m m<sup>-1</sup> y con tirante de 0.01 a 1.2 m. Los experimentos se condujeron con materiales naturales y sintéticos cuyo diámetro osciló entre 0.4 y 30.0 mm. Para un canal rectangular, la ecuación de Meyer-Peter y Muller se expresa así:

$$q_{bf} = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \left[ \frac{\left( \frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} S_r \gamma - 0.047(\gamma_s - \gamma) D_{50}}{(0.25) \left( \frac{\gamma}{g} \right)^{1/3}} \right]^{3/2} \quad (2)$$

Donde:  $q_{bf}$  = descarga de sedimentos de fondo expresada en peso unitario (FL<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>);  $\gamma$ ,  $\gamma_s$  = peso específico del agua y de partículas de sedimento (FL<sup>-3</sup>);  $k_r$ ,  $k_s$  = coeficientes de rugosidad para partículas y para el fondo del cauce (L<sup>1/3</sup>T<sup>-1</sup>);  $S_r$  = pérdida de energía por fricción (LL<sup>-1</sup>);  $D_{50}$  = tamaño de partícula tal que 50% son menores o iguales a ese tamaño (L).

El coeficiente de rugosidad, el cociente  $k_s/k_r$  y la pendiente ( $S$ , LL<sup>-1</sup>) están definidos por:  $k_r = \frac{26}{D_{90}^{1/6}}$ ;

$$\left[ \frac{k_s}{k_r} \right]^{3/2} = \frac{S_r}{S}, \text{ por lo tanto, } S_r = S \left[ \frac{k_s}{k_r} \right]^{3/2};$$

$$\text{donde } S_r = \frac{V^2}{k_r^2 R^{4/3}} = \frac{V^2}{\left[ \frac{26^2}{D_{90}^{1/3}} \right] R^{4/3}} = S \left[ \frac{k_s}{k_r} \right]^{3/2}$$

Donde:  $V$  = velocidad media de la corriente ( $LT^{-1}$ );  $R$  = radio hidráulico (L);  $D_{90}$  = tamaño de partícula tal que 90% son menores o iguales a ese tamaño (L).

La descarga total de sedimentos de fondo ( $Q_{bm}$ ), expresada en peso seco ( $MT^{-1}$ ), es:

$$Q_{bm} = q_{bf} w \left[ \frac{1}{g} \right] \quad (3)$$

Donde:  $w$  = ancho de la corriente (L).

Los principales fundamentos de la ecuación de Meyer-Peter y Muller incluyen:

(1) La capacidad de una corriente para transportar sedimentos a lo largo de su lecho varía directamente con la diferencia entre el esfuerzo hidráulico que actúa sobre las partículas y el esfuerzo cortante crítico que determina el inicio del movimiento de dichas partículas. (2) La pérdida de energía, debida a la resistencia de las partículas, mantiene el arrastre de fondo. (3) La porción del flujo que actúa sobre el lecho o sobre formas del lecho (dunas) reduce la fuerza de tracción disponible para el transporte de sedimentos. (4) El diámetro medio de la distribución de tamaños de partícula es adecuado para representar el espectro de partículas en la descarga de sedimentos. (5) El transporte de material no consolidado ocurre en la vecindad del lecho del cauce en condiciones de flujo que originan dunas y otras formas, pero que excluyen o reducen el transporte de sedimento en suspensión. (6) Existe similitud entre los parámetros que sostienen el transporte de sedimentos y aquellos que controlan el inicio del desplazamiento. (7) Todas las partículas con diámetros mayores que 0.4 mm se transportan como sedimento de fondo.

### Ecuación de Bagnold

La ecuación de Bagnold (1980) relaciona el gasto de energía, expresada por el concepto de potencia del caudal, con la tasa de trabajo, representada por la tasa de transporte de sedimentos. Esta expresión se aplica a corrientes con distribución unimodal o bimodal, esto es, que en el tamaño de partículas de sedimento existe una o dos clases con frecuencia máxima. La ecuación de Bagnold es:

$$q_{bm} = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} i_{br} \left[ \frac{(\omega - \omega_c)}{(\omega - \omega_c)_r} \right]^{3/2} \left[ \frac{d}{d_r} \right]^{-2/3} \left[ \frac{D_{50}}{D_r} \right]^{-1/2} \quad (4)$$

Donde:  $q_{bm}$  = descarga unitaria de  $Q_{bm}$ ;  $\omega$ ,  $\omega_c$  = potencia unitaria del caudal y del umbral unitario de  $\omega$  ( $ML^{-1}T^{-1}$ );  $d$ ,  $d_r$  = tirante de la corriente y valor de referencia para  $d$  (L);  $D_r$  = valor de referencia del diámetro de partícula (L);  $i_b$  = proporción del peso del sedimento del cauce de la fracción  $i$  ( $MT^{-1}L^{-1}$ ); el subíndice  $r$  indica valores de referencia que Bagnold extrajo de un estudio de Williams (1970). Éstos son:

$$i_{br} = 0.1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}; (\omega - \omega_c)_r = 0.5 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}; d_r = 0.1 \text{ m}; D_r = 0.0011 \text{ m}$$

