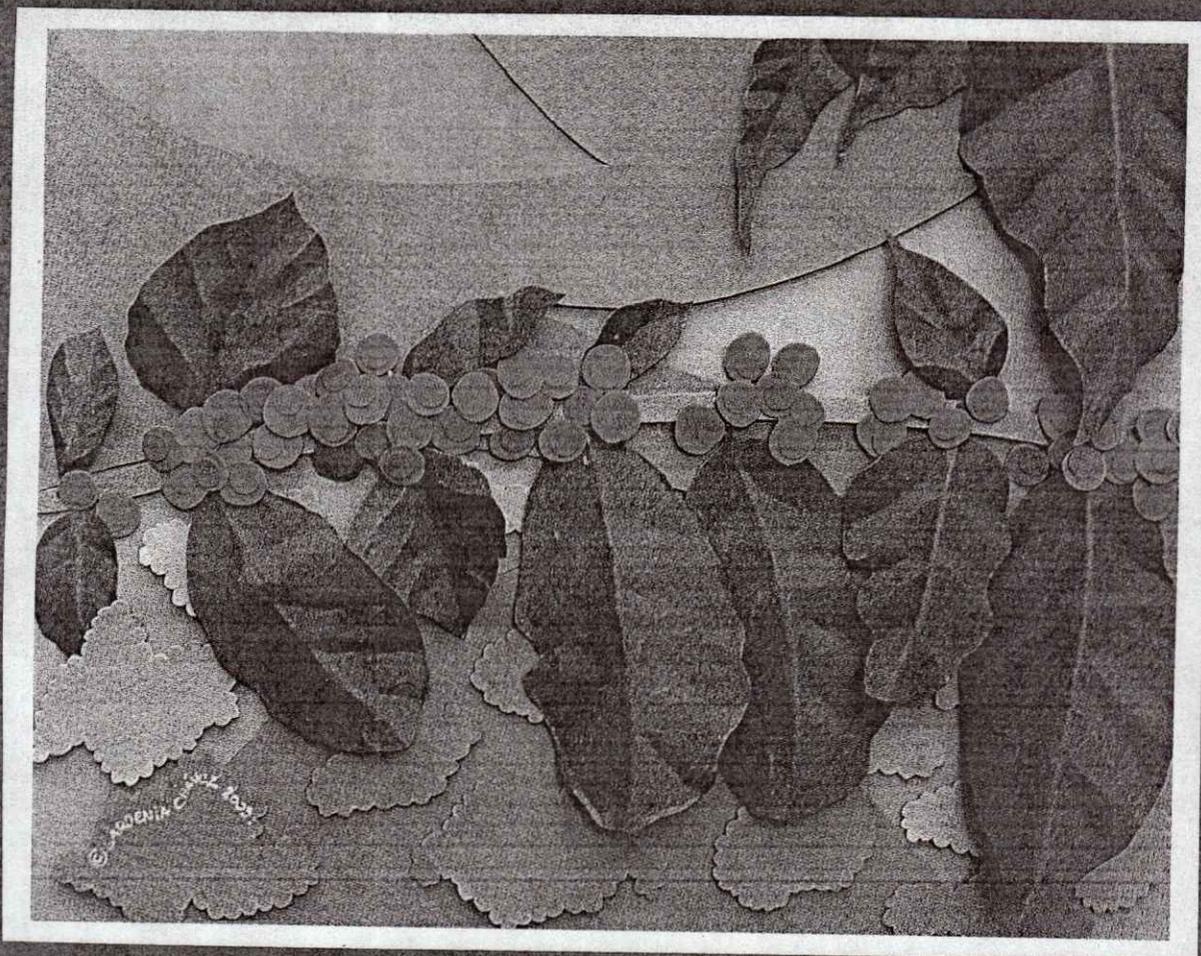


ISSN 0187-5779

# TERRA

*Latinoamericana*

ABRIL – JUNIO DE 2004 • VOLUMEN 22 • NÚMERO 2



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

# TERRA

*Latinoamericana*

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

## **MESA DIRECTIVA 2003-2005**

Presidente

Vicopresidente

Secretario General

Tesorero

Secretario Técnico

Secretaría de Relaciones Internacionales

Vocales

**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**

**Dr. Juan Pedro Flores Marges**

**Dra. Claudia Hidalgo Moreno**

**Dr. David Cristóbal Acevedo**

**M.C. Yolanda L. Fernández Pavía**

**M.C. Laura B. Reyes Sánchez**

## **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.  
Abril - Junio de 2004 Volumen 21 Número 2  
**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	Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez
Vicepresident	Dr. José A. Cueto Wong
Secretary	Ing. Andrés Espinosa Carmona
Treasurer	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Technical Adviser	Dr. Enrique Salazar Sosa
International Relations	Dr. Rogelio Juárez González
Voters	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  
April - June, 2004 Volume 22 Num. 2

**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*

## COMITE EDITORIAL

EDITOR	Dr. Antonio Vázquez Alarcón
EDITOR ADJUNTO	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
EDITORES TECNICOS	Dr. David Cristóbal Acevedo
	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

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

Diseño de portada

---

### 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. Alberto Hernández	Cuba
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. José Rodríguez	Chile
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Bernardo Van Raij	Brasil
Dr. Rafael Villegas Delgado	Cuba
Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. Ramón A. Rossell	Argentina
Dr. Daniel Buschiazio E.	Argentina

# TERRA

*Latinoamericana*

## EDITORIAL COMMITTEE

EDITOR	Dr. Antonio Vázquez Alarcón
ASSOCIATE EDITOR	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
TECHNICAL EDITORS	Dr. David Cristóbal Acevedo
	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. Alberto Hernández	Cuba
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. José Rodríguez	Chile
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. Ramón A. Rossell	Argentina
Dr. Daniel Buschiazzo E.	Argentina

# TERRA

*Latinoamericana*

ABRIL - JUNIO DE 2004 • VOLUMEN 22 • NUMERO 2  
APRIL - JUNE, 2004 • VOLUME 22 • NUMBER 2

## DIVISION I

- 135** Localización de suelos de humedad residual a partir de imágenes de satélite: Parte 2. Factores que influyen en su reflectancia y clasificación supervisada con los procedimientos: Mínima distancia y máxima verisimilitud.  
Location of residual moisture soils using satellite images: Part 2. Factors that affect its reflectance and supervised classification of the image with minimum distance and maximum likelihood procedures.  
*Miguel A. Segura-Castruita, Carlos A. Ortiz-Solorio y Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena*
- 143** Mineralogía, petrografía y micromorfología de horizontes árgicos endurecidos en Luvisoles.  
Mineralogy, petrography, and micromorphology of hardpans in Luvisol.  
*Otilio Acevedo-Sandoval, Enrique Ortiz-Hernández, Misael Cruz-Sánchez, Enrique Cruz-Chávez y Kinardo Flores-Castro*
- 153** Micromorfología en la clasificación de Histosoles en humedades de Tabasco, México.  
Micromorphology in the classification of Histosols in wetlands of Tabasco, Mexico.  
*Elvia Moreno-Cáliz, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena, Armando Guerrero-Peña, Carlos A. Ortiz-Solorio y David J. Palma-López*
- 161** Sistema integral de simulación de fuerzas aplicado al desarrollo de herramientas de labranza de conservación.  
Integrated system of force simulation for the development of conservation tillage implements.  
*Santos Gabriel Campos-Magaña, Martín Cadena-Zapata, Sergio Jácome-Maldonado, Antonio Reynolds-Chávez y Sergio Uribe-Gómez*
- 169** Efecto del metasilicato de sodio sobre el crecimiento del cultivo de chícharo.  
Effect of sodium metasilicate on the growth of cultivated pea.  
*Benjamín Miramontes-Flores, León Arroyo-Vázquez, Mario H. Alva-Reséndiz y Tiburcio Espiricueta-Reyna*

## DIVISION II

- 175 Fertirrigación nitrogenada, fosfórica y programa de riego y sus efectos en melón y suelo.  
Nitrogenous, phosphoric fertigation and watering program and its effect on melon and soil.  
*Pablo Preciado-Rangel, Gustavo A. Baca-Castillo,  
J. Luis Tirado-Torres, Josué Kohashi-Shibata,  
Leonardo Tijerina-Chávez y Angel Martínez-Garza*
- 187 Salinidad sódica en el desarrollo vegetativo y reproductivo del pimiento.  
Salinity on vegetative and reproductive growth of pepper.  
*J. J. Muñoz-Ramos, M. Guzmán y J. Z. Castellanos*
- 197 Impacto de la fumigación con bromuro de metilo en tipos morfológicos de amebas desnudas de un suelo agrícola.  
Impact of methyl bromide fumigation on morphological types of naked amoebae in an agricultural soil.  
*Salvador Rodríguez-Zaragoza, Ivonne Dorantes,  
Joel Velasco-Velasco y Ronald Ferrera-Cerrato*
- 207 Promoción del crecimiento en vivero de *Casuarina equisetifolia* (L.) por microorganismos simbioses.  
Promotion of *Casuarina equisetifolia* (L.) growth in the nursery by symbiotic microorganisms.  
*María Valdés, Abel Cayetano Rodrigo, Marco A. Leyva y  
Alejandro D. Camacho*
- 217 Caracterización del mercado de los derechos de agua en distritos de riego.  
Characterization of the water rights market in irrigation districts.  
*Enrique Rubiños-Panta, Enrique Palacios-Vélez,  
Miguel Angel Martínez-Damián, Ramón Valdivia-Alcalá y  
Elizabeth Hernández-Acosta*

**ENSAYO / Essay**

- 225** Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas con gramíneas:  
Una revisión.  
Plant growth-promoting bacteria in association with graminaceous  
species: A review.  
*C. Loredó-Osti, L. López-Reyes y D. Espinosa-Victoria*

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

241

# LOCALIZACIÓN DE SUELOS DE HUMEDAD RESIDUAL A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE: Parte 2. Factores que Influyen en su Reflectancia y Clasificación Supervisada con los Procedimientos: Mínima Distancia y Máxima Verisimilitud

Location of Residual Moisture Soils Using Satellite Images: Part 2. Factors that Affect its Reflectance and Supervised Classification of the Image with Minimum Distance and Maximum Likelihood Procedures

Miguel A. Segura-Castruita<sup>1‡</sup>, Carlos A. Ortiz-Solorio<sup>1</sup> y  
Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena<sup>1</sup>

## RESUMEN

Los suelos de humedad residual (SHR) cuentan con una firma espectral específica que permite obtener su mapa de localización por medio de una clasificación supervisada con el método del paralelepípedo, con 70% de confiabilidad; no obstante, se desconocen los factores que influyen en su reflectancia y si la eficiencia cartográfica se puede incrementar con otras metodologías. Diferentes características del suelo, como la arcilla y la materia orgánica, están relacionadas con su capacidad de retención de humedad, las que a su vez determinan su reflectancia; sin embargo los SHR se formaron a partir de piedra pómez y retienen humedad, lo cual permite suponer que este material parental, además, la arcilla y la materia orgánica, son responsables de su firma espectral. Los objetivos de esta investigación fueron establecer los factores que influyen en la reflectancia de los SHR y realizar una clasificación supervisada con los procedimientos de la mínima distancia, MINDIST y máxima verisimilitud, MAXLIKE del SIG Idrisi®, con el fin de mejorar la calidad del mapa de localización de estos suelos. Se analizaron física y químicamente muestras de los SHR del valle Puebla-Tlaxcala y Chalco. Los resultados obtenidos muestran que la pedregosidad de origen pomáceo de los SHR es la responsable de su reflectancia debido a su composición química. El mapa de localización de los suelos de humedad residual obtenido con el clasificador MINDIST mejoró su confiabilidad a 85%.

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

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

Recibido: Noviembre de 2001. Aceptado: Agosto de 2003.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 135-142.

*Palabras clave:* Pómez, clasificación supervisada, MINDIST, MAXLIKE.

## SUMMARY

Residual moisture soils (RMS) have a specific spectral signature that permits the construction of their location maps, with a supervised classification image and parallelepiped procedure, with a reliability of 70%. Nevertheless, the factors that affect its reflectance are not known, nor whether the percentage of cartographic reliability will be increased with other classification methodologies. Soil characteristics, such as clay and organic matter, are related to its water-holding capacity and, in turn, determine its reflectance. RMS originated from pumice, and they retain water; this leads us to hypothesize that the presence of this material, besides clay and organic matter, is responsible for its reflectance. The objectives of this study were to establish factors that affect the reflectance of RMS and to carry out a supervised classification with the tools both MINDIST (minimum distance) and MAXLIKE (maximum likelihood) of GIS Idrisi®, to improve its map location. Soil samples of RMS from Puebla-Tlaxcala and Chalco valley were analyzed in laboratory. The results show that pumice is responsible for reflectance of RMS because of its chemical components. The location map of RMS obtained with MINDIST classifiers has a reliability of 85%.

*Index words:* Pumice, supervised classification, MINDIST, MAXLIKE.

## INTRODUCCIÓN

Los suelos de humedad residual (SHR) presentan texturas gruesas, tienen la capacidad de almacenar agua mucho más alta que los suelos arenosos y son productivos (Segura *et al.*, 2003); características que les confieren importancia agrícola y económica en áreas con agricultura de secano del valle Puebla-Tlaxcala y Valle de Chalco, ya que el rendimiento de maíz en grano que alcanzan es de al menos 4.0 t ha<sup>-1</sup> (Díaz *et al.*, 1999).

Segura *et al.* (2003) encontraron que los SHR se ubican en laderas y valles cercanos a los volcanes cuya distribución geográfica se determinó mediante una clasificación automática supervisada (clasificador PIPED del SIG Idrisi®) de una imagen de satélite Landsat 5-MSS, debido a que tienen una reflectancia específica. Más aún, estos autores mencionaron que el mapa generado con esta metodología tiene 70% de confiabilidad y plantearon como hipótesis que el resultado puede mejorarse si se realiza una clasificación supervisada con otros procedimientos. Aun cuando lograron establecer la distribución geográfica de los SHR con base en su reflectancia, no explican los factores o propiedades de estos suelos que intervienen en su firma espectral durante el período seco del año.

Se ha reportado que el porcentaje de arena y la concentración de sales tienen una relación directamente proporcional con la reflectancia del suelo, mientras que el contenido de humedad, la materia orgánica y la arcilla mantienen una relación inversa (Swain y Davis, 1978), lo que significa que su identificación a través del uso de imágenes de satélite es factible (Stoner y Baumgardner, 1981).

Además, se encontró que la reflectancia es afectada por la mineralogía del suelo y que, al relacionarla con el contenido de materia orgánica en diferentes suelos, permite su caracterización y separación (Dematte y García, 1999).

De acuerdo con Tanaka (1985) y Hamblin (1991), el contenido de humedad en diferentes suelos está relacionado directamente con la cantidad de arcilla y materia orgánica que presenten. Sin embargo, la presencia de piedra pómez altamente intemperizada también tiene influencia en la capacidad de retención de humedad de los suelos, debido a la presencia de alófono y ferrihidrita (Gamma-Castro *et al.*, 2000).

Los SHR se han formado a partir de piedra pómez (CIMMYT, 1974; Werner, 1978), lo que hace suponer que este material está relacionado con su capacidad de

retención de humedad y, por lo tanto, determina la reflectancia de los SHR, información que es necesario confirmar con datos de campo y de laboratorio. Por tal motivo, los objetivos de la presente investigación fueron establecer los factores que influyen en la reflectancia de los suelos de humedad residual y realizar una clasificación supervisada con otros procedimientos de clasificación con el fin de mejorar el mapa de localización de estos suelos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la porción sur-este del estado de México y oeste del estado de Puebla, entre los paralelos 18° 52' 05.4" y 19° 24' 51.6" N y los meridianos 98° 13' y 99° 08' 12.6" O, con una altitud que fluctúa de 2240 a 2350 m.

### Metodología

Para establecer los factores que influyen en la reflectancia de los SHR, se hizo un muestreo en los mismos sitios de entrenamiento empleados por Segura *et al.* (2003), que se reportan en el Cuadro 1; con el fin de determinar las características físicas y químicas de los suelos. Asimismo, para llevar a cabo las nuevas clasificaciones supervisadas, se volvieron a utilizar la ubicación de estos sitios y la misma imagen de satélite con el objeto de realizar el estudio en las mismas condiciones, para hacer posible la comparación de resultados; como se detalla a continuación.

**Trabajo de campo y laboratorio.** Se colectaron cinco muestras de suelo de 0 a 30 cm de profundidad en cada sitio, con un muestreo en zigzag; posteriormente, se mezclaron y se obtuvo una muestra compuesta. Se realizaron las siguientes determinaciones: análisis mecánico (textura), pedregosidad, materia orgánica y humedad gravimétrica (humedad de campo), con las metodologías reportadas en el Manual de Procedimientos para el Análisis de Suelos del ISRIC (Van Reeuwijk, 1995).

**Análisis de la imagen de satélite.** La localización de los suelos de humedad residual se estudió por medio del análisis de una imagen de satélite, a través de una clasificación supervisada con las siguientes características:

1. Se trabajó con una imagen Landsat 5-MSS la cual tiene un tamaño real de 4059 columnas y 3833

renglones con un total de 1 626 508 píxeles. El tamaño del píxel es de 60 x 60 m y sus coordenadas UTM son: X mín. 364 200 y X máx. 607 680, Y mín. 19 684 800 y Y máx. 2 194 800. La escena se captó el 07 de marzo de 1989. Se eligió esta escena para verificar si los suelos retenían humedad en esa fecha y por ser gratuita.

2. La máscara digital se elaboró a través de un recorte de la imagen para incluir sólo al área de estudio, para lo que se utilizaron las coordenadas extremas de la misma; el proceso se realizó con el Sistema de Información Geográfico (SIG) Idrisi®.

3. Los sitios de entrenamiento de los SHR se delimitaron con los puntos de georreferencia que se obtuvieron en campo (Cuadro 1). Los puntos se ubicaron en el recorte de la imagen de satélite Landsat 5-MSS (área de estudio) para formar cuatro polígonos que constituyeron los sitios de entrenamiento (SE).

4. La imagen se procesó utilizando las bandas MSS 1, 2 y 5 (Bandas 2, 3 y 6 del Landsat-TM), debido a que discriminan la humedad del suelo (Campbell, 1996). A cada parcela se le asignó un nombre de identidad (firma) con la herramienta Makesig del SIG Idrisi®; posteriormente, se clasificó con el clasificador MINDIST (mínima distancia) que es la segunda rutina más rápida y con el clasificador MAXLIKE (máxima verosimilitud) principal clasificador del sistema (Eastman, 1999).

**Comprobación de resultados.** Para la verificación de los mapas de localización de SHR, se retomaron 20 píxeles, 10 para cada categoría clasificada (SHR y No SHR), los que fueron empleados por Segura *et al.* (2003), reportados en el Cuadro 2, y se procedió a realizar la misma comprobación de campo; por último, los valores predichos en gabinete se contrastaron con los recabados en campo, para conocer el porcentaje de aciertos.

**Cuadro 1.** Ubicación de los sitios de entrenamiento con suelos de humedad residual (a partir de Segura *et al.*, 2003).

SE <sup>†</sup>	Lugar	Coordenadas UTM <sup>‡</sup>
1	Llano Cálpan, Puebla	564971.1, 565210.0
		2113582.0, 2113343.0
2	San Andrés Calpán, Puebla	562631.1, 562871.1
		2114422.0, 2114182.0
3	San Juan Tianguismanalco Puebla	559332.4, 559571.9
		2100566.0, 2100326.0
4	Ayotzingo, Chalco Edo. de México	509184.3, 509424.2
		2125879.0, 2125639.0

<sup>†</sup> SE = Parcela de entrenamiento; <sup>‡</sup> UTM = Universal Transversa Mercator.

**Cuadro 2.** Ubicación de los píxeles utilizados en la comprobación de campo (a partir de Segura *et al.*, 2003).

CC <sup>†</sup>	Sitio	Columna	Renglón	Coordenadas UTM	
				X	Y
SHR	1	467	321	513709.0	2127812
	2	462	511	513387.5	2116424
	3	488	928	514960.1	2091396
	4	462	948	513434.9	2090079
	5	1041	986	548164.1	2087910
	6	1129	851	553447.4	2096050
	7	1214	951	558527.2	2090050
	8	1500	751	575706.5	2102030
	9	1358	506	567185.3	2116716
	10	1269	347	561799.2	2126296
No SHR	1	412	246	510449.1	2132353
	2	472	477	514008.9	2118492
	3	426	795	511271.4	2099284
	4	657	771	515153.8	2100728
	5	546	939	518453.1	2090620
	6	1274	505	562148.8	2116804
	7	1095	843	551476.4	2096396
	8	1362	726	567522.3	2103435
	9	1238	657	572570.4	2107691
	10	1079	813	559589.4	2129606

<sup>†</sup> CC = categoría clasificada, SHR = suelos de humedad residual, No SHR = no suelos de humedad residual

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades Físicas y Químicas de los SHR

Los suelos de los sitios de entrenamiento presentan las siguientes características físicas y químicas (Cuadro 3): contenido de arena que varían de 78 a 87%, humedad entre 1.63 y 2.56%, arcilla de 3.58 a 13.25% y materia orgánica de 0.59 a 1.17%. Esto significa que los suelos son arenosos con bajo contenido de arcilla, materia orgánica y que retienen poca humedad superficial.

**Cuadro 3.** Propiedades físicas y químicas de los suelos arenosos de humedad residual.

SE <sup>†</sup>	HUM <sub>CS</sub>	A <sub>CS</sub>	R <sub>CS</sub>	MO <sub>CS</sub>	Pd <sub>CS</sub>
----- % -----					
1	1.73	84.81	11.77	0.64	11.06
2	1.98	78.36	13.25	0.59	11.15
3	2.56	86.66	3.28	0.79	25.97
4	1.63	83.39	5.86	1.17	10.19

<sup>†</sup> SE: parcelas de entrenamiento, HUM<sub>CS</sub>: contenido de humedad de la capa superficial, A<sub>CS</sub>: contenido de arena de la capa superficial, R<sub>CS</sub>: contenido de arcilla de la capa superficial, MO<sub>CS</sub>: contenido de materia orgánica de la capa superficial, Pd<sub>CS</sub>: pedregosidad de la capa superficial.

**Cuadro 4. Relaciones entre los porcentajes de arcilla, arena, materia orgánica y pedregosidad con la humedad de la capa superficial de los SHR.**

Relaciones <sup>†</sup>	Ecuación	R <sup>2</sup>
% A <sub>cs</sub> vs. % HUM <sub>cs</sub>	% HUM <sub>cs</sub> = 0.0405 (% A <sub>cs</sub> ) - 1.4025	0.1198
% R <sub>cs</sub> vs. % HUM <sub>cs</sub>	% HUM <sub>cs</sub> = - 0.0433 (% R <sub>cs</sub> ) + 2.3442	0.2412
% MO <sub>cs</sub> vs. % HUM <sub>cs</sub>	% HUM <sub>cs</sub> = - 0.4613 (% MO <sub>cs</sub> ) + 2.3429	0.0844
% Pd <sub>cs</sub> vs. % HUM <sub>cs</sub>	% HUM <sub>cs</sub> = 0.0521 (% Pd <sub>cs</sub> ) + 1.2146	0.9019

<sup>†</sup>HUM<sub>cs</sub> = contenido de humedad de la capa superficial, A<sub>cs</sub> = contenido de arena de la capa superficial, R<sub>cs</sub> = contenido de arcilla de la capa superficial, MO<sub>cs</sub> = contenido de materia orgánica de la capa superficial, Pd<sub>cs</sub> = pedregosidad de la capa superficial.

De acuerdo con Tanaka (1985) y Hamblin (1991), la humedad está relacionada con algunas propiedades del suelo, como la cantidad de arcilla y la materia orgánica; sin embargo, en los SHR la relación entre estas propiedades resultó inversamente proporcional (Cuadro 4), mientras que el porcentaje de arena de estos suelos mostró una relación directa con la humedad. No obstante, la correlación entre estas propiedades es baja, lo que es indicativo de la poca influencia de la arcilla, arena y materia orgánica en el contenido de humedad.

Por otra parte, los SHR presentan porcentajes de pedregosidad de 10 a 26 (Cuadro 3), donde la piedra pómez es su principal componente (de 70 a 90%) y el resto se trata de basalto o andesita. Al relacionar la pedregosidad con el contenido de humedad de estos suelos (Cuadro 4), se obtuvo una relación directa (pendiente positiva). La retención de humedad en los suelos puede estar asociada con la morfología macro y microporosa de las partículas de la pómez no alterada o con un incipiente intemperismo por el bajo porcentaje de arcilla.

#### Relación entre los Valores de Reflectancia de los SHR y sus Propiedades Físicas y Químicas

Los intervalos de los valores de reflectancia (VR) de los píxeles dentro de los SE que se encontraron en cada banda (1, 2 y 5) de la imagen Landsat 5-MSS se reportan en el Cuadro 5.

Las variaciones que existen entre los límites de clase de los SE reflejan los diferentes contenidos de humedad que presenta el suelo superficial (Cuadro 6); por ejemplo, en las Bandas 1 y 2 disminuye la reflectancia conforme aumenta el contenido de humedad, como lo mencionaron Swain y Davis (1978). Sin embargo, el comportamiento de la Banda 5 es contrario; es decir, al aumentar el contenido de humedad del suelo aumenta la reflectancia. Campbell (1996) indicó que el agua tiene un alto índice de emisividad y que la Banda 5 lo capta debido a su intervalo de longitud de onda (10.4 µm a 12.6 µm).

Para establecer las relaciones entre los VR con las propiedades físicas y químicas de los suelos en estudio, se utilizaron los promedios de los VR y de las propiedades.

De acuerdo con Swain y Davis (1978), el contenido de arena del suelo, en general presenta una relación directamente proporcional con la reflectancia; mientras que la arcilla y la materia orgánica mantienen una relación inversa. Esta situación no se observa en los SHR, ya que la arena tiene una relación inversa a la reflectancia; en tanto que, para la arcilla y la materia orgánica, resulta directa. Sin embargo, la baja correlación que existe entre estas propiedades (Cuadro 7) indica que tienen poca o nula influencia en el comportamiento de la reflectancia. En cambio, el contenido de humedad sí influye sobre la reflectancia de los SHR (Figura 1).

**Cuadro 5. Rangos de valores de reflectancia de los sitios de entrenamiento de los suelos de humedad residual.**

SE <sup>†</sup>	Banda 1		Banda 2		Banda 5	
	LC <sup>‡</sup>	$\bar{x} \pm \sigma$ <sup>§</sup>	LC	$\bar{x} \pm \sigma$	LC	$\bar{x} \pm \sigma$
1	31-35	31-33	42-49	42-47	96-103	97-101
2	30-35	31-35	40-48	42-47	93-102	96-99
3	26-35	29-34	36-46	40-45	98-114	99-107
4	31-35	31-34	41-48	43-46	90-100	90-96

<sup>†</sup> SE = sitios de entrenamiento; <sup>‡</sup> LC = límite de clases; <sup>§</sup>  $\bar{x}$  = media;  $\sigma$  = desviación estándar.

**Cuadro 6. Contenido de humedad de la capa superficial de los suelos de humedad residual en los sitios de entrenamiento y su reflectancia promedio.**

SE	HUM <sub>CS</sub>	Banda 1	Banda 2	Banda 5
	%	Re	Re	Re
1	1.73	32.1875	44.5000	99.0000
2	1.98	32.0625	44.0625	96.5625
3	2.56	31.6875	42.4375	103.000
4	1.63	32.3125	44.5625	93.3125

SE = parcela de entrenamiento, HUM<sub>CS</sub> = contenido de humedad de la capa superficial Re = valor de reflectancia promedio.

Por otra parte, la pedregosidad es inversamente proporcional (pendiente negativa) a los VR de las Bandas 1 y 2, con una r<sup>2</sup> igual a 0.8907 y 0.9633, respectivamente (Cuadro 7); mientras que, con la Banda 5 presenta una relación directa. Esto significa que la piedra pómez en los SHR tiene influencia en su reflectancia por su capacidad de retener humedad.

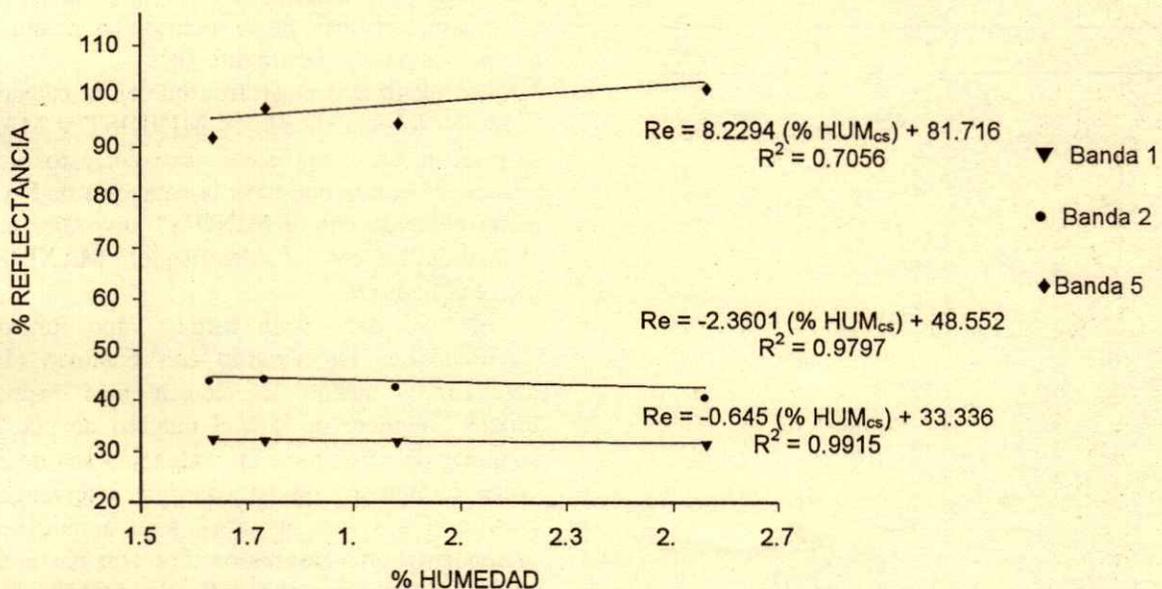
Sin embargo, las ciudades cercanas (México y Puebla) tuvieron los mismos VR que los suelos de humedad residual; como la escena se captó en la temporada seca (marzo), las ciudades no presentaban humedad, lo cual indica que la reflectancia en los SHR no es provocada por el agua retenida. Segura *et al.* (2003) explicaron que esto se debe a la composición química de sus principales materiales, pómez para los SHR y cemento para las ciudades,

donde domina el SiO<sub>2</sub>. Por otra parte, Dematte y García (1999) indicaron que la curva espectral de diferentes componentes del suelo (minerales y materia orgánica) se expresan mejor con la ausencia de la humedad. Por lo tanto, la composición química y mineralógica de la pómez de los SHR es la que influye en su reflectancia.

### Clasificación de la Imagen

Esta clasificación se realizó de dos formas: una con el clasificador MINDIST (mínima distancia) y otra con el MAXLIKE (máxima similitud).

Para utilizar el clasificador MINDIST se requiere informar al sistema si se utilizarán los valores de reflectancia (VR) crudos o de unidades de desviación estándar de VR (σ-VR), así como el definir la máxima distancia espectral a explorar que puede ser infinita o específica (Eastman, 1999). En el presente trabajo, se optó por utilizar las unidades de σ-VR, las cuales se obtuvieron al analizar las σ de los VR de cada uno de los SE en el área de estudio y para cada banda (Cuadro 8); mientras que la máxima distancia espectral a explorar (mde) es el promedio de las σ, aproximado al número entero inmediato, en este caso resultó de 2.