La potencia del caudal por unidad de área, medida en el fondo del cauce, es:

$$\omega = \frac{\rho Q S}{w}$$

El umbral de la potencia unitaria del caudal está dado por:

$$\omega_c = 290 D_{50}^{3/2} \log \left[ \frac{12d}{D_{50}} \right]$$

El umbral de la potencia unitaria del caudal para corrientes con distribución bimodal de partículas ( $\varpi_c$ ) es:

$$\varpi_c = \left[ (\varpi_c)_1 (\varpi_c)_2 \right]^{1/2}$$

Donde:  $(\varpi_c)_1$  y  $(\varpi_c)_2$  = umbral de la potencia unitaria del caudal para tamaño de partícula  $D_1$  y para tamaño de partícula  $D_2$ , respectivamente.

La descarga del arrastre de fondo está dada por:

$$Q_{bm} = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} 0.1 \left[ \frac{(\omega - \omega_c)}{0.5} \right]^{3/2} \left[ \frac{d}{0.1} \right]^{-2/3} \left[ \frac{D_{50}}{0.0011} \right]^{-1/2} w \quad (5)$$

La ecuación de Bagnold depende de varias asunciones: (1) La potencia del caudal disponible para el arrastre del sedimento es la energía cinética, la cual permanece constante a lo largo del cauce. (2) El transporte es una función inversa del tirante de la corriente y del tamaño de partículas. (3) El umbral de la potencia del caudal es definido por un esfuerzo cortante crítico adimensional. (4) La distribución de tamaño de partículas se caracteriza por la moda. (5) El transporte de partículas no se circunscribe a la vecindad del fondo del cauce. (6) La potencia de la corriente ejercida sobre el fondo del cauce controla la tasa de arrastre y no la potencia del caudal ejercida sobre las partículas de sedimento. (7) Las condiciones

de flujo no originan dunas u otras formas en el fondo del cauce.

### Ecuación de Yalin

Yalin (1963) desarrolló una ecuación a partir del análisis dimensional, asumiendo que el incremento en la tasa de transporte es debido al movimiento promedio de las partículas que se desplazan saltando y no al número de partículas que están en movimiento. Las constantes empíricas del modelo se desarrollaron en canales de aforo, conteniendo diversos tamaños de partículas de sedimento (0.78 a 28.6 mm). El modelo de Yalin se restringe a tamaños uniformes de partículas y, al igual que Bagnold (1980), no prevé el efecto de formas presentes en el lecho del cauce. Es decir, Yalin excluye condiciones con valores de esfuerzo cortante bajos que favorecen la formación de dunas (Graf, 1971). Aun cuando Yalin no mencionó el diámetro de partícula que debe ser usado en su modelo, en diversas investigaciones se ha utilizado el diámetro medio de partícula,  $D_{50}$  (Alonso *et al.*, 1981; Gomez y Church, 1989). Entre otras aplicaciones de la ecuación de Yalin, Alonso *et al.* (1981) documentaron que esta ecuación es apropiada para predecir el transporte de sedimento en escurrimientos superficiales, por ello, se le utiliza ampliamente en modelos hidrológicos como el CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) y WEPP. La ecuación de Yalin es:

$$q_{bf} = \left[ \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right] (\gamma_s - \gamma) D_{50} U_*^{0.635B} \left[ 1 - \frac{1}{\sigma} \ln(1 + \sigma) \right] \quad (6)$$

Donde:  $\sigma = AB$ ;  $B = \frac{Y_m}{Y_{cr}} - 1$  (Arrastre de fondo

ocurre si  $B > 1.0$ );  $A = 2.45 \left[ \frac{\rho_s}{\rho} \right]^{-2/5} Y_{cr}^{1/2}$

$$Y_m = \frac{\rho U_*^2}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}}; Y_{cr} = \int \left[ \frac{U_* D_{50}}{\nu} \right] y$$

$$U_* = (gRS)^{1/2}$$

Donde:  $U_+$  = velocidad cortante del flujo ( $L T^{-1}$ );  $A$  = función específica adimensional;  $B$  = factor adimensional del exceso de esfuerzo cortante;  $Y_m$ ,  $Y_{cr}$  = número de movilidad (adimensional) y función de Shields;  $\nu$  = viscosidad cinemática ( $L^2 T^{-1}$ ).

El gasto total del sedimento de fondo que pasa a través de la sección transversal es:

$$Q_{bm} = q_{bf} \left[ \frac{1}{g} \right]^w \quad (7)$$

Las principales asunciones de la ecuación de Yalin son: (1) El transporte de material no consolidado ocurre en la vecindad de un lecho plano e irregular. (2) Al exceder el esfuerzo crítico cortante, se inicia el movimiento de sedimento sobre un lecho plano no consolidado. (3) El inicio del movimiento es debido a una fuerza ascendente, por lo tanto, la partícula se desplaza por medio de saltos. (4) La tasa de transporte es una función del desplazamiento promedio de una partícula que avanza saltando. (5) La magnitud del cociente: fuerza-ascendente/(peso-de-una-partícula-inmersa) decrece exponencialmente con la relación: distancia/(tamaño-de-partícula). (6) Los coeficientes del esfuerzo hidráulico y de la fuerza ascendente son constantes. (7) Como el efecto del tirante sobre el arrastre de fondo es nulo, este modelo puede usarse para escurrimientos superficiales.

### Ecuación de Parker *et al.*

La ecuación de Parker *et al.* (1982) es una de las pocas ecuaciones desarrolladas a partir de mediciones hechas en corrientes naturales con lecho de grava. En su desarrollo se usó el análisis de similitud. Esta ecuación asume que todos los tamaños de partículas inician, de manera simultánea, su movimiento cuando una condición crítica de disturbio o colapso de la cama del cauce (pavimento) es excedida. Evidencias experimentales y de campo apoyan este concepto de movilidad uniforme (Andrews, 1983). La ecuación de Parker *et al.* predice el arrastre de fondo para condiciones de cuasi-equilibrio, en corrientes con fondo no consolidado, de tamaño medio, de pendiente moderada y con presencia de grava, pero sin acumulaciones importantes de arena en el fondo del cauce (Parker, 1990). La ecuación de Parker *et al.* asume la forma:

$$q_{bm} = \rho_s \frac{W^* g^{0.5} [dS]^{1.5}}{\left[ \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right]} \quad (8)$$

Donde:  $W^*$  (parámetro) =

$$0.0025 \exp \left[ 14.2(\Phi_{50} - 1) - 9.28(\Phi_{50} - 1)^2 \right]$$

para  $0.95 < \Phi_{50} < 1.65$ , y

$$W^* = 11.2 \left[ 1 - \frac{0.822}{\Phi_{50}} \right]^{4.5} \quad \text{para } \Phi_{50} > 1.65;$$

$$\Phi_{50} = \frac{\tau_{50}^*}{0.0876} \quad \text{y} \quad \tau_{50}^* = \frac{\gamma d S}{(\gamma_s - \gamma) D_{50sub}}$$

Donde:  $D_{50sub}$  = mediana de la distribución de tamaño de partículas de la subsuperficie del lecho del cauce (L);  $\Phi_{50}$  = esfuerzo hidráulico normalizado para el tamaño de partícula  $D_{50sub}$ ;  $\tau_{50}^*$  = esfuerzo hidráulico adimensional para  $D_{50sub}$ .

La descarga del arrastre de fondo está dada por:

$$Q_{bm} = q_{bm} w \quad (9)$$

Entre las asunciones de la ecuación de Parker *et al.* figuran:

- (1) Todas las partículas de un cauce, finas y gruesas, de manera aproximada, son igualmente móviles al inicio de su desplazamiento y durante el proceso de transporte para un mismo valor de esfuerzo cortante.
- (2) La distribución del tamaño de partículas permanece constante durante ascensos en el gasto de la corriente.
- (3) Para un rango amplio de gastos está presente un pavimento formado con materiales granulares gruesos.
- (4) La descarga del arrastre de fondo es función de la mediana del tamaño de partículas de la subsuperficie del lecho.
- (5) El esfuerzo crítico de Shields (0.06) no representa un buen parámetro de la condición de umbral para el colapso del lecho de grava (pavimento).
- (6) La habilidad de la corriente, medida en términos del tamaño máximo de partícula que puede transportar, carece de significado en un contexto de arrastre cuasi-uniforme de partículas.
- (7) El concepto de cauce con pavimento formado por partículas gruesas es esencial en la formulación de la hipótesis de movilidad uniforme.