**Figura 1. Relación entre el porcentaje de humedad de los suelos de humedad residual y las reflectancias promedio de las Bandas 1, 2 y 5.**

**Cuadro 7. Resultados de las relaciones entre los porcentajes de arena, arcilla y materia orgánica con la reflectancia de las Bandas 1, 2 y 5.**

Relación <sup>†</sup>	Banda 1		Banda 2		Banda 5	
	Ecuación	R <sup>2</sup>	Ecuación	R <sup>2</sup>	Ecuación	R <sup>2</sup>
A <sub>cs</sub> vs. Re	Re=-0.0255(A <sub>cs</sub> )+34.36	0.0132	Re=-0.1215(A <sub>cs</sub> )+54.31	0.2005	Re=0.658(A <sub>cs</sub> )+43.15	0.3286
R <sub>cs</sub> vs. Re	Re=0.025(R <sub>cs</sub> )+31.84	0.1973	Re=0.1278(R <sub>cs</sub> )+41.36	0.3716	Re=-0.256(R <sub>cs</sub> )+100.16	0.0884
MO <sub>cs</sub> vs. Re	Re=0.253(MO <sub>cs</sub> )+31.82	0.2477	Re=0.5918(MO <sub>cs</sub> )+43.33	0.0996	Re=-4.98(MO <sub>cs</sub> )+102.63	0.4188
Pd <sub>cs</sub> vs Re	Re=-0.0335(Pd <sub>cs</sub> )+32.55	0.8908	Re=-0.1284(Pd <sub>cs</sub> )+45.76	0.9633	Re=0.4558(Pd <sub>cs</sub> )+91.32	0.7192

<sup>†</sup> A<sub>cs</sub> = contenido de arena de la capa superficial, R<sub>cs</sub> = contenido de arcilla de la capa superficial, MO<sub>cs</sub> = contenido de materia orgánica de la capa superficial, Re = reflectancia.

Después de clasificar la imagen, se obtuvo un mapa con dos categorías de clase; suelos de humedad residual (SHR) y otros suelos (No SHR) a la que se le adhirió una máscara de las ciudades del Distrito Federal y Puebla, y se obtuvo el mapa de localización de los SHR con el clasificador MINDIST (Figura 2).

El mapa muestra que los SHR se encuentran a los alrededores de la sierra Nevada y se concentran en los valles Puebla-Tlaxcala y Chalco.

Con el clasificador MAXLIKE, la firma o etiqueta de los SE se especificó por separado, aunque en este caso se trata de una sola, la de "los suelos de humedad residual" (SHR); además, la proporción de exclusión que se utilizó fue de 5%, debido a que, al emplear los porcentajes de 0 y 1, el número de píxeles que intervienen en la clasificación es mayor, por lo que se

**Cuadro 8. Desviación estándar de los sitios de entrenamiento.**

Banda	SE <sup>†</sup>	σ	σ <sub>p</sub>	mde
1	1	1.22	2.0025	
	2	2.46		
	3	2.70		
	4	1.63		
2	1	2.25	2.4475	
	2	2.99		
	3	2.92		
	4	1.63		
5	1	1.75	2.7150	
	2	2.09		
	3	4.13		
	4	2.89		
Total			7.1650	
Prom.			2.3883	2

<sup>†</sup> SE = sitio de entrenamiento; σ = desviación estándar; σ<sub>p</sub> = desviación estándar promedio; mde = máxima distancia espectral a explorar.

podría obtener un mapa con un mayor número de errores.

El mapa que se obtuvo con el MAXLIKE es similar al del clasificador MINDIST; sin embargo, existe un mayor número de píxeles que aparecen clasificados como SHR.

### Comprobación de los Resultados de la Clasificación de la Imagen de Satélite

Esta comprobación, como se mencionó anteriormente, se realizó en los sitios de campo seleccionados por Segura *et al.* (2003) (Figura 3).

Los SHR presentan texturas arenosas, tienen la capacidad de retención de humedad, su uso es agrícola con un sistema de producción de secano, tienen pendientes que fluctúan de 3 a 10% y presencia de piedra pómez de diferentes tamaños en la superficie. Sin embargo, los Sitios 7, 8 y 9, a pesar de presentar estas características, no se tomaron en cuenta debido a que presentan un manejo diferente.

Los resultados mostraron que en la categoría para SHR, en los clasificadores MINDIST y MAXLIKE, se tuvieron en campo siete sitios correctos y tres con errores. Mientras que para la categoría de No SHR, el mapa obtenido con el MINDIST tuvo diez aciertos y el elaborado con el clasificador MAXLIKE sólo nueve (Cuadro 9).

Esto se debe a la forma cómo funcionan los clasificadores. De acuerdo con Eastman (1999), el MAXLIKE, siendo la técnica más avanzada de Idrisi®, requiere de que el número de píxeles en el conjunto de datos para la evaluación sea de 50 a 100 veces el número de bandas que intervengan en la clasificación y que los sitios sean homogéneos, para producir mejores resultados. Por otra parte, el mismo autor mencionó que el clasificador MINDIST produce buenos resultados, aun cuando los sitios de entrenamiento sean pocos.

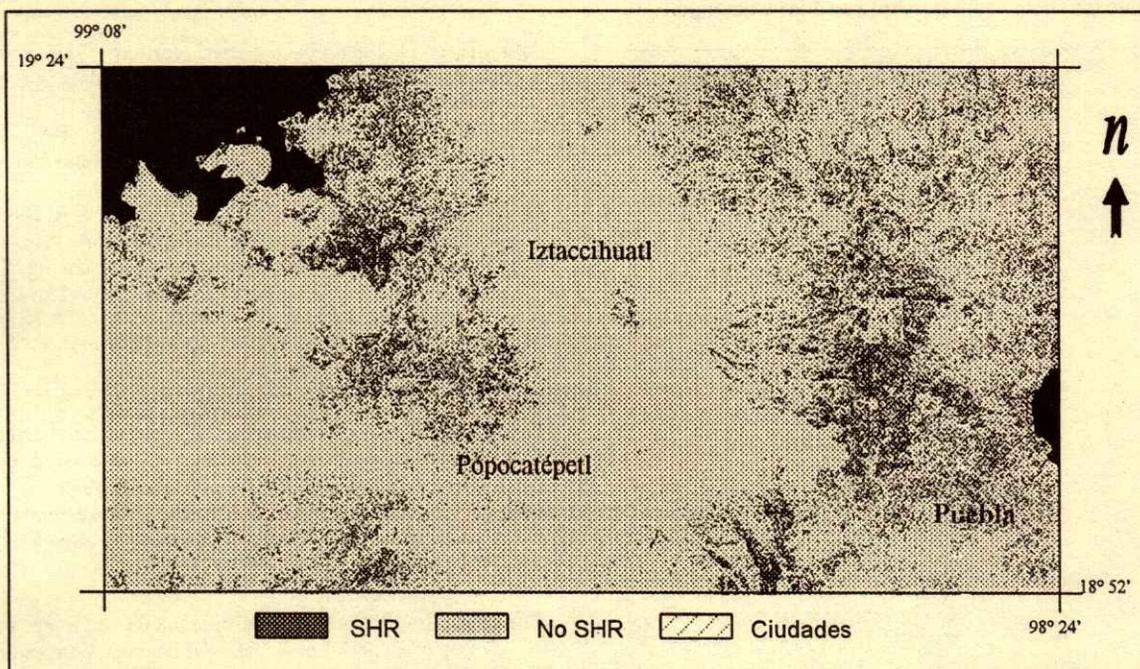


Figura 2. Localización de los Suelos de Humedad Residual con el clasificador MINDIST.

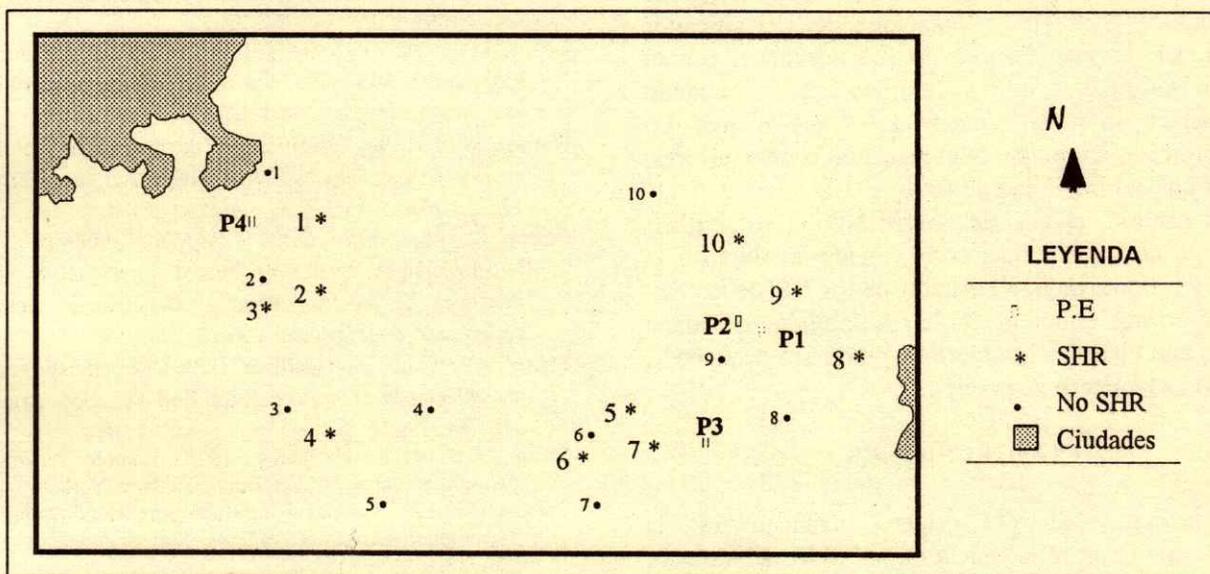


Figura 3. Ubicación de puntos de comprobación de sitios con SHR y No SHR (a partir Segura et al., 2003).

**Cuadro 9. Resultado de la corroboración de los mapas de localización de los suelos de humedad residual en campo.**

CC†	Sitio	MAXLIKE		MINDIST	
		acierto	error	acierto	error
SHR	1	x		x	
	2	x		x	
	3	x		x	
	4	x		x	
	5	x		x	
	6	x		x	
	7		x		x
	8		x		x
	9		x		x
	10	x		x	
No SHR	1	x		x	
	2	x		x	
	3	x		x	
	4	x		x	
	5	x		x	
	6	x		x	
	7	x		x	
	8	x		x	
	9	x		x	
	10		x		x
Total	20	16	4	17	3
% de confiabilidad		80		85	

† CC = categoría clasificada, SHR = suelos de humedad residual, No SHR = no suelos de humedad residual.

Con base en lo anterior y considerando los datos con los que se desarrollaron las clasificaciones, puede mencionarse que la utilización del clasificador MAXLIKE en este estudio no fue adecuado, por el número de píxeles que se empleó, de 64, cuando debieron ser un número mayor, 150 como mínimo. Lo cual produce un mapa que presenta cuatro errores, esto es una confiabilidad de 80%.

En cambio, el clasificador MINDIST, al utilizar un rango de valores más corto, donde involucra a la media y a la desviación estándar de los VR de los SE, elimina errores e incrementa la confiabilidad del mapa (85%), aun cuando el número de sitios sea pequeño y, por ende, el número de píxeles.

## CONCLUSIONES

- La pedregosidad de origen pomáceo es la responsable de la reflectancia de los SHR debido a su composición química y mineralógica más que a la humedad retenida.

- El mapa de localización de los suelos de humedad residual obtenido con el uso del clasificador mínima distancia (MINDIST) resultó el de mayor calidad (85% de confiabilidad).

## LITERATURA CITADA

- Agbu, P.A., D. Fehrenbacher e I.J. Jansen. 1989. Soil property relationships with SPOT satellite digital data in East Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54(3): 807-812.
- Agbu, P.A., D. Fehrenbacher e I.J. Jansen. 1990. Statistical comparison of SPOT spectral maps with field soil maps. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54(3): 812-818.
- Baumgardner, M.F., L.F. Silva, L.L. Biehl y E.R. Stoner. 1985. Reflectance properties of soils. *Adv. Agron.* 38: 1-44.
- Campbell, J.B. 1996. Introduction to remote sensing. Second ed. Virginia Polytechnic Institute and State University. The Guilford Press. New York.
- CIMMYT. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 1974. El Plan Puebla: Siete años de experiencia: 1967-1973. El Batán, Texcoco, México.
- Dematte M., J.A. y G.J. García. 1999. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 327-342.
- Díaz C., H., L. Jiménez S., R.J. Laird y A. Turrent F. 1999. El Plan Puebla 1967-1992. Análisis de una estrategia de desarrollo de la agricultura tradicional. Colegio de Postgraduados. México.
- Eastman, J.R. 1999. Idrisi 32. Guide to GIS and Image Processing. Volume 1. Clark Labs. Clark University. Worcester, MA.
- Frazier, B.F. y A.J. Bussaca. 1988. Soil patterns of the Palouse region as seen by Landsat Thematic Mapper. *Agron. Abstr.* 35: 256.
- Gamma-Castro, J.E., E. Sollerio-Rebolledo y E. Vallejo-Gómez. 2000. Weathered pumice influence on selected alluvial soil properties in West Nayarit, Mexico. *Soil Tillage Res.* 55: 143-165.
- Hamblin, A.P. 1991. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.* 38: 95-157.
- Lee, K.S., G. Lee y E. Tyler. 1988. Thematic mapper and digital elevation modeling of soil characteristics in hill terrain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1104-1107.
- Navone, S.M. 1998. Identificación de la erosión mediante el análisis de imágenes de satélite. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 13: 253-263.
- Segura C., M.A., C.A. Ortiz S. y M.C. Gutiérrez C. 2003. Localización de suelos de humedad residual a partir de imágenes de satélite. Parte I. Clasificación automática supervisada de la imagen. *Terra* 21: 149-156.
- Stoner, E.R. y M.F. Baumgardner. 1981. Characteristic variations on reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 1161-1165.
- Swain, P.H. y S.M. Davies. 1978. Remote sensing: The quantitative approach. McGraw-Hill. New York.
- Tanaka, D.L. 1985. Chemical and stubble-mulch fallow influences on seasonal soil water contents. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 728-733.
- Van Reeuwijk, L.P. 1995. Procedures for soil analysis. Tech. Pap. 9. 5<sup>th</sup> ed. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Werner, G. 1978. Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores (comentarios a un mapa de suelos). Suplemento Comunicaciones. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla, México.

# MINERALOGÍA, PETROGRAFÍA Y MICROMORFOLOGÍA DE HORIZONTES ÁRGICOS ENDURECIDOS EN LUVISOLES

## Mineralogy, Petrography, and Micromorphology of Hardpans in Luvisol

Otilio Acevedo-Sandoval<sup>1†</sup>, Enrique Ortiz-Hernández<sup>1</sup>, Misael Cruz-Sánchez<sup>1</sup>,  
Enrique Cruz-Chávez<sup>1</sup> y Kinardo Flores-Castro<sup>1</sup>

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la mineralogía, petrografía y micromorfología de horizontes árgicos endurecidos en luvisoles del estado de México por difracción de rayos X, microscopía petrográfica e incluyendo observaciones en microscopio electrónico de barrido (MEB). Los resultados indican que los rasgos micromorfológicos que predominan en los horizontes árgicos endurecidos son: modelo de distribución porfídica abierta, peds subangulares, que indica una reorganización de la masa basal; birrefringencia de poro y grano estriada, hiporevestimientos y rellenos de poros en forma de microláminas bien orientados y presencia de nódulos pseudomórficos de Fe-Mn. El estudio petrográfico indica que los fragmentos de cristales y rocas forman parte (y parcialmente corroídos, sobre todo en sus bordes) de una matriz vítrea poco soldada y devitrificada, alterada parcialmente a mezclas de minerales arcillosos (caolinita, haloisita) y cuarzo microcristalino. La fracción arcillosa que predomina es caolinita y haloisita, además de un polimorfo de sílice en menor proporción, lo que indica un alto grado de meteorización y una avanzada evolución pedogenética.

**Palabras clave:** *Caolinita, revestimientos, tepetate, alteración.*

### SUMMARY

The objective of this study is to investigate the mineralogic, petrographic, and micromorphologic features of argic hardpans from luvisols of Mexico State, using a petrographic microscope, X ray diffraction and electron microprobe analysis.

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>†</sup> Autor responsable ([acevedo@uaeh.reduaeh.mx](mailto:acevedo@uaeh.reduaeh.mx))

Recibido: Febrero de 2003. Aceptado: Enero de 2004.

Publicado en *Terra Latinoamericana*: 143-151.

According to our results, the main pedofeatures in the argic hardpans are: open porphyric related distribution, peds of subangular blocks, suggesting a reorganization of the groundmass, b-fabric is void and grainstriated, hipocoatings and pore-infillings forming well oriented microlaminates and presence of Fe-Mn pseudomorphic nodules. The petrographic study shows that crystal and rock fragments are included (and partially corroded in their rims) in a vitreous, partially welded and devitrified, groundmass. This groundmass is altered in variable degree, to clayed aggregates (kaolinite, haloisite) and microcrystalline quartz. The clay fraction is predominantly kaolinite and halloyite, and silica polymorphs. This suggest a high weathering grade and an advanced pedogenetic evolution.

**Index words:** *Kaolinite, coatings, tepetate, weathering.*

### INTRODUCCIÓN

Durante las últimas dos décadas, especialistas en suelos han estudiado la génesis, naturaleza, dureza y el comportamiento de los horizontes endurecidos de material piroclástico, llamados tepetate por campesinos de la parte central de la República Mexicana (Flores *et al.*, 1996; Acevedo y Flores 2000; Nimlos y Ortiz, 1987); el origen y los procesos de formación de estos horizontes endurecidos no son muy claros debido a los tipos de endurecimiento y a la gran variedad de materiales de origen volcánico y sedimentario.

Los horizontes endurecidos pueden tener un origen geológico (Quantin, 1992) y son, entonces, tobas o brechas, a menudo intercaladas con lluvias de lapilli y de cenizas (Hidalgo *et al.*, 1997), con influencia posterior de procesos edafogénicos (Dubroeuq *et al.*, 1989; Flores *et al.*, 1996), acumulación de arcilla (Acevedo *et al.*, 2002) y de hierro, como en el caso de los suelos de Nadis de Chile (Luzio y Palma, 1994), de sílice como en el caso de algunos tepetates de México (Rossignol *et al.*,

1992; Dubroeuq y Thyri, 1994), oxihidróxidos de hierro y aluminio, materia orgánica y óxidos de manganeso (Farmer *et al.*, 1984) o por una simple compactación mecánica (Duncan y Franzmeier, 1999). Pequeñas cantidades de sílice, adsorbidas sobre la superficie de las arcillas, y de los sesquióxidos forman películas de ópalo que provocan el endurecimiento (Dubroeuq, 1992).

Varios autores han propuesto un complejo de rasgos micromorfológicos indicadores de capas endurecidas (Creutzberg, *et al.*, 1990; Oleschko, 1990).

El objetivo fundamental del presente trabajo fue realizar la caracterización mineralógica, petrográfica y micromorfológica de horizontes árgicos endurecidos en luvisoles del estado de México para contribuir en el conocimiento de los suelos endurecidos de origen volcánico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se han seleccionado dos perfiles de suelo clasificados como Luvisol háplico (WRB, 1998) caracterizados por presentar un horizonte árgico endurecido; éstos se localizan en el municipio de Nicolás Romero (19° 38' 21" N, 99° 22' 09" O), estado de México. La región forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana. Los perfiles estudiados forman parte de la formación Tarango, constituida por depósitos de cenizas volcánicas, pómez, lavas y tobas dacíticas del Plioceno (Enciso-De la Vega, 1992). El clima C(W<sub>2</sub>)(W) b i es templado subhúmedo con un régimen de lluvias en verano, un porcentaje de lluvia invernal menor que 5% del total anual y una precipitación media anual de 604.8 mm; isotermal, con oscilación anual de temperatura menor que 5 °C, con una temperatura media anual de 13.9 °C (García, 1988).

Las muestras tomadas de suelo y del horizonte endurecido se llevaron al laboratorio donde se secaron al aire y se tamizaron a 2 mm. La distribución del tamaño de partícula se realizó por el método de la pipeta (Day, 1965); la densidad aparente, densidad real, pH, cationes intercambiables y materia orgánica se hicieron de acuerdo con los procedimientos del Soil Conservation Service (1984). La extracción de óxidos amorfos de hierro se realizó con oxalato ácido de amonio (Smith, 1994) y el contenido de ferrihidrita se calculó a partir de hierro oxalato (Fe<sub>o</sub>) multiplicado por 1.7 (Childs *et al.*, 1991). En campo, se tomaron muestras inalteradas del horizonte árgico endurecido y

se procedió a la preparación de láminas delgadas (Murphy, 1986) y la descripción de éstas (Bullock *et al.*, 1985) para su análisis micromorfológico. Se determinaron los minerales secundarios presentes en la fracción fina menor que 2 µm, por difracción de rayos X (DRX) en un difractómetro de rayos X, Phillips modelo X Pert. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) Jeol Modelo JSM-6300 para determinar los elementos contenidos en una muestra del horizonte endurecido a partir de un análisis puntual y de barrido de un área.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de las Variables Físicas y Químicas

La clase textural en el horizonte superior es franca, mientras que en los horizontes endurecidos (el porcentaje de arcilla varía de 46 a 64) es arcillosa. La densidad aparente varió de 1.59 a 2.08 Mg m<sup>-3</sup>, estos valores indican un grado de compactación, debido a fenómenos de consolidación y/o compactación, ya sea por simples presiones o por consolidación de los materiales por pérdida de agua (Primavesi, 1980), lo que impide el paso de las raíces y agua, excepto a lo largo de las fisuras (Figura 1a). En todos los casos, la densidad real se considera normal y puede indicar por sus valores (Cuadro 1) que el contenido de minerales pesados no es abundante, ya que en ningún caso excede el valor de 2.65 Mg m<sup>-3</sup>. Con relación a las propiedades químicas se observa en el Cuadro 1 que el pH varía dentro de los perfiles de ácido a ligeramente alcalino, mientras que el contenido de materia orgánica en el horizonte superior se considera medio (Fassbender y Bornemisza, 1987), el cual decrece con la profundidad. El complejo de cambio está dominado por Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>. El contenido de ferrihidrita disminuye en el horizonte endurecido y los óxidos de hierro amorfos predominan en el horizonte superior, lo que coincide con lo reportado por Childs *et al.* (1991). La presencia de los óxidos de hierro en el suelo, en especial depositados como recubrimiento de minerales primarios y secundarios o infiltrados en agregados de arcilla, juega un papel importante en la agregación de partículas y contribuye al endurecimiento de horizontes (Farmer *et al.*, 1984).

### Micromorfología

En las observaciones efectuadas a las láminas delgadas seleccionadas, se observó que predominan

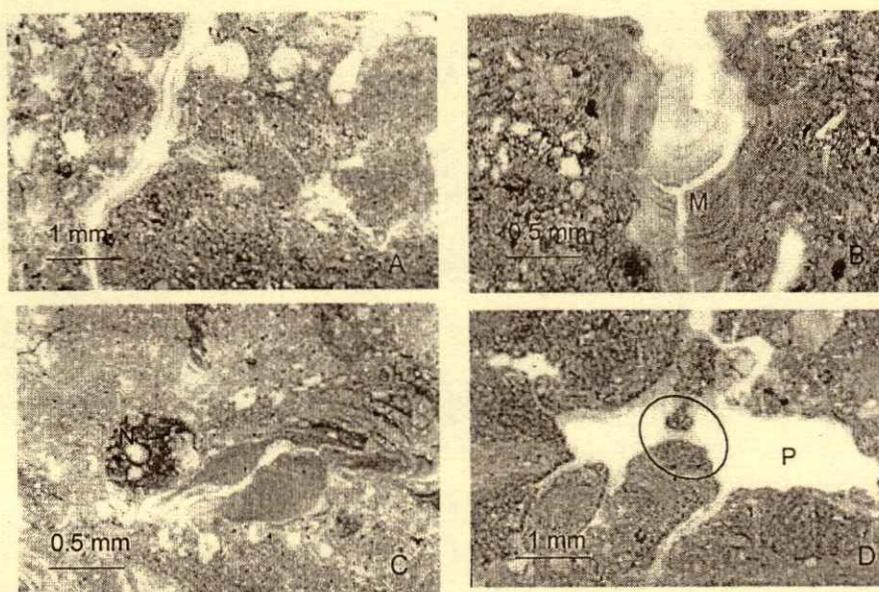


Figura 1. Micromorfología de horizontes endurecidos, a) arcilla iluviada orientada paralelamente a la pared del poro (ranura), b) hiporevestimientos y rellenos de poro en forma microlaminar (M), c) nódulos (N) pseudomórficos de Fe/Mn, y d) estructura de bloques subangulares, P=poro

los siguientes rasgos micromorfológicos: distribución relacionada de las partículas gruesas y finas, porfídica simple, morfología de los peds en bloques subangulares que sugieren una reorganización de la masa basal (Alfaro *et al.*, 1992) (Figura 1d), con una microestructura de tipo cámara, y una fábrica-b de poro y grano estriada, rellenos de poros en forma de microláminas de arcilla bien orientados paralelamente a la superficie de los poros y agregados (Figuras 1b y 1d), con colores de interferencia blancos de primer orden (Bullock *et al.*, 1985) y una débil birrefringencia (característica de la caolinita), esto indica la presencia de un régimen de humedad ústico en el suelo (Hessmann, 1992).

Los revestimientos arcillosos microlaminares se forman cuando las arcillas muy finas ( $< 0.002 \mu\text{m}$ ) entran en suspensión (Bullock y Thompson, 1985). El revestimiento de las masas arcillosas en los peds y en los poros es de color amarillo (10YR8/6), debido al hierro que incorporan. La porosidad es menor que 19% y se presentan nódulos pseudomórficos amiboidal de Fe-Mn (Figura 1c), de los cuales el porcentaje varía de 4 a 6, asimismo hay presencia de manganeso en disolución debido a procesos de hidromorfismo (Figura 1c). Las motas oscuras de manganeso y los hiporevestimientos de hierro en el horizonte son el resultado de la saturación por agua por varios días que propició condiciones alternantes

de óxido-reducción, correspondiendo a un hidromorfismo moderado (Veneman *et al.*, 1976; Buol *et al.*, 1989).

Malagón *et al.* (1992) mencionaron que los rasgos pedológicos más importantes en un horizonte Bt son los cutanes e hipocutanes de arcilla, hierro y manganeso que abundan en todo el horizonte. En las Figuras 1a, 1b y 1d, se observa claramente cómo la arcilla iluviada y otros materiales coloidales revisten los agregados y rellenan los poros y ranuras, formando puentes (Figura 1d) entre los peds que van consolidando y endureciendo el horizonte árgico en el luvisol. Hidalgo *et al.* (1997) mencionaron que cierta cantidad de geles de silicio y de ópalo A contribuye al endurecimiento del material en estado seco. En la matriz, se presentan revestimientos y rellenos de arcilla de color amarillo, que es debido al  $\text{Fe}^{+3}$  que se une a las arcillas formando complejos estables, llamados ferriargilanes (Hidalgo *et al.*, 1992, 1997; Acevedo *et al.*, 2002).

Estos rasgos pedológicos reflejan períodos prolongados de estabilidad del paisaje bajo un clima alternante de humedad y sequía (Hessmann, 1992).

El comportamiento óptico de la fábrica interna y la composición textural del revestimiento son característicos de procesos de iluviación de arcilla, típicamente encontradas en un horizonte árgico. Zebrowski (1992) mencionó que los cutanes que

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de los perfiles estudiados.

Perfil	Profundidad cm	Densidad		Textura	Arena	Limo	Arcilla	pH 1:5	Materia orgánica	C	N	CICT Cmol/kg <sup>1</sup>	Bases intercambiables			Saturación bases	Fermhidrita*	
		aparente	real										Na	K	Ca			Mg
1	0-6	1.46	1.90	F	39.62	35.83	24.55	5.80	4.65	2.70	0.27	18.60	0.26	0.33	8.00	2.50	59.62	0.58
	6-18	1.55	2.11	FCL	12.61	55.66	31.73	6.00	1.80	1.04	0.10	21.80	0.22	0.19	4.00	4.00	38.58	0.34
	18-36	1.58	2.20	FCL	20.06	44.92	35.02	6.10	0.90	0.52	0.05	33.20	0.24	0.08	5.50	3.50	28.07	0.26
	36-59	1.85	2.24	C	16.3	27.13	56.57	6.10	0.49	0.28	0.04	24.80	0.48	0.40	7.50	6.50	60.00	0.17
	59-79	1.90	2.24	C	12.03	27.29	60.68	6.60	0.69	0.40	0.04	28.00	0.63	0.59	10.00	6.50	63.29	0.17
	79-103	2.07	2.23	C	8.13	29.39	62.48	7.60	0.56	0.32	0.03	33.30	0.54	0.54	5.50	8.00	43.78	0.43
	103-133	2.08	2.27	C	2.08	33.45	64.47	7.20	0.49	0.28	0.03	29.80	0.67	0.72	7.50	8.50	58.36	0.46
133-163	2.08	2.26	C	0.74	40.66	58.6	7.10	0.14	0.08	0.02	53.90	0.89	0.73	8.50	7.50	32.69	0.40	
2	0-12	1.64	2.09	F	35.91	35.34	28.75	6.10	2.92	1.69	0.14	20.90	0.24	0.31	8.50	3.00	57.66	0.43
	12-29	1.91	2.16	F	32.51	28.02	39.47	5.90	1.04	0.06	0.06	23.20	0.24	0.27	6.50	7.00	60.39	0.31
	29-48	1.59	2.03	C	22.9	33.37	43.73	6.00	2.01	1.16	0.10	27.30	0.46	0.29	7.00	6.00	50.37	0.65
	48-72	1.98	2.23	F	35.36	29.93	34.71	6.00	0.76	0.44	0.05	21.70	0.26	0.12	3.00	5.50	40.92	0.34
	72-102	1.98	2.25	C	25.19	27.77	47.04	6.90	0.07	0.04	0.04	16.50	0.30	0.31	1.80	6.50	54.00	0.34
	102-132	1.96	2.14	C	26.87	27.48	45.65	6.00	0.35	0.20	0.03	25.60	0.50	0.26	6.50	5.00	47.89	0.36
	132-162	1.96	2.16	C	20.8	28.89	50.31	5.80	0.14	0.08	0.02	25.90	0.51	0.26	5.00	6.00	45.44	0.36

F = franco; FCL = franco arcilloso; FC = franco arcilloso; C = arcilloso.

\* Estimado empleando hierro oxalato multiplicado por 1.7 (Parfitt y Chalk, 1988).

existen dentro de los horizontes endurecidos, desempeñan un papel determinante en el endurecimiento de los horizontes. La sílice absorbida por la arcilla no haría más que reforzar dicho endurecimiento al secarse el suelo.

### Petrografía y Patrón de Alteración de Minerales

La descripción petrográfica general de los horizontes endurecidos indica la presencia de los siguientes constituyentes: a) fragmentos subangulosos de cristales de plagioclasa (andesina) con inclusiones aciculares de apatita y circón; b) plagioclasa zonada (oligoclasa-andesina) con huecos o corroída a lo largo de fracturas y alterada parcialmente a sericita; c) cristales prismáticos de clinopiroxenos, reemplazados en su totalidad por sericita y hematita; d) feldespato potásico (sanidina); e) anfíbol cálcico (magnesiohornblenda); f) mica (biotita) con alteración parcial a hidromica. También hay cuarzo (< 5%) en cristales anhedrales, parcialmente corroídos en sus bordes por minerales secundarios (clorita, minerales arcillosos), y diseminaciones de óxidos de hierro (magnetita).

El agregado contiene, además, fragmentos subredondeados de roca volcánica porfídica rica en vidrio, reemplazados en 80% por minerales arcillosos, sericita, clorita y limonita. Otros fragmentos de roca son de toba riolítica parcialmente soldada y alterada a minerales arcillosos, clorita y hematita. Hay también fragmentos de traquita que exhiben una textura microlítica fluidal formada de microlitos de plagioclasa y sanidina con diseminaciones de óxido de hierro. Otros fragmentos son de tefra y otros más posiblemente de microgranito formados por un intercrecimiento de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo y ferromagnesianos indeterminados rellenos por clorita, minerales arcillosos, sericita y hematita.