### Ecuación de Schoklitsch

Schoklitsch (1962) propuso una ecuación con base en estudios realizados en canales de aforo y datos de campo. Originalmente, esta ecuación se aplicó en

corrientes naturales con lecho de grava. De acuerdo con Bathurst *et al.* (1987), la ecuación de Schoklitsch predice razonablemente bien la descarga de sedimentos de fondo en corrientes naturales con suministro ilimitado de sedimentos; precisaron, además, que en corrientes con disponibilidad limitada de sedimentos, la ecuación debe aplicarse para cada clase de tamaño de partículas que arrastra la corriente. De las cinco ecuaciones analizadas, ésta no involucra de manera explícita el esfuerzo hidráulico y el tirante de la corriente. De acuerdo con Bagnold (1980), el no incluir cualquiera de estas variables, podría presentar desventajas para la aplicación de la ecuación de Schoklitsch, en particular, en cauces someros. La ecuación de Schoklitsch tiene la expresión:

$$q_{bv} = \frac{2.5}{\left[ \frac{\rho_s}{\rho} \right]} S^{3/2} [q - q_c] \quad (10)$$

Donde:  $q_{bv}$  = descarga de sedimentos de fondo expresada en volumen unitario ( $L^2T^{-1}$ );  $q$ ,  $q_c$  = gasto unitario y valor crítico de  $q$  para inicio de movimiento ( $L^3T^{-1}L^{-1}$ ), respectivamente; el valor crítico está definido por:

$$q_c = 0.26 \left[ \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right]^{5/3} \frac{D_{40}^{3/2}}{S^{7/6}}$$

Donde:  $D_{40}$  = tamaño de partícula tal que 40% son menores o iguales a ese tamaño (L).

La descarga del arrastre de fondo está dada por:

$$Q_{bm} = q_{bv} \frac{\gamma_s}{g} w \quad (11)$$

Entre las asunciones que fundamentan la ecuación de Schoklitsch figuran: (1) Un valor crítico de gasto unitario deberá excederse antes de que ocurra el inicio del desplazamiento del sedimento. (2) Existe un movimiento total del lecho no consolidado del cauce una vez que las condiciones críticas se han excedido. (3) El tirante y el esfuerzo hidráulico no guardan una relación directa con el arrastre de fondo, debido a que con frecuencia las condiciones críticas sólo son excedidas en una parte del canal natural. (4) Un tamaño efectivo de partícula no es suficiente para describir la variación de los tamaños de las partículas de sedimento y de su arrastre. (5) Las formas

presentes en el fondo del cauce no influyen en el proceso de transporte. (6) La fuerza de ascenso no es importante en el proceso de transporte.

## DISCUSIÓN

Las ecuaciones con fundamento en el esfuerzo hidráulico pueden dar grandes errores en la predicción, debido a que ignoran las fuerzas de ascenso (Meyer-Peter y Muller) o porque el valor crítico para iniciar el movimiento del sedimento es difícil de definir (Yalin). Tres de las cinco ecuaciones, las excepciones son Bagnold y Yalin, no incorporan el efecto de la viscosidad dinámica. Esta omisión puede afectar la predicción, en especial cuando existen aportes significativos de material de lavado ( $> 10\ 000\ \text{mg L}^{-1}$ ) en los cauces. Otra consideración es que ninguna de las ecuaciones incluye, de manera explícita, un parámetro relacionado con la magnitud del pavimento del cauce. Diversos estudios (Dietrich *et al.*, 1989; Gomez, 1991) muestran que, dependiendo de la magnitud del pavimento, éste aumenta la resistencia al movimiento y reduce las tasa de transporte de sedimentos. Por otra parte, todas las ecuaciones asumen una oferta ilimitada de sedimento para su transporte. Sin embargo, para el espectro de avenidas que ocurren en un cauce natural, las tasas de transporte no se pueden considerar ilimitadas porque cada segmento de un río o arroyo posee identidad hidráulica y sedimentológica, así como de factores exógenos que, de manera aleatoria, aportan sedimentos (Reid y Frostick, 1987).

En la literatura existe un gran número de estudios de evaluación de ecuaciones que comenzaron desde que DuBoys y Straub propusieran su fórmula (Straub, 1935; Woo *et al.*, 1990). Sin embargo, de acuerdo con Gomez y Church (1989), la mayoría de las evaluaciones han sido simples comparaciones entre valores observados y valores predichos. Como lo señalaron Yang y Wan (1991), no se indica información adicional sobre las condiciones hidráulicas y caracterizaciones de los sedimentos en las cuales se realizaron las mediciones de campo. Recientemente, Bravo-Espinosa *et al.* (2003) desarrollaron una metodología para identificar condiciones de transporte de fondo en cauces naturales y, a partir de esa clasificación, evaluaron las ecuaciones caracterizadas en el presente trabajo, considerando 22 ríos de los Estados Unidos de Norteamérica (USA); los autores usaron el coeficiente adimensional de desigualdad, basado en la raíz

cuadrada del cuadrado medio del error, para comparar el poder predictivo de los modelos. Identificaron tres condiciones de transporte de fondo: (a) condición limitada por la capacidad de transporte (TL), (b) limitada por disponibilidad de sedimento (SL), y (c) parcialmente limitada por la capacidad de transporte (PTL). Las ecuaciones de Meyer-Peter y Muller (1948), Schoklitsch (1962) y Parker *et al.* (1982) predijeron bien los valores observados en cauces con una condición TL, mientras que las ecuaciones de Bagnold (1980) y Schoklitsch (1962) predijeron bien para las condiciones PTL y SL, respectivamente. El Cuadro 1 presenta las principales variables del flujo, cauce y sedimento de una parte de las corrientes naturales utilizadas por Bravo-Espinosa (1999) y la ecuación o ecuaciones con mejor ajuste a los datos observados, indicado por un número en el paréntesis.

Existe consenso en que se carece de una ecuación o grupo de ecuaciones que sean apropiadas para describir las condiciones de transporte de fondo para la mayoría de las corrientes naturales.

Algunos estudios sugieren que las ecuaciones derivadas del concepto de potencia del caudal predicen razonablemente bien el gasto del arrastre de fondo en corrientes con fondo arenoso, sin embargo, la misma capacidad predictiva no se reconoce en corrientes naturales con dominio de gravas. Es claro que las corrientes naturales exhiben una amplia gama de regímenes de transporte de sedimentos. Por lo tanto, una forma satisfactoria de seleccionar una ecuación empírica debería involucrar: (a) el entendimiento de la estructura, variables y asunciones de la ecuación, (b) conocimiento del régimen de transporte de la corriente natural de interés, utilizando metodologías como la propuesta por Bravo-Espinosa *et al.* (2003), y (c) la especificación de condiciones en las cuales debe de usarse, así como las condiciones en las cuales no debería de usarse porque tiene un desempeño pobre. Esta propuesta reconoce la importancia de ligar la influencia geomorfológica de las principales fuentes de sedimento y sus factores de control, con los componentes sedimentológicos e hidráulicos en el esquema de predicción; y, además, sugiere evaluar las ecuaciones que predicen bien en una corriente con un régimen particular de transporte, en otra u otras corrientes, con régimen similar. En el futuro, el problema para la identificación de ecuaciones apropiadas tendrá que incluir un mayor conocimiento de las relaciones entre las áreas productoras de sedimento, con las áreas de

**Cuadro 1. Principales características de 12 ríos y la mejor ecuación que predijo los valores observados de la carga de fondo según el régimen del cauce.**

Río	Velocidad m s <sup>-1</sup>	Tirante m	Gasto m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Gradiente m m <sup>-1</sup>	Ancho m	D <sub>50</sub> mm
<b>Cauces TL</b>						
Selway (G,4) <sup>†</sup>	1.20-2.32	1.31-2.36	134.2-506.9	0.0016	85.5-92.5	0.60-1.10
Lochsa (G,4)	0.97-1.83	1.61-2.40	110.2-339.8	0.0019	70.6-77.4	0.38-2.16
Oak (G,4)	0.75-2.06	0.20-0.44	0.56-3.39	0.0097-0.0108	3.70	0.48-23.3
SF Salmon (G, 1)	0.51-1.47	0.89-1.98	13.7-105.0	0.0039	31.9-35.9	0.53-2.25
NF Toutle (G,1,5)	1.20-2.80	0.41-1.10	8.95-185.0	0.003-0.005	18.0-59.0	0.92-8.93
La Garita (G, 1)	0.34-1.10	0.19-0.45	0.37-3.00	0.0135	4.6-6.1	0.41-1.84
Chippewa D (S,1,2,5)	0.50-1.12	0.61-3.20	50.7-884.0	0.0003-0.0004	153.0-255.4	0.44-1.01
<b>Cauces PTL</b>						
Clearwater (G,2,5)	0.69-3.60	3.29-6.64	289.0-3512.0	0.00009-0.0007	125.0-149.0	0.36-61.0
Wisconsin M (S, 2,5)	0.49-1.20	0.71-3.40	86.90-1240.0	0.0002-0.0005	219.0-352.7	0.38-0.66
Toutle (G, 2,5)	0.79-3.10	0.37-2.30	12.0-592.0	0.001-0.005	17.5-70.0	0.48-19.6
<b>Cauces SL</b>						
Yampa (S, 2,5)	0.56-1.30	0.63-4.10	24.3-498.0	0.0005-0.0009	69.0-94.0	0.36-0.85
Chippewa P (S, 2,5)	0.45-0.90	0.75-1.80	70.0-399.0	0.0002-0.0006	171.0-277.0	0.43-0.60

<sup>†</sup> G = fondo material grueso; S = fondo arenoso; 1 = Meyer-Peter y Muller, 2 = Bagnold, 3 = Yalin, 4 = Parker *et al.*, 5 = Schoklitsch.

sedimentación y los procesos morfológicos *in situ* de los cauces naturales. Más aún, se requiere de una nueva generación de modelos estocásticos que reúnan, de manera explícita, consideraciones hidráulicas y las influencias geomorfológicas como son las fuentes y tasas de suministro de sedimentos.