Los fragmentos de cristales y roca están incluidos (y parcialmente corroídos, sobre todo en sus bordes) en una matriz vítrea poco soldada y devitrificada, alterada parcialmente a mezclas de minerales arcillosos (haloisita, caolinita) y cuarzo microcristalino. Esta matriz forma, en ocasiones, esferulitas formadas de intercrecimientos de feldespato potásico y albita.

Otros fragmentos de roca no pueden ser diferenciados debido a que están en más de 90% reemplazados por mezclas de minerales arcillosos, sericita y hematita.

Estos constituyentes están cementados por agregados de minerales arcillosos y por intercrecimientos de albita y cuarzo microcristalino derivados de la alteración de vidrio volcánico, producto de la disolución, hidrólisis y oxidación (Ezzaim *et al.*, 1999). El protolito del horizonte endurecido se clasifica petrográficamente como toba andesítica alterada.

### Mineralogía

Los difractogramas de rayos X de las preparaciones orientadas de la fracción arcillosa de los horizontes endurecidos presentan una reflexión a 4.04 Å de mayor tamaño que probablemente indique la presencia de un polimorfo de la sílice, que podría corresponder al ópalo CT. Las siguientes reflexiones 4.46 Å (haloisita), 3.58 Å y 1.49 Å (caolinita) además de la presencia de cuarzo, 3.34 Å (Figura 2a). Las otras fases cristalinas que se presentan son clorita, cuarzo y feldespatos alcalinos; la mineralogía básica de estos suelos (caolinita, haloisita, cuarzo) indica un alto grado de meteorización y una avanzada evolución pedogenética; posiblemente, sus caracteres principales se obtuvieron en otro tipo de clima más húmedo, que el que se presenta en la actualidad (Figura 2b).

Las observaciones en microscopio electrónico de barrido (MEB) muestran que en los horizontes endurecidos se presenta vidrio volcánico (Figura 3); además, las arcillas son de forma de plaquetas (hojuelas o láminas) subangulares (Figura 4); al determinar su composición química por microanálisis (Cuadro 2), éstas presentan una composición que se asemeja a las arcillas 1:1, caolinita (Figura 5). Las observaciones también revelan la presencia de partículas esferoidales de haloisita presentes sobre las láminas de caolinita (Figura 4). Este último mineral permite afirmar que la meteorización se ha efectuado en un clima más húmedo (Peña y Zebrowski, 1992)

La presencia de caolinita sugiere que su génesis se asocia con la evolución de materiales amorfos, como resultado del alto grado evolutivo de estos suelos.

### CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos permitieron plantear una serie de características mineralógicas, petrográficas y micromorfológicas distintivas de los horizontes endurecidos en luvisoles.

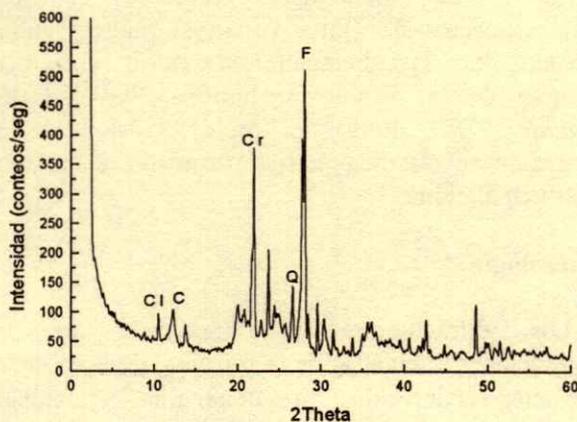


Figura 2a. Patrón de difracción de rayos X para el suelo volcánico endurecido; se indican las principales fases: clorita (Cl), caolinita (C), ópalo CT (Cr), cuarzo (Q) y feldespatos alcalinos (F).

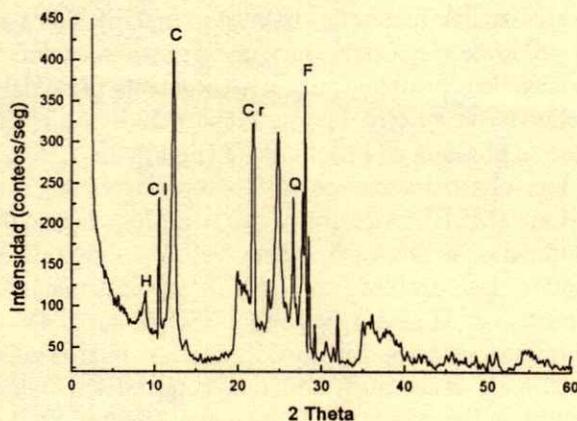


Figura 2b. Patrón de difracción de rayos X para una fracción de suelo volcánico purificada; se indican las principales fases: haloisita (H), clorita (Cl), caolinita (C), ópalo CT (Cr), cuarzo (Q) y feldespatos alcalinos (F).

- La caolinita y la haloisita son los principales minerales que predominan en el luvisol, lo que permite dar cuenta de la clase y del grado de evolución que el suelo ha tenido a través del tiempo.

- La naturaleza del material parental (roca piroclástica formada por el depósito de cenizas volcánicas) y el clima han sido los principales responsables de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas que caracterizan a estos luvisoles.

- Los resultados de la micromorfología indican que la subsecuente percolación de agua y el activo proceso

Cuadro 2. Microanálisis (en % en peso) por energía dispersiva (MEB) de rayos-X de fases seleccionadas en el horizonte endurecido.

Óxido	Fase vítrea	Fase amorfa	Caolinita
	%		
SiO <sub>2</sub>	99.27	55.37	55.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16	32.97	36.67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nd <sup>†</sup>	0.08	8.13
TiO <sub>2</sub>	0.04	1.46	nd
MnO	0.13	0.15	nd
Na <sub>2</sub> O	0.32	0.23	nd
K <sub>2</sub> O	nd	0.92	nd
MgO	0.11	0.38	nd
CaO	nd	0.28	nd
Total	100.03	91.84	100.0

<sup>†</sup> nd = no determinado.

de eluviación/iluviación en el desarrollo del horizonte árgico endurecido, tiende a ser directamente a través de la red de poros gruesos y más tarde al relleno por depósito iluvial, que provocó una cohesión de la matriz lo que ha contribuido a la formación de horizontes duros.

- Los rasgos pedológicos que predominan en el horizonte endurecido son los rellenos y revestimientos arcillosos microlaminares de color amarillo, además de nódulos típicos y pseudomórficos de Mn y Fe.

- La compactación, consolidación y el endurecimiento del horizonte se deben a procesos de iluviación de las arcillas, presencia de polimorfos de sílice y óxidos e hidróxidos de hierro que recubren las paredes de los poros o la superficie de los agregados que provocó una cohesión de la matriz, lo que ha contribuido a la consolidación del tepetate, por lo que el origen de este endurecimiento en el luvisol es de tipo pedológico.

## LITERATURA CITADA

- Acevedo-Sandoval, O., M. Cruz-Sánchez y E. Cruz-Chávez. 2002. Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico. *Agrociencia* 36: 401-409.
- Acevedo-Sandoval, O.A. y D. Flores-Román. 2000. Genesis of white fragipans of volcanic origin. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 17: 152-162.
- Alfaro, S.G., K. Oleschko y M. Meza. 1992. Rasgos micromorfológicos de los tepetates de Hueyoptla (Estado de México). *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra* 10 (Número Especial): 253-257.
- Bullock, P. y M.L. Thompson. 1985. Micromorphology of Alfisols. pp: 17-46. *In: Douglas, L.A. y M.L. Thompson (eds.). Soil micromorphology and soil classification. Special Publication 15. Soil Science Society of America. Madison, WI.*

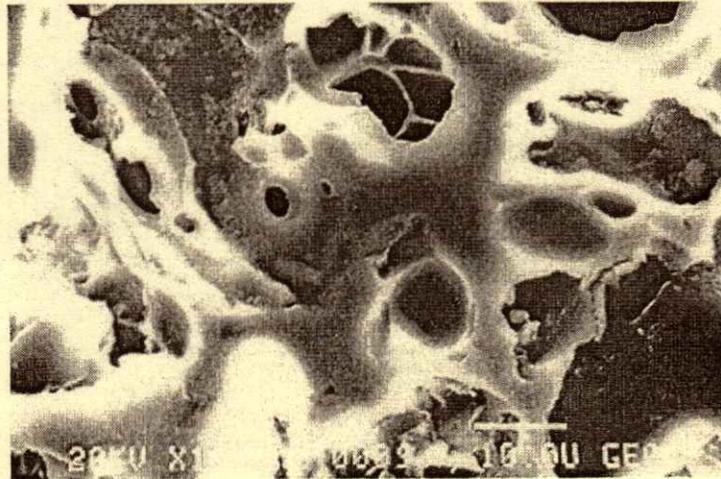


Figura 3. Fotomicrografía obtenida con el microscopio electrónico de barrido (MEB) que muestra vidrio volcánico no alterado (x 1600).

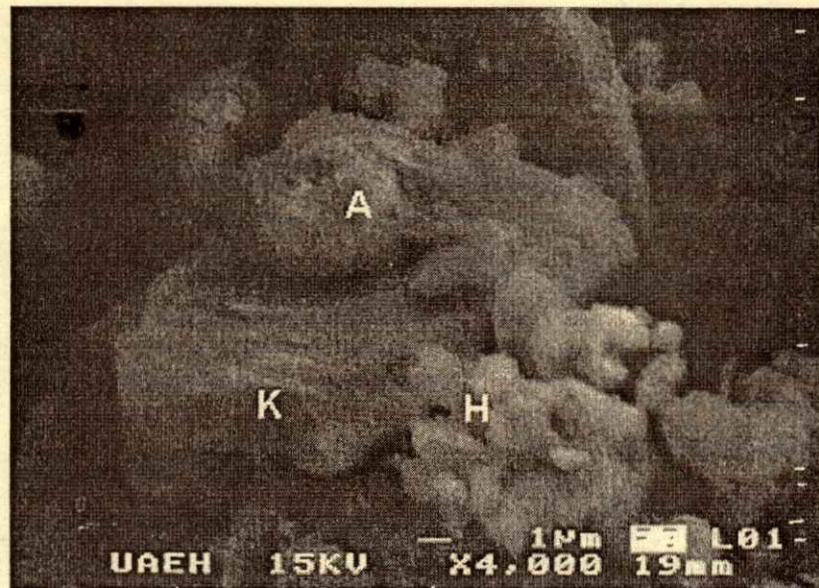


Figura 4. Fotomicrografía obtenida con el microscopio electrónico de barrido (MEB); se observa la presencia de material amorfo (A) depositado sobre cristales subhedrales de caolinita (K) que coexisten con cristales anhedrales de haloisita (H) (x 4000)

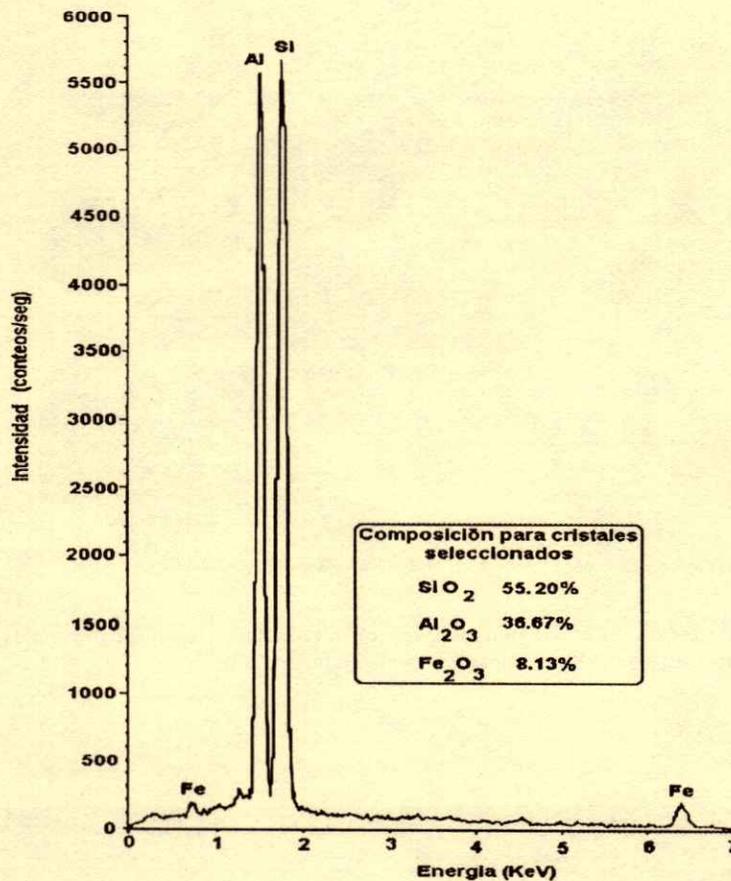


Figura 5. Espectro de energía dispersiva de rayos X para caolinita alterada.

- Bullock, P., N. Federoff, A. Jongerius, G. Stoops y T. Tursina. 1985. Handbook for soil thin section description. Waine Research Publications. Wolverhampton, UK.
- Buol, S.W., F.D. Hole y R.J. McCracken. 1989. Soil genesis and classification. 3<sup>rd</sup> ed. Iowa State University Press. Ames, IA.
- Childs, C.W., N. Matsue y N. Yoshinaga. 1991. Ferrihydrite in volcanic ash soil of Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 37: 299-311.
- Creutzberg, D., J.H. Kauffman, E.M. Bridges y G. del Posso. 1990. Micromorphology of "Cangahua" a cement subsurface horizon in soils from Ecuador. pp. 367-372. *In: Douglas, L.A. (ed.). Soil micromorphology: A basic and applied science.* Elsevier Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands.
- Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. pp. 545-567. *In: Black, C.A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 1.* American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Dubroeuq, D. 1992. Los tepetates de la región de Xalapa, Veracruz (México): Un endurecimiento de origen pedológico. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 233-240.
- Dubroeuq, D. y M. Thyri. 1994. Indurations siliceuses dans les sols volcaniques. Comparaison avec des silcretes anciens, *in Transactions of the 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, México* 6: 445-459.
- Dubroeuq, D., P. Quantin y C. Zebrowski. 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra* 7: 3-12.
- Duncan, M.M. y D.P. Franzmeier. 1999. Role of free silicon, aluminum and iron in fragipan formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 923-929.
- Enciso-De la Vega, S. 1992. Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 10: 26-36.
- Ezzaim, A., M.P. Turpault y J. Ranger. 1999. Quantification of weathering processes in an acid brown soil developed from tuff (Beaujolais, France). Part 1. Formation of weathered rind. *Geoderma* 87: 137-154.
- Farmer, V.C., A.R. Fraser, L. Robertson y J.R. Sleeman. 1984. Proto-imogolite allophane in podzol concretions in Australia.