### CONCLUSIONES

- Se caracterizaron y analizaron cinco ecuaciones empíricas para la predicción del transporte de fondo cuyos fundamentos se derivaron del esfuerzo hidráulico cortante (Meyer-Peter y Muller, 1948; Yalin, 1963), movilidad uniforme (Parker *et al.*, 1982), potencial del caudal (Bagnold, 1980) y gasto unitario (Schoklitsch, 1962). Se concluyó que las cinco ecuaciones asumen una oferta ilimitada de sedimentos en los cauces y que ninguna incluye parámetros relacionados con la magnitud del pavimento del cauce.

- El análisis sugiere que, al incluir el entendimiento del régimen de transporte de sedimentos en la predicción de la descarga de fondo, se mejora la aplicación de dichas ecuaciones.

- Los resultados del estudio determinaron que las ecuaciones de Parker *et al.* (1982), Schoklitsch (1962), y Meyer-Peter y Muller (1948) predicen bien los valores observados en cauces con una condición no limitada por la disponibilidad de sedimento, mientras que las de Bagnold (1980) y Schoklitsch

(1962) para una condición limitada por disponibilidad de sedimento.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del CONACYT (Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación: Modalidad Instalación).

### LITERATURA CITADA

- Alonso, C.V., W.H. Neibling y G.R. Foster. 1981. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 24(5): 1211-1220, 1226.
- Andrews, E.D. 1983. Entrainment of gravel from naturally sorted riverbed material. *Geol. Soc. Am. Bull.* 94: 1125-1231.
- Bagnold, R.A. 1973. The nature of saltation and of bed-load transport in water. *Proc. Royal Soc. London A332*: 473-504.
- Bagnold, R.A. 1980. An empirical correlation of bedload transport rates in flumes and natural rivers. *Proc. Royal Soc. London A372*: 453-473.
- Bathurst, J.C., W.H. Graf y H.H. Cao. 1987. Bedload discharge equations for steep mountain rivers. pp. 453-477. *In*: Thorne, C.R., J.C. Bathurst y R.D. Hey (eds.). *Sediment transport in gravel-bed rivers*. John Wiley, Chichester, UK.
- Bravo-Espinosa, M. 1999. Prediction of bedload discharge for alluvial channels. Ph.D. Dissertation. The University of Arizona, Tucson, AZ.
- Bravo-Espinosa, M., W. Osterkamp y V.L. Lopes. 2003. Bedload transport in alluvial channels. *J. Hydraulic Eng. ASCE* 129(10): 783-795.
- Carbonneau, P.E. y N.E. Bergeron. 2000. The effect of bedload transport on mean and turbulent flow properties. *Geomorphol.* 35(3-4): 267-278.