- Possible relationship to aluminous ferrallitic (lateritic) cementation. *J. Soil Sci.* 35: 333-340.
- Fassbender, W.H. y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Flores-Román, D., J.R. Alcalá, A. González y J.E. Gama. 1997. Duripans in semiwarm and temperate subhumid climate in the Transmexican Volcanic Belt – The case of the north of the state of Morelos, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 13: 228-239.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koeppen (para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana). Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Hessmann, R. 1992. Micromorphological investigations on "tepetate" formation in the "toba" sediments of the state of Tlaxcala (México). *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 145-150.
- Hidalgo, C., P. Quantin y C. Zebrowski. 1992. La cementación de los tepetates: Estudio de la silicificación. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 192-201.
- Hidalgo, C., P. Quantin y F. Elsass. 1997. Caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipan del valle de México. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. III Simposio Internacional. Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.).* pp: 65-72.
- Luzio, W. y T. Palma. 1994. Indurated horizons in poorly drained volcanic soils from Chile, *in Transactions of the 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, México.* 6: 516-527.
- Malagón-Castro, D., C. Pulido y R. Llinas. 1992. Génesis y caracterización de formaciones volcánicas endurecidas en paleosuelos de la sabana de Bogota, Colombia. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 100-106.
- Murphy, C.P. 1986. Thin section preparation of soils and sediments. Soil Survey of England and Wales Rothamsted Experimental Station. AB Academic Publishers. Berkhamsted, Herts, UK.
- Nimlos, T.J. y C.A. Ortiz. 1987. Tepetate the rock mat. *J. Soil Water Conserv.* 42(2): 83-86.
- Oleschko, K. 1990. Cementing agents morphology and its relations to the nature of "Tepetates". pp. 381-386. *In: Douglas, L.A. (ed.). Soil micromorphology: A basic and applied science. Elsevier Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands.*
- Parfitt, R.L. y C.W. Childs. 1988. Estimation of forms of Fe and Al: A review and analysis of contrasting soils by dissolution and Mossbauer methods. *Austr. J. Soil Res.* 26: 121-144.
- Peña, H.D. y C. Zebrowski. 1992. Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfopedológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Colegio de Postgraduados, ORSTOM. México.
- Primavesi, A. 1980. Manejo ecológico del suelo. La agricultura en regiones tropicales. El Ateneo. Buenos Aires, Argentina.
- 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.
- Rosignol, J.P., A. Campos y P. Quantin. 1992. Las condiciones regionales de desarrollo de los tepetates en la zona de Xalapa-Coatepec, Veracruz, México. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 210-220.
- Smith, B.F.L. 1994. Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods. pp. 333-357. *In: Wilson, M.J. (ed.). Clay mineralogy spectroscopic and chemical determinative methods. Chapman and Hall. London, UK.*
- Soil Conservation Service. 1984. Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey. Soil Survey Investigations Report 1 (revised). US Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington, D.C.
- Veneman, P.L.M., M.J. Vepraskas y J. Bouma. 1976. The physical significance of soil mottling in a Wisconsin toposequence. *Geoderma* 15: 103-118.
- WRB. World Reference Base for Soil Resources. 1998. Report 84. FAO-ISRIC-IUSS UISS IBU. <http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agls/wrb/wrbdocs.htm>
- Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos. Terra 10 (Número Especial):* 1-4.

# MICROMORFOLOGÍA EN LA CLASIFICACIÓN DE HISTOSOLES EN HUMEDALES DE TABASCO, MÉXICO

## Micromorphology in the Classification of Histosols in Wetlands of Tabasco, Mexico

Elvia Moreno-Cáliz<sup>1‡</sup>, M. del Carmen Gutiérrez-Castorena<sup>1</sup>, Armando Guerrero-Peña<sup>2</sup>,  
Carlos A. Ortiz-Solorio<sup>1</sup> y David J. Palma-López<sup>2</sup>

### RESUMEN

La clasificación de Histosoles se basa en el grado de descomposición de los materiales orgánicos, para la cual se utilizan técnicas analíticas, sin embargo, éstas se han cuestionado debido a que no están estandarizadas. Por ejemplo, la técnica de fibra frotada sobre o subestima el contenido de fibras que conduce a una dudosa definición de horizontes de diagnóstico. La micromorfología puede ser una herramienta útil para diferenciar grados de descomposición de los horizontes orgánicos porque se analiza *in situ*. En este estudio, se compararon el método micromorfológico y el convencional en la realización de la clasificación taxonómica de los Histosoles en humedales de Tabasco, México. Seis suelos orgánicos se caracterizaron física, química, macro- y micromorfológicamente, en tres comunidades vegetales (manglar, selva baja inundable y vegetación hidrófila). Los suelos se clasificaron con el método convencional en Typic Sulfosaprists, Typic Haplosaprists, Terric Haplosaprists y Terric Haplohemists. Se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $\alpha = 0.05$ ) entre los métodos empleados, lo cual sugiere que la técnica de fibra frotada sobreestima y, en otros casos, subestima el contenido de los materiales orgánicos. La micromorfología permite explicar la génesis de los Histosoles, pero su uso es limitado en la clasificación en condiciones de anegamiento permanente, al dificultar la obtención de muestras inalteradas de la totalidad del perfil.

**Palabras clave:** Suelos, fibra frotada, anegamiento, horizontes orgánicos.

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

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

<sup>2</sup> Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco. 86500 Cárdenas, Tabasco, México.

Recibido: Febrero de 2003. Aceptado: Diciembre de 2003.

Publicado en *Terra Latinoamericana*: 153-160.

### SUMMARY

The classification of Histosols is based on the degree of decomposition of organic materials. For this classification analytical techniques are used; however, these have been questioned because they are not standardized. For example, the rubbed fiber technique overestimates or underestimates the content of fibers and leads to a doubtful definition of diagnosis horizons. Micromorphology can be a useful tool to differentiate degrees of decomposition of the organic horizons, because it is analyzed *in situ*. In this study, micromorphological and conventional methods are compared for the taxonomic classification of the Histosols in wetlands of Tabasco, Mexico. Six organic soils were characterized physically, chemically, macro- and micromorphologically, in three plant communities (mangroves, swamp, and marsh). The soils were classified with the conventional method as Typic Sulfosaprists, Typic Haplosaprists, Terric Haplosaprists, and Terric Haplohemists. Significant statistical differences ( $\alpha=0.05$ ) were found between the methods used, suggesting that rubbed fiber overestimates or, in other events, underestimates the content of organic materials. Micromorphology explains the genesis of the Histosols, but its use is limited in classification under conditions of permanent flooding, making it difficult to obtain unaltered samples of the total profile.

**Index words:** Soils, rubbed fiber, flooding, organic horizons.

### INTRODUCCIÓN

Los Histosoles se desarrollan principalmente en humedales de zonas templadas y boreales, a partir de la acumulación de vegetación de musgo y pastos (Soil Survey Staff, 1999). El grado de descomposición de estos materiales es importante en su clasificación para la cual se utilizan técnicas analíticas como la fibra frotada, la misma que se ha criticado porque lleva a una sobre o subestimación del contenido de fibra y,

por lo tanto, a una dudosa definición de horizontes de diagnóstico (Lee y Manoch, 1974); asimismo, esta técnica se ha cuestionado debido a que se diseñó en regiones o países particulares y no está estandarizada (Malterer *et al.*, 1992).

Los estudios micromorfológicos se proponen como una alternativa para entender la naturaleza de los procesos pedogenéticos que se originan cuando los materiales orgánicos se acumulan en ambientes anaeróbicos; estos estudios se pueden usar para diferenciar grados de descomposición de los horizontes orgánicos y, con ello, contribuir al entendimiento de la génesis y de la clasificación taxonómica de Histosoles (Lee y Manoch, 1974; Levesque y Diné, 1982).

En el caso de los Histosoles de Tabasco, México, éstos se forman por acumulación de materiales leñosos de vegetación arbórea u otro tipo de vegetación herbácea tropical; no obstante, se han utilizado las mismas técnicas de clasificación que para Histosoles de zonas templadas y boreales. La distribución de estos suelos no se conoce a detalle debido a las dificultades analíticas para su clasificación lo que contribuye a muchas divergencias con la Taxonomía de Suelos (Palma-López, 2002).

Los objetivos de la presente investigación fueron aplicar la micromorfología para determinar el arreglo, grado de descomposición y cuantificación de los componentes orgánicos en los horizontes orgánicos de Histosoles, y comparar el análisis micromorfológico con el método convencional propuesto por la Soil Survey Staff (1999) para realizar su clasificación taxonómica en humedales de Tabasco, México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la parte oeste de Tabasco, México, entre 17°59'25" y 18°18'02" N, y entre 93°56'58" y 94°07'48" O y comprende parte de los municipios de Huimanguillo y Cárdenas (Figura 1).

Esta zona se caracteriza por poseer superficies inundadas e inundables la mayor parte del año, principalmente con agua dulce y, en ocasiones, con agua salada. Su fisiografía es de un relieve cóncavo y un drenaje natural deficiente sin salida para el agua excedente y se ubica en las partes más bajas del estado (Palma-López y Cisneros, 2000).

Las especies vegetales que predominan en el área tienen propiedades de adaptación a condiciones de anegamiento. Destaca la selva baja inundable de apompo (*Pachira aquatica*); los manglares: rojo (*Rhizophora mangle*), blanco (*Laguncularia racemosa*) y prieto (*Avicennia germinans*), cuya distribución horizontal está en función de la salinidad y de las condiciones de inundación; la vegetación hidrófila está constituida por varias asociaciones de herbáceas como popal (*Thalia geniculata*), molinillo (*Cyperus giganteus*) y espadaño (*Typha latifolia*) (López, 1995).

### Descripción y Muestreo de Suelos

Los sitios de muestreo se ubicaron en las tres comunidades vegetales mencionadas anteriormente, considerando su representatividad dentro del área. Se hicieron seis perfiles de suelo, dos por cada tipo de vegetación y se describieron con base en el manual de Cuanalo (1990); las muestras de suelo se colectaron con barrena y cava hoyos.

Para las secciones delgadas, se utilizó un colector de muestras adaptado de La Force *et al.* (2000), con el que se obtuvo una columna de aproximadamente 100 cm de profundidad y después se hicieron cortes cada 10 cm, con el propósito de tener una secuencia del grado de descomposición de la materia orgánica en el perfil.

### Elaboración de Secciones Delgadas

Las muestras inalteradas se secaron mediante fase de vapor con acetona, el secado requirió aproximadamente de seis meses; posteriormente, se impregnaron con resina poliéster insaturada y se obtuvieron secciones delgadas de 30 µm de espesor (Murphy, 1986).

### Análisis Físico y Químico de Suelos

Las muestras se secaron a la sombra y a temperatura ambiente durante aproximadamente dos meses, posteriormente se tamizaron para eliminar las fibras mayores que 2 mm (Soil Survey Staff, 1996). Las determinaciones físicas realizadas fueron: humedad y densidad aparente (Dap); y químicas: pH, conductividad eléctrica (CE), sulfatos solubles, nitrógeno (Van Reeuwijk, 1995; Soil Survey Staff,

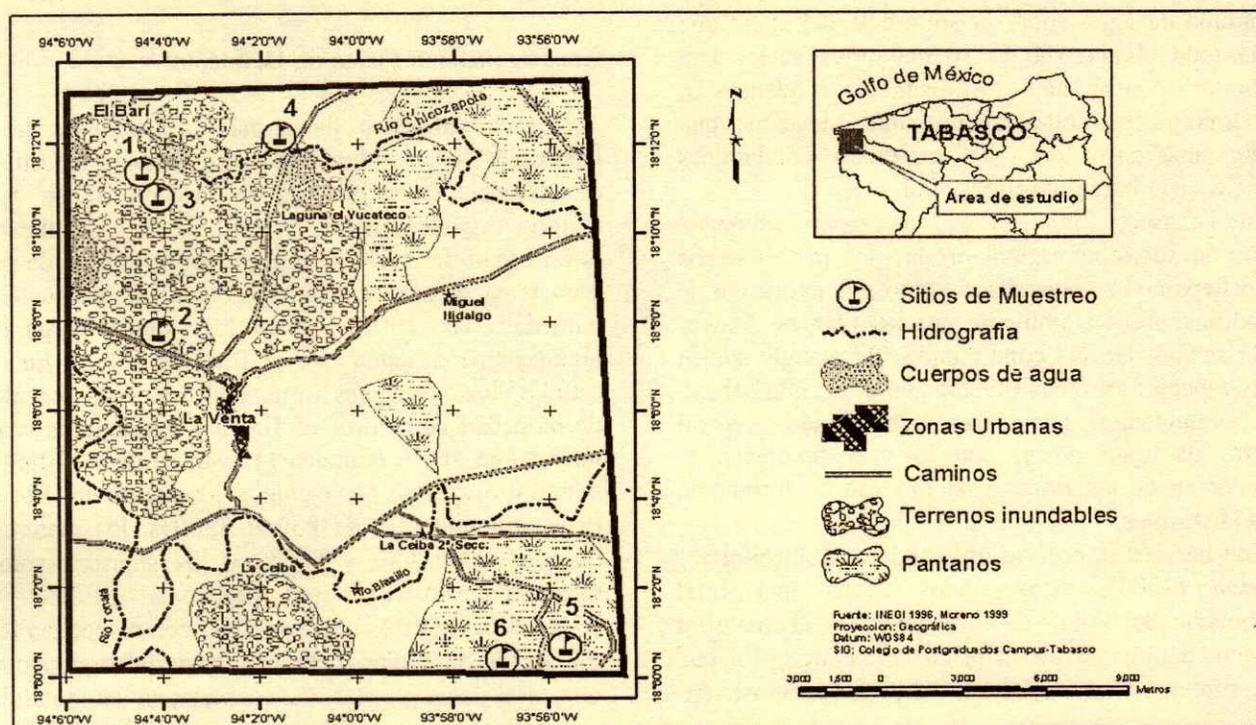


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo.

1996), materia orgánica y carbono orgánico por combustión seca (Kalra y Maynard, 1991).

**Método Convencional**

En este trabajo se denominó como método convencional a las técnicas utilizadas para clasificar Histosoles, como son: color en pirofosfato de sodio, y fibra frotada y no frotada para diferenciar los materiales orgánicos: fibrico, hémico y sáprico (Soil Survey Staff, 1996).

**Método Micromorfológico**

Los microcomponentes y grados de descomposición de los materiales orgánicos se describieron y se cuantificaron con base en Bullock *et al.* (1985) y Fitzpatrick (1990). La cuantificación se hizo mediante el método de conteo de cuadros en línea (200 cuadros por lámina) y los rasgos que se describieron fueron poros, minerales y material orgánico, la cuantificación se hizo en porcentaje.

**Análisis de Resultados**

Los Histosoles se caracterizaron física, química y micromorfológicamente y se clasificaron según el Soil Survey Staff (1999).

Para comprobar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los métodos de fibra frotada y micromorfología, se aplicó una prueba t de Student con  $\alpha = 0.05$ . Para la comprobación de la hipótesis, se calculó el valor de t mediante el programa estadístico SAS (SAS Institute, 1996), y se analizaron por componentes (fibra, amorfo y minerales) y por tipo de vegetación (manglar, selva baja y vegetación hidrófila).

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Caracterización Morfológica de Histosoles**

Las comunidades vegetales donde se desarrollan los Histosoles tienen un arreglo horizontal dentro del área influido por la topografía; paralelo a la costa se encuentran los suelos con vegetación de mangle con

una topografía intermedia, donde el agua salina fluctúa durante el año; le siguen los suelos con vegetación hidrófila, establecida en depresiones y con una lámina de agua sobre la superficie del suelo que fluctúa todo el año (50 cm o más); los suelos con vegetación de selva baja se ubican tierra adentro en áreas topográficas relativamente más elevadas, que durante una parte del año presentan condiciones aeróbicas en el horizonte superficial.

En Tabasco, Thom (1967) mencionó diferentes estados de sucesión vegetal producidos por procesos geomórficos que se consideran como una expresión de la modificación del ambiente por las plantas. Dawes (1991) señaló que las comunidades de mangle suelen ser las especies arbóreas pioneras en áreas inundables, pero evolucionan hacia una comunidad vegetal terrestre de agua dulce, con lo cual favorecen la acumulación de las fibras y el proceso de formación de los Histosoles.

Con base en el criterio utilizado por Rabenhorst y Swanson (2000), estos suelos tienen una edad aproximada de 2000 a 4000 años y el material orgánico dominante es sáprico y hémico, lo que hace suponer un proceso de descomposición-

mineralización rápido durante los periodos de menor inundación, alcanzando profundidades hasta de dos metros.

### Caracterización Física de Histosoles

La característica física más sobresaliente de los Histosoles es la humedad, ya ésta que influye directamente en el proceso de descomposición de la materia orgánica (Brady y Weil, 1999). Usualmente, la humedad del suelo se reporta sobre la base de peso seco y, si el peso del agua es igual al del suelo, la humedad es 100%, pero los suelos orgánicos almacenan más agua que la fracción sólida. En este estudio, los horizontes orgánicos tuvieron contenidos de humedad superiores al 100% y, en algunos casos, mayor que 500% (Cuadro 1); esto se debe al tipo de material orgánico; por ejemplo, los materiales fibricos tienen un intervalo de 850 a 3000%, los materiales hémicos entre 450 y 850% y los sápricos valores menores que 450% (Everett, 1983).