- Chang, H.H. 1988. Fluvial processes in river engineering. Wiley. New York.
- Dietrich, W.E., J.W. Kirchner, H. Ikeda y F. Iseya. 1989. Sediment supply and the development of coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature* 340: 2667-2689.
- Garde, R.J. y K.G. Ranga Raju. 1985. Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems. John Wiley. New York.
- Gomez, B. 1983. Temporal variations in bedload transport rates: The effect of progressive bed armoring. *Earth Surface Processes Landforms* 8: 41-54.
- Gomez, B. 1991. Bedload transport. *Earth-Sci. Rev.* 31: 89-132.
- Gomez, B. y M. Church. 1989. An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Res.* 25(6): 1161-1186.
- Graf, W.H. 1971. Hydraulics of sediment transport. McGraw-Hill. New York.
- Heymans, M.L.E. 1979. Metodología para evaluar los sedimentos gruesos en cinco microcuencas del Río San Bernardino, México. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Hu, C. y Y. Hui. 1996. Bed-load transport: I. Mechanical characteristics. *J. Hydraulic Eng.* 122(5): 245-254.
- Jiménez, B.E., H. Garduño y R. Domínguez. 1998. Water availability in Mexico considering quantity, quality, and uses. *J. Water Resources Planning Manage.* 124: 1-7.
- Lafren, J.M., L.J. Lane y G.R. Foster. 1991. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. *J. Soil Water Conserv.* 46: 34-38.
- Lane, S.N., K.S. Richards y J.H. Chandler. 1996. Discharge and sediment supply controls on erosion and deposition in a dynamic alluvial channel. *Geomorphol.* 15: 1-15
- Leopold, L.B. 1992. Sediment size that determines channel morphology. pp. 297-307. *In: Billi, P., R.D. Hey, C.R. Thorne y P. Tacconi (eds.). Dynamics of gravel-bed rivers.* John Wiley. Chichester, UK.
- Leopold, L.B. 1994. A View of the River. Harvard University Press. Cambridge, MA.
- Martínez, M.M. y V.J. Fernández. 1983. Jerarquización de acciones de conservación de suelos a partir de cuencas hidrológicas. Manuscrito. Dirección General de Conservación de Suelo y Agua-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. D.F.
- Meyer-Peter, E. y R. Muller. 1948. Formulas for bed-load transport. International Association for Hydraulic Structures Research. Report of Second Meeting. Stockholm, Sweden.
- Naden, P.S. 1988. Models of sediment transport in natural streams. pp. 217-258. *In: Anderson, M.G. (ed.). Modelling geomorphological systems.* John Wiley. Chichester, UK.
- Oliver, B.G. y M.N. Charlton. 1984. Chlorinated organic contaminants on settling particulates in the Niagara River vicinity of Lake Ontario. *Environ. Sci. Techn.* 18(12): 903-908.
- Osterkamp, W.R. y T.J. Toy. 1997. Geomorphic considerations for erosion prediction. *Environ. Geol.* 29(374): 152-157.
- Parker, G.P. 1990. Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. *J. Hydraulic Res.* 28(4): 417-436.
- Parker, G., P.C. Klingeman y D.G. McLean. 1982. Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. Proc. of the American Society of Civil Engineers. J. Hydraulics Division 108(HY4): 544-571.
- Pitlick, J.C. 1988. Variability of bed load measurement. *Water Resources Res.* 24: 173-177.
- Reid, I. y L.E. Frostick. 1987. Toward a better understanding of bedload transport. pp. 13-19. *In: Ethridge, F.G. (ed.). Recent developments in fluvial sedimentology.* Special Publication 39. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Tulsa, OK.
- Reid, I. y L.E. Frostick. 1994. Fluvial sediment transport and deposition. pp. 89-155. *In: Pye, K. (ed.). Sediment transport and depositional processes.* Blackwell. Oxford, UK.
- Reid, L.M. y T. Dunne. 1996. Rapid evaluation of sediment budgets. Catena Verlag. Reiskirchen, Germany.
- Schoklitsch, A. 1962. Handbuch des Wasserbaues. Vol. 1. Springer-Verlag. Vienna, Austria.
- Shen, H.W. y H.F. Cheong. 1978. Stochastic sediment bedload models. pp. 10.1-10.21. *In: Shen, H.W. y H. Kikkawa (eds.). Application of stochastic processes in sediment transport.* Water Resources Publications. Littleton, CO.
- Simons, D.B. y F. Senturk. 1992. Sediment transport technology: Water and sediment dynamics. Water Resources Publications. Littleton, CO.
- Wiberg, P.L. y J.D. Smith. 1985. A theoretical model for saltating grains in water. *J. Geophysics Res.* 90(C4): 7341-7354.
- Williams, G.P. 1970. Flume width and water depth effects in sediment-transport experiments. Professional Paper 562. US Geological Survey. US Government Printing Office. Washington, DC.
- Woolhiser, D.A. y D.L. Brakensiek. 1982. Hydrologic modeling of small watersheds. pp. 1-16. *In: Haan, C.T., H.P. Johnson y D.L. Brakensiek (eds.). Hydrologic modeling of small watersheds.* Monograph 5. American Society of Agricultural Engineering. St. Joseph, MI.
- Yalin, M.S. 1963. An expression for bed bed-load transportation. Proc. of the American Society of Civil Engineers. J. Hydraulics Division 89(HY3): 221-250.
- Yalin, M.S. 1972. Mechanics of sediment transport. Pergamon. Oxford, UK.
- Yang, C.T. 1996. Sediment transport: Theory and practice. McGraw-Hill. New York, NY.
- Yang, C.T. y S. Wan, 1991. Comparisons of selected bed material load formulas. American Society of Civil Engineers. *J. Hydraulic Eng.* 117(8): 973-989.