La Dap en estos suelos es baja con respecto a la de los suelos minerales, debido al material orgánico y a que el espacio poroso es ocupado en su totalidad

**Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de Histosoles en humedales de Tabasco, México.**

Perfil	Húm. <sup>§</sup>	Dap	Color Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Fibra		MO	CO	N	C:N	pH en CaCl <sub>2</sub>		CE	SO <sub>4</sub>
	%			g cm <sup>-3</sup>	FNF <sup>†</sup>					FF <sup>†</sup>	Húm.		
1	303	0.21	4/4	90.0	4.0	48.3	27.9	0.47	59.8	5.6	4.4	17.1	0.28
	265	0.23	4/4	82.0	4.0	35.8	20.8	0.40	52.5	6.5	4.7	22.2	0.34
	231	ND	3/4	80.0	2.0	38.7	22.4	0.40	56.7	6.0	4.8	26.5	0.34
	95	ND	5/4	76.0	<1	6.9	4.1	0.10	40.2	6.0	2.8	23.3	0.87
2	711	0.08	5/4	90.0	28.0	91.2	52.9	2.4	21.7	4.5	4.3	0.3	0.02
	697	ND	4/2	80.0	12.0	89.4	51.9	2.3	22.9	4.4	4.2	0.2	0.01
	111	ND	3/4	44.0	<1	19.7	11.4	0.5	23.8	5.0	4.7	0.2	0.01
3	560	0.10	4/4	80.0	4.0	89.1	51.7	1.99	26.0	3.6	3.6	1.0	0.00
	794	ND	4/4	80.0	4.0	79.3	46.0	1.85	24.9	3.8	3.7	1.1	0.00
	541	ND	4/4	90.0	2.0	84.6	49.0	1.64	29.9	4.2	3.8	0.8	0.00
4	903	0.09	7/4	90.0	20.0	85.7	49.7	2.13	23.4	5.6	4.7	12.4	0.26
	853	ND	7/4	94.0	20.0	85.8	49.8	2.02	24.6	6.3	4.7	13.8	0.33
	630	ND	7/4	90.0	10.0	83.6	48.5	1.74	27.8	6.2	5.4	19.0	0.22
	554	ND	3/4	86.0	4.0	75.9	44.0	1.28	34.4	6.4	5.4	26.0	0.35
	481	ND	3/4	70.0	2.0	70.4	40.8	1.05	39.1	6.0	4.8	21.2	0.62
5	905	0.06	5/4	72.0	40.0	77.5	44.9	2.23	20.2	4.7	4.6	0.3	0.00
	892	ND	3/4	70.0	20.0	85.4	49.5	1.92	25.8	4.9	4.8	0.1	0.00
	707	ND	3/4	84.0	4.0	84.0	48.7	1.71	28.5	5.2	5.0	0.5	0.00
	206	ND	7/3	0.0	0.0	23.4	13.5	0.71	19.2	6.0	3.9	0.0	0.18
6	1525	0.06	5/4	90.0	14.0	56.6	32.9	1.44	22.8	4.8	4.7	0.2	0.00
	879	ND	3/4	90.0	6.0	83.7	48.6	2.30	21.1	5.0	4.9	1.5	0.00
	576	ND	3/4	90.0	<1	85.4	49.5	1.74	28.4	5.4	5.3	4.4	0.01
	505	ND	3/4	90.0	<1	64.7	37.5	1.27	29.5	5.7	5.1	6.1	0.05
	160	ND	6/2	0.0	0.0	11.7	6.8	0.35	19.3	6.7	5.1	5.6	0.09

<sup>†</sup> fibra no frotada, <sup>‡</sup> fibra frotada. <sup>§</sup> Húm. = humedad; Dap = densidad aparente; MO = materia orgánica; CO = carbono orgánico; CE = conductividad eléctrica.

por agua (Lucas, 1982). En el Perfil 5 con vegetación de selva baja, el contenido de fibra frotada es mayor con respecto al de los otros suelos, la Dap  $< 0.09 \text{ g cm}^{-3}$  y el contenido de humedad es suficiente como para ubicarlo como un hemist, según la Taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 1999).

### Caracterización Química de Histosoles

En el Cuadro 1 se observa que el pH de los suelos es de moderada a extremadamente ácido, sobre todo en suelos con vegetación de mangle, lo que se atribuye a la presencia de materiales sulfhídricos característico de zonas pantanosas (Van Breemen y Buurman, 1998); esto se corroboró con el contenido de  $\text{SO}_4$  que fue  $> 0.05\%$ , condición necesaria para considerarse como material sulfhídrico y por la presencia de piritita, explicada más adelante.

Cuando se comparó el pH en húmedo y seco del horizonte mineral, el cambio fue hasta de tres unidades con el secado de la muestra; Dent (1992) indicó que los sedimentos marinos viejos junto con minerales de sulfito constituyen materiales parentales potencialmente ácidos si son llevados a la superficie.

En el caso de los suelos con mayor influencia de agua dulce como selva baja y vegetación hidrófila, se puede atribuir principalmente a la presencia de ácidos orgánicos disueltos y a la disolución de grupos funcionales de ácidos débiles (carboxílicos y fenólicos), conocidos por liberar protones a la solución y disminuir el pH (Courchesne *et al.*, 1995).

En los suelos de mangle, la CE fue superior a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , condición que los convierte en suelos salinos (Richards, 1954); lo anterior se debe a la influencia de agua marina que inunda por períodos prolongados el área. Porta *et al.* (1999) señalaron que los suelos a lo largo de las costas presentan acumulaciones de sales marinas, principalmente cloruro sódico, procedente de capas freáticas salinas poco profundas, y de agua de inundación por efectos mareales o por los aportes de sales transportadas.

Estos suelos salinos son potencialmente ácidos, pero la acidez sólo se manifiesta al alterar las condiciones naturales de drenaje y se debe a la presencia de piritita que, al ser expuesta al oxígeno, se oxida y produce ácido sulfúrico disminuyendo el pH (Van Breemen y Buurman, 1998).

Cuando se habla del contenido de carbono para suelos minerales, éste es relativamente bajo ( $< 1.5\%$ ) y, en condiciones oxidantes, su tiempo de residencia es breve ( $< 1000$  años), pero en suelos orgánicos de

humedales se observa lo contrario por las condiciones de reducción (Everett, 1983). El contenido de carbono orgánico en los suelos estudiados es alto en todos sus horizontes orgánicos, esto es porque la anaerobiosis restringe la presencia de microorganismos aerobios, y favorece la acumulación de residuos vegetales y la formación de los horizontes orgánicos (Kilham y Alexander, 1984). La materia orgánica del mangle está constituida en mayor proporción por material lignificado así como por lípidos, lo cual repercute en una alta relación C/N; cabe mencionar que se considera alta cuando es superior a 14 (Moreno *et al.*, 2002).

### Caracterización Micromorfológica

La materia orgánica de los suelos estudiados se presenta en una gran variedad de formas en secciones delgadas del suelo (Figura 2). Aunque todos sus componentes son residuos de órganos y tejidos vegetales, difieren en su origen y grado de alteración debido a procesos de alteración físicos y químicos que causan cambios graduales en los componentes, lo que significa mayor dificultad para caracterizarlos (Babel, 1985). Además de la fracción orgánica definida, se observó una fracción mineral de cuarzo y arcillas del Tipo 2:1, identificadas por sus colores amarillentos de segundo orden, que predominan en horizontes sápricos profundos y en el horizonte C.

En los dos suelos con vegetación de mangle, se observó piritita framboidal en la masa basal y en los poros (Figura 2), y contenido de sulfato soluble superiores a  $0.05\%$ , por lo que estos suelos presentan propiedades características de horizontes sulfúricos (Soil Survey Staff, 1999). Van Breemen y Buurman (1998) mencionaron que el sulfato y oxígeno son adicionados por el movimiento de la marea y se mueven en el perfil a través de los numerosos bioporos producidos por el mangle; en tales condiciones, la mayor parte del Fe disponible por piritización (óxidos de grano fino Fe III) se transforma eventualmente a piritita.

Los materiales fibricos muestran principalmente tejidos de plantas inalterados o ligeramente alterados sin apreciable oscurecimiento y con poco material fino orgánico (Perfiles 4 y 5); sin embargo, la identificación de alguna planta en particular es difícil, debido a que siempre se encuentran cortes diagonales (Fitzpatrick, 1990). Los materiales parcialmente descompuestos (hémicos) también poseen una apariencia fibrosa y muchos fragmentos con

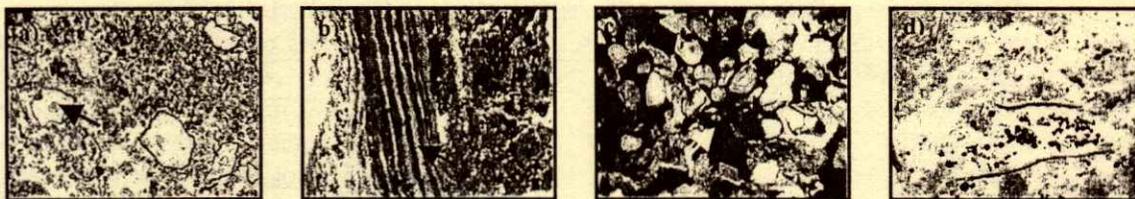


Figura 2. Material orgánico de Histosoles en humedales de Tabasco, México: a) Fibrico (Oi); b) Hémico (Oe); c) Sáprico (Oa) y d) Piritá framboidal. Longitud de marco 2.9 mm. Luz polarizada plana.

degradación incompleta, en tanto que el material orgánico fino puede estar adherido a fragmentos más gruesos de tejidos de plantas (Perfil 3). En los materiales sápricos (Perfiles 1 y 6), los fragmentos orgánicos son suficientemente oscuros y están descompuestos, la identificación botánica no es posible y el material orgánico fino es el componente dominante, como lo establecieron Rabenhorst y Swanson (2000).

#### Categorías Taxonómicas en los Histosoles

La Taxonomía separa a los suelos orgánicos de los minerales en virtud del contenido de humedad, de carbono orgánico y del porcentaje de arcilla, principalmente; para la clasificación de estos suelos no se requieren de los regímenes de humedad y temperatura, características de diagnóstico exclusivas para clasificar suelos minerales (Soil Survey Staff, 1999).

Todos los suelos cumplieron con el contenido mínimo de materia orgánica para designarse como Histosols; cinco suelos se ubicaron en el suborden Sapristis y uno en Hemists, esto con base en el contenido de fibra frotada y el mayor grosor de materiales sápricos.

En la superficie de estos suelos se observaron grandes cantidades de fibra, no obstante esto no fue suficiente para designarlos como fibrícos, debido a que sólo se considera como fibra aquel material menor que 2 mm (Soil Survey Staff, 1999). En general, se observó fibra con un tamaño mayor al requerido, en suspensión dada las condiciones de inundación durante el muestreo.

Por otro lado, se identificaron tres grandes grupos: dos Sulfosapristis, tres Haplosapristis y un Haplohemists. Los Sulfosapristis corresponden a los dos suelos con vegetación de mangle, con influencia de agua marina, con alto contenido de sulfato soluble en agua y una alta CE; en la categoría taxonómica menor, se clasificaron como Typic Sulfosapristis. Los Haplosapristis se ubican en vegetación hidrófila y selva de apompo, característica que determinó a los Typic Haplosapristis y a los Terric Haplosapristis. Además, estos suelos no presentaron propiedades sulfúricas, ni  $CE > 30 \text{ dS m}^{-1}$ , y tampoco un contacto lítico o límnic. Finalmente, los Haplohemists se desarrollan en vegetación hidrófila, con mayor contenido de fibras (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tipos de Histosoles en humedales de Tabasco, México.

Tipo de suelo	Perfil	Vegetación	Profundidad (cm) y horizontes genéticos					
Typic Sulfosapristis	1	Manglar	Profundidad	0 a 30	30 a 60	60 a 90	90 a 140	
			Horizonte	Oa1	Oa2	Oa3	2Cg	
Terric Haplosapristis	2	Selva baja	Profundidad	0 a 30	30 a 100	100 a 130		
			Horizonte	Oe	Oa	C		
Typic Haplosapristis	3	Hidrófila	Profundidad	0 a 30	30 a 60	60 a 150		
			Horizonte	Oa1	Oa2	Oa3		
Typic Sulfosapristis	4	Manglar	Profundidad	0 a 30	30 a 60	60 a 100	100 a 140	140 a 200
			Horizonte	Oe1	Oe2	Oa1	Oa2	Oa3
Terric Haplohemists	5	Selva baja	Profundidad	0 a 20	20 a 50	50 a 80	80 a 140	
			Horizonte	Oe1	Oe2	Oa	2Cg	
Typic Haplosapristis	6	Hidrófila	Profundidad	0 a 30	30 a 60	60 a 110	110 a 150	150 a 200
			Horizonte	Oa	Oa2	Oa3	Oa4	2C

**Cuadro 3. Resultados de la prueba t Student ( $\alpha = 0.05$ ) por componentes totales.**

Componente	Método <sup>†</sup>		
	Conven- cional	Micro- morfológico	
Fibra	8.63	32.96	Significativo
Amorfo	88.29	56.28	Significativo
Minerales	2.96	10.76	No significativo

<sup>†</sup> Media del porcentaje de cada componente.

**Comparación entre el Método Convencional y Micromorfológico**

La cuantificación de fibras y amorfos varió con el método empleado, mientras que en los granos minerales ambos métodos dieron el mismo resultado (Cuadro 3), porque son unidades discretas lo que no sucede con el material orgánico con límites claros y difusos.

En el análisis por tipo de vegetación, la cuantificación de fibras en suelo de mangle con ambos métodos refleja resultados semejantes; esto se atribuye a su origen botánico y a las condiciones de salinidad que favorecen su conservación, lo cual repercute en la técnica de frotación. En suelos con selva baja y vegetación hidrófila sí hubo diferencias, lo que indica que cuando las fibras están más descompuestas, pueden desmenuzarse más fácilmente. En cuanto al material orgánico amorfo, se observaron diferencias entre los métodos para los tres tipos de vegetación, pero no en el análisis de minerales (Cuadro 4).

La caracterización micromorfológica de los materiales orgánicos difiere con el método empleado, lo que lleva a una sobre y subestimación, como lo

señaló Fox (1985) y tiene repercusiones serias dado que para clasificar a los Histosoles en la categoría de suborden, el contenido de fibra es el más útil (Frazier y Lee, 1971; Levesque y Diné, 1982).

Uno de los principales problemas que se presentaron durante el desarrollo del método de la fibra frotada fue la separación de las mismas en suelos arenosos, ya que el método no lo contempla, y puede llevar a cuantificar arenas como fibras; para su separación, el material se colocó en un vaso con agua, y por diferencia de densidades, las fibras se separaron y se cuantificó por volumen.

Babel (1985) y Fox (1985) señalaron que la micromorfología es un método que brinda mayor detalle sobre el grado de descomposición del material orgánico; sin embargo, la obtención de muestras inalteradas en estos suelos fue difícil, debido a las condiciones de inundación, el material requirió el doble de tiempo para su elaboración y se tuvieron problemas durante la impregnación por el alto contenido de materia orgánica.

Otro aspecto a considerar, es la necesidad de relacionar la clasificación micromorfológica de los materiales orgánicos con la designación taxonómica; por ejemplo, los materiales fibricos designados en campo mostraron en sección delgada evidencia de descomposición sugiriendo materiales hémicos. De igual modo, capas descritas como materiales hémicos se observan como materiales sápricos. Estas diferencias se pueden explicar debido a que la designación taxonómica de las capas se basa en el volumen de fibras después de frotarse cuyos fragmentos muy humificados son destruidos (Fox, 1985).

**Cuadro 4. Resultados de la prueba t Student ( $\alpha = 0.05$ ) por tipo de vegetación.**

Componente	Vegetación	Método <sup>†</sup>		
		Convencional	Micromorfológico	
Fibra	Manglar	10.57	37.41	No significativo
	Selva baja	11.35	37.75	Significativo
	Hidrófila	4.55	25.05	Significativo
Amorfo	Manglar	78.00	42.70	Significativo
	Selva baja	88.50	47.55	Significativo
	Hidrófila	95.30	74.52	Significativo
Minerales	Manglar	11.43	19.87	No significativo
	Selva baja	0.00	1.14	No significativo
	Hidrófila	0.00	4.30	No significativo

<sup>†</sup> Media del porcentaje de cada componente.