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

Álvarez Sánchez, Ma. Edna	Chapingo, estado de México
Ayala Orduño, José Luis	Chapingo, estado de México
Barrales Domínguez, Sergio	Chapingo, estado de México
Bullón Ames, Juan	Chillán, Chile
Coras Merino, Pablo M.	Chapingo, estado de México
Corlay Chee, Langen	Chapingo, estado de México
De la Torre Almaráz, Rodolfo	México, D.F.
Estrada Avalos, Juan	Ciudad Lerdo, Durango, México
Estrada Berg W., Juan	Chapingo, estado de México
Flores Román, David	México, D.F.
Gama Castro, Jorge E.	México, D.F.
García Herrera, Gabriel	Montréal, Québec, Canadá
García Pérez, Rafael	Chapingo, estado de México
Geissen, Violette	Villahermosa, Tabasco, México
Gómez Cruz, Manuel Ángel	Chapingo, estado de México
González, Norma Susana	Balcarce, Argentina
Hidalgo Moreno, Claudia	Montecillo, estado de México
López Alcocer, Eduardo	Guadalajara, Jalisco, México
López Martínez, José D.	Ciudad Lerdo, Durango, México
Luzio Leighton, Walter	Santiago, Chile
Morrás, Héctor J.M.	Castelar, Argentina
Núñez Escobar, Roberto	Montecillo, estado de México
Olivares Rodríguez, Felipe	Montecillo, estado de México
Oroña Castillo, Ignacio	Toreón, Coahuila, México
Ortega Escobar, Manuel	Montecillo, estado de México
Palma López, David J.	H. Cárdenas, Tabasco, México
Pérez-Zamora, Octavio	Colima, Colima, México
Prat, Christian	Montpellier, Francia
Sánchez Carpintero, Ignacio	Pamplona, España
Sánchez Cohen, Ignacio	Ciudad Lerdo, Durango, México
Segura Castruita, Miguel A.	Torreón, Coahuila, México
Tijerina Chávez, Leonardo	Montecillo, estado de México
Tiscareño López, Mario	Aguascalientes, Aguascalientes, México
Vázquez Alarcón, Antonio	Chapingo, estado de México
Zárate Valdez, José Luis	Ciudad Obregón, Sonora, México
Zavaleta Mejía, Emma	Montecillo, estado de México

**Editores Técnicos de este número**  
**Technical Editors of this number**

Acevedo Sandoval, Otilio Arturo	Pachuca, Hidalgo, México
Alvarado López, Jorge	Montecillo, estado de México
Coras Merino, Pablo M.	Chapingo, estado de México
Corlay Chee, Langen	Chapingo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
Estrada Avalos, Juan	Ciudad Lerdo, Durango, México
González Chávez, Ma. del Carmen	Montecillo, estado de México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
Rodríguez Mendoza, Ma. Nieves	Montecillo, estado de México
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México



# TERRA *Latinoamericana*

## FORMATO PARA LA SUSCRIPCIÓN ELECTRÓNICA A LA REVISTA TERRA *Latinoamericana*

Para el envío de todos los números de un año (a partir de 2003), el costo de suscripción electrónica es de \$200.00 pesos o su equivalente en dólares.

### a) Pago con de tarjeta de crédito

Envíe su solicitud con los siguientes datos:

Nombre: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

Numero de tarjeta: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_ Monto (pesos): \_\_\_\_\_

Ciudad: \_\_\_\_\_ Estado: \_\_\_\_\_

País: \_\_\_\_\_ e-mail<sup>1</sup>: \_\_\_\_\_

Teléfono: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_

<sup>1</sup> A esta dirección le enviaremos su pedido.

### b) Pago con deposito en la cuenta de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

Usted deberá depositar el monto correspondiente en la cuenta bancaria que se describe a continuación y enviar el comprobante del deposito por fax o por correo electrónico.

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.  
Cuenta 044 657115  
BBVA-Bancomer Plaza 001, sucursal 3441  
Texcoco, Estado de México

Universidad Autónoma Chapingo Departamento  
de Suelos  
km 38.5 Carr. México -Texcoco Chapingo, Méx.  
Apartado Postal 45 y Código Postal 56230  
Tel. y Fax: 01 595 95 2 17 21  
e-mail: [terra@correo.chapingo.mx](mailto:terra@correo.chapingo.mx)



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS



FRUTICULTURA

FISIOLOGÍA VEGETAL



## EL INSTITUTO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD



GANADERÍA

**OFRECE** sus Programas de Maestría en Ciencias de alto nivel nacional y de Doctorado en Ciencias competente a nivel internacional en Recursos Genéticos y Productividad reconocidos por el Padrón Nacional de Posgrado del CONACYT.



GENÉTICA



SEMILLAS

INFORMES:

PÁGINA ELECTRÓNICA: [www.colpos.mx](http://www.colpos.mx)

DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ACADÉMICOS

TEL: 01(55)58 04 59 29, 01(595)952 02 29

FAX: 01(595)952 02 30

CORREO ELECTRÓNICO: [servacad@colpos.mx](mailto:servacad@colpos.mx)

SUBDIRECCIÓN DEL INSTITUTO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

TEL: 01(55)58 04 59 72

01(595)952 02 72

CORREO ELECTRÓNICO: [subirgpp@colpos.mx](mailto:subirgpp@colpos.mx)

DISÑO: Miguel Ángel



CONACYT

# IREGEP