## CONCLUSIONES

El análisis micromorfológico permitió observar y cuantificar el grado de descomposición de los materiales orgánicos y, al comparar estos resultados con los del método convencional, se concluye que existen diferencias entre ambos métodos para definir los tipos de materiales orgánicos. Sin embargo, no fue posible clasificar a los Histosoles con el método micromorfológico, debido a que las condiciones de anegamiento dificultaron la obtención de muestras para todo el perfil y únicamente se clasificaron con el método convencional.

## LITERATURA CITADA

- Babel, U. 1985. Componentes orgánicos básicos. pp. 95-112. *In*: Bullock, P., A. Jongerius, T. Tursina, N. Fedoroff y G. Stoops. Manual para la descripción micromorfológica de suelos. Trad. al español por Ma. C. Gutiérrez C. y C.A. Ortiz S. 1a edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, estado de México, México.
- Brady, N.C. y R.R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. 9a edición. Prentice-Hall. New York.
- Bullock, P., A. Jongerius, T. Tursina, N. Fedoroff y G. Stoops. 1985. Manual para la descripción micromorfológica de suelos. Trad. al español por Ma. C. Gutiérrez, C. y C.A. Ortiz S. 1a edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, estado de México, México.
- Courchesne, F., S. Savoie y A. Dufresne. 1995. Effects of air-drying on the measurement of soil pH acidic forest soils of Quebec, Canada. *Soil Sci.* 160: 56-68.
- Cuanalo C., H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 3a edición. Colegio de Postgraduados. Chapingo, estado de México, México.
- Dawes, C.J. 1991. Botánica marina. Limusa. México, D.F.
- Dent, D. 1992. Reclamation of acid sulphate soils. *Adv. Soil Sci.* 17: 79-122.
- Everett, K.R. 1983. Histosols. pp. 1-53. *In*: Wilding, L.P., N.E. Smeck y G.F. Hall. (eds.). Pedogenesis and soil taxonomy. Tomo II. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Fitzpatrick, E.A. 1990. Micromorfología de suelos. Trad. al español por M. del C. Hidalgo. Compañía Editorial Continental. México, D.F.
- Fox, C.A. 1985. Micromorphological characterization of Histosols. pp. 85-104. *In*: Douglas, L.A. y M.L. Thompson (eds.). Soil micromorphology and soil classification. Special Publication 15. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Frazier, B.E. y G.B. Lee. 1971. Characteristics and classification of three Wisconsin Histosols. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 776-780.
- Kalra, Y.P. y D.G. Maynard. 1991. Methods Manual for forest soil and plant analysis. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Center. Alberta, Canada.
- Kilham, O.W. y M. Alexander. 1984. A basis for organic matter accumulation in soils under anaerobiosis. *Soil Sci.* 137: 419-427.
- La Force, M.J., C.M. Hansel y S. Fendorf. 2000. Constructing simple wetland sampling devices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 809-811.
- Lee, G.B. y B. Manoch. 1974. Macromorphology and micromorphology of a Wisconsin saprist. pp. 47-62. *In*: Aandahl Ch., A.R., S.W. Buol, D.E. Hill y H.H. Bailey (eds.). Histosols, their characteristics, classification, and use. No. 6. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Levesque, M.P. y H. Diné. 1982. Some morphological and chemical aspects of peats applied to the characterization of Histosols. *Soil Sci.* 133: 324-322.
- López, M. 1995. Tipos de vegetación y su distribución en el Estado de Tabasco y Norte de Chiapas. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Lucas, R.E. 1982. Organic soils (Histosols) formation, distribution, physical and chemical properties and management for crop production. Research report. The Michigan State University. East Lansing, MI.
- Malterer, T.J., E.S. Verry y J. Erjavec. 1992. Fiber content and degree of decomposition in peats: Review of national methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1200-1211.
- Moreno, C.E., A. Guerrero P., M.C. Gutiérrez C., C.A. Ortiz S. y D.J. Palma L. 2002. Los manglares de Tabasco, una reserva natural de carbono. Madera y Bosques Número Especial: 115-128.
- Murphy, C.P. 1986. Thin section preparation of soils and sediments. A B Academic Publishers. Berkhamsted, Great Britain.
- Palma-López, D.J. 2002. Manejo de Histosoles del estado de Tabasco. pp. 98-124. *In*: Palma-López, D.J. y A. Triano S. (Comps). 2002. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Vol. II. 2a edición. Colegio de Postgraduados-ISPOTAB. Villahermosa, Tabasco, México.
- Palma-López, D.J. y J. Cisneros D. 2000. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. 2a edición. ISPOTAB-Fundación Produce Tabasco-Colegio de Postgraduados. Villahermosa, Tabasco, México.
- Porta, C.J., M. López-Acevedo R. y C. Roquero D.L. 1999. Edafología, para la agricultura y el medio ambiente. 2a edición. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Rabenhorst, M.C. y D. Swanson. 2000. Classification of soils: Histosols. pp. E-183:E-208. *In*: Sumner, M.E. (ed.). Handbook of Soil Science. CRC Press. New York.
- Richards, L.A. (ed.). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook 60. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- SAS Institute. 1996. Statistical analysis system for Windows 6.12. Cary, NC.
- Soil Survey Staff. 1996. Soil survey laboratory methods manual, report 42. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Soil Survey Staff. 1999. Keys to Soil Taxonomy. (CD-ROM). Soil Conservation Service. 2a edición. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Thom, B. 1967. Mangrove ecology and deltaic geomorphology: Tabasco, Mexico. *J. Ecol.* 55: 301-343.
- Van Breemen, N. y P. Buurman. 1998. Soil formation. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- Van Reeuwijk, L.P. 1995. Procedures for soil analysis. Tech. Paper 9. 5<sup>th</sup> edition. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.

# SISTEMA INTEGRAL DE SIMULACIÓN DE FUERZAS APLICADO AL DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE LABRANZA DE CONSERVACIÓN

## Integrated System of Force Simulation for the Development of Conservation Tillage Implements

Santos Gabriel Campos-Magaña<sup>1‡</sup>, Martín Cadena-Zapata<sup>2</sup>, Sergio Jácome-Maldonado<sup>1</sup>, Antonio Reynolds-Chávez<sup>1</sup> y Sergio Uribe-Gómez<sup>1</sup>

### RESUMEN

Los sistemas de simulación de fuerzas (SSF) incluyen el uso de herramientas modernas, como los sistemas de adquisición de datos (ADC) de alta frecuencia de muestreo. En México, son contadas las instituciones que cuentan con este tipo de facilidades, orientadas básicamente a la docencia. En este trabajo, se desarrollaron y se evaluaron los elementos de un SSF integrado por tanque intercambiable de suelos, carro porta implementos, acondicionador de densidad de suelo, transductor de fuerzas, ADC y programa de análisis de datos. El sistema permite el acondicionamiento de densidad de suelos en 85% de las condiciones de campo y reproduce el efecto de la herramienta en términos de fuerza en 256 puntos por segundo. El SSF se empleó en la evaluación de cinco discos cortadores de residuos combinado con dos tipos de abresurcos para condiciones de labranza de conservación permitiendo su evaluación en términos de eficiencia de corte de residuos y la generación de ecuaciones de respuesta de demanda de fuerza de penetración ( $F_y$ ) y tiro ( $F_x$ ). Se encontró que para una eficiencia de corte de residuos cercana a 100%, el índice diámetro del disco-profundidad de corte ( $D p^{-1}$ ) debe de ser entre 4.5 a 5.5 y se requiere de una proporción de 2.9 entre la  $F_y$  comparada con la  $F_x$ . Además, el sistema desarrollado está en condiciones para hacer evaluación de nuevas herramientas en términos de consumo de energía, volúmenes de disgregación y tamaño de agregados.

**Palabras clave:** Cortadores de residuos, abridores de surco, sistema de adquisición de datos, transductores de fuerzas.

<sup>1</sup> Maquinaria Agrícola. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. km 34 carretera Veracruz-Cordoba, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (Camposg\_1999@yahoo.com)

<sup>2</sup> Maquinaria Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Recibido: Febrero de 2003. Aceptado: Noviembre de 2003.  
Publicado en Terra Latinoamericana: 161-168.

### SUMMARY

The soil force simulation system (SSF) includes the use of modern tools such as systems for high frequency data acquisition (ADC). In Mexico, few institutions have such equipment and are mainly focused on education. The objective of this project was to design, construct and evaluate the performance of a SSF, which is integrated by an exchangeable soil bin tank, tillage tool carrier, soil density conditioner, force transducer, ADC, and software for data analysis. The system allows soil density conditioning in 85% of the field conditions, and reproduces the tool-soil interaction in force terms at a range of 256 samples per second. The SSF was used for the performance evaluation of five types of disc coulters combined with two types of furrow openers for conditions of conservation tillage. The evaluation was made in terms of residue cutting efficiency and the generation of equations that describe the response to demand penetration force ( $F_y$ ) and draught force ( $F_x$ ). It was found that for residue cutting efficiency close to 100% the coulters diameter-working depth ratio ( $D p^{-1}$ ) should be between 4.5 and 5.5 and requires a proportion of 2.9 between  $F_y$  compared to  $F_x$ . The SSF developed is suitable for the evaluation of newly designed tools in terms of energy consumption, volume of soil disturbance and size of aggregates.

**Index words:** Disc coulters, data acquisition system, furrow openers, force transducer.

### INTRODUCCIÓN

El desarrollo y la evaluación de las herramientas de labranza tiene sus orígenes en procesos semi-empíricos basados en las experiencias de agricultores innovadores que buscan nuevas alternativas económicas y un menor gasto de mano de obra y de energía que los sistemas tradicionales de producción (Campos, 1995). Estos procesos de desarrollo requieren de una gran cantidad de tiempo antes de ser lo suficientemente confiables para entrar en un

proceso de fabricación y comercialización con productores. Los principios recientes de diseño de herramientas y equipos agrícolas parten de la secuencia descrita por Hunt (1983) y Kepner *et al.* (1980) y ésta puede ser sintetizada en las siguientes etapas: a) identificación de la necesidad-problema-oportunidad, b) operación(es) del sistema de producción que se requieren mecanizar, c) estudio de mercado, d) investigación documental de otros desarrollos, e) identificación de los elementos-herramientas-sistemas que se requieren diseñar, f) diseño conceptual, g) diseño del prototipo, h) evaluación económica, i) construcción del prototipo, j) evaluación de funcionamiento y durabilidad del prototipo en condiciones de laboratorio y de campo, k) diseño final, y l) construcción de la versión comercial.

En México, son pocas las industrias de la maquinaria agrícola que siguen el proceso anterior de desarrollo y menos aún las que invierten en tecnología para ofrecer un producto de calidad a los productores agropecuarios. La mediana y pequeña industria de la maquinaria agrícola en general copian la tecnología que se ha desarrollado en otros países, para condiciones de trabajo distintas a las de México y optando, en la mayoría de las veces, por la reducción de costos en materiales que son críticos para el buen funcionamiento y durabilidad de los equipos y herramientas alterando muchas veces el diseño de los mismos.

Godwing y Spoor (1977) indicaron que algunos de los aspectos más importantes en la evaluación de nuevos diseños de herramientas de labranza son: el proceso de medición de las magnitudes de las fuerzas que actúan en dichos implementos; la característica de la falla, el volumen y la sección transversal de la disturbación del suelo como producto de la geometría de la herramienta, manteniendo constantes durante el proceso de evaluación la humedad y densidad aparente del suelo. Este proceso de evaluación del comportamiento de los nuevos diseños es sólo posible realizarlo mediante un sistema de simulación de fuerzas SSF, que permita al investigador poder manipular las propiedades dinámicas del suelo, así como cambiar texturas del medio de evaluación. Esta etapa de desarrollo es imposible realizarla, a corto plazo, en condiciones de campo y sobre todo para los equipos que se proponen desarrollar para zonas de temporal, requiriendo para este proceso hasta de tres ciclos de trabajo.

Godwing (1975), McKyes (1985) y Hettiaratchy (1988) desarrollaron sistemas similares de SSF con los cuales contribuyeron a través de sus investigaciones al desarrollo de nuevos modelos de falla de suelos, producto de la geometría de las herramientas de labranza, permitiendo la predicción de cantidades de energía consumidas y estimación de la localización y magnitud de las fuerzas que producen daños a las estructuras de los equipos agrícolas.

Lickso y Harrison (1988) y Campos (1995) describieron la necesidad de un sistema de alta velocidad de muestreo para la reproducción de la fuerza de reacción del suelo, que incluye transductores de magnitudes de fuerzas y su localización, acondicionadores de señales y convertidores analógicos digitales. El anterior sistema permite reproducir en términos de energía lo que está sucediendo en la interacción suelo-herramienta.

McKyes (1978), Kushwaha *et al.* (1986) y Nieuwenburg *et al.* (1992) describieron el funcionamiento en discos cortadores de residuos y abridores de surcos con SSF prediciendo su comportamiento hasta 80% de lo evaluado en condiciones de campo. La integración de este porcentaje está dada por la medición de parámetros, como: eficiencia de corte de residuos, índices y secciones de disturbación de suelo, magnitud y localización de fuerzas reacción en función de las variables textura, densidad de residuos, humedad del suelo, profundidad de trabajo, densidad aparente del suelo contra geometría y combinaciones de herramientas. Con esto, se permite el rediseño de los equipos para lograr una mejor calidad de funcionamiento y reducción de gasto de energía.

Los objetivos del presente trabajo fueron diseñar un sistema que permitiera en condiciones de laboratorio (SSF), evaluar el funcionamiento de herramientas de labranza y el funcionamiento de discos cortadores y arreglos de discos cortadores-abresurcos, en términos de eficiencia de corte y sus curvas de respuesta de fuerzas de reacción del suelo, en condiciones de no-labranza.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este desarrollo y su investigación se llevaron a cabo de 1996 a 1998, en el Departamento de Mecanización Agrícola del campo experimental Cotaxtla del Instituto Nacional de Investigaciones

Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Los equipos empleados en el desarrollo de los seis elementos que integran el SSF, mostrado en la Figura 1, fueron: (1) Moto-reductor trifásico de la empresa Fairbank-Morse con una de reducción de velocidad de 20:1 acoplado a una transmisión que permite velocidades de avance en un intervalo de 0.05 a 0.5 m s<sup>-1</sup> y fuerza de tiro de 6 kN. (2) Moto-vibrador de 600 impactos por minuto con masa excéntrica de 100 N con una altura libre de impacto de 50 mm. (3) Para los transductores de fuerza se emplearon galgas extensiométricas tipo KFG-5-350-C1-11 de la empresa KYOWA en un arreglo de puente de Wheastone completo. El tipo de acero empleado en la construcción de los transductores fue 1045(AISI) con un esfuerzo límite de cedencia de 352 MPa. (4) El sistema de monitoreo de fuerzas fue integrado por un acondicionador de señales DBK16 con ganancia de 100 a 1500 micro-strains (µε) y un convertidor analógico digital Daq-book 200, de 16 canales, de la empresa Iotech, con frecuencias de muestreo de 100 000 Hz. Los elementos (5) tanque de suelo y (6) carro porta implementos se dimensionaron con base en la profundidad y en el ancho de corte máximo de trabajo de 400 x 400 mm.

Las mediciones de la resistencia a la penetración, producto del acondicionamiento del suelo en el tanque, se realizaron con un penetrómetro, marca ELE, provisto de un sensor de fuerzas tipo "anillo" con un indicador de carátula. Se utilizó un cono estándar (ASAE S313.1) con un diámetro de base de 20.27 mm, con una capacidad máxima de 2 MPa. Para cada 5 cm de profundidad se registró la resistencia a la penetración, expresada en kPa.

Previo al proceso de evaluación de una herramienta de labranza en el SSF, se seleccionan, la textura que debe de contener el tanque de suelos, la humedad y la resistencia a la penetración. El proceso de acondicionamiento se realiza de la siguiente manera: primero, se barbecha a la profundidad máxima de evaluación en intervalos de 100 mm de profundidad hasta un máximo de 400 mm; segundo, se acondiciona el suelo con el vibro-compactador a la velocidad mínima de avance (0.05 m s<sup>-1</sup>) dando el número de pasos necesarios hasta alcanzar la resistencia del suelo deseada (kPa); tercero, se monta el arreglo de herramientas a evaluar y se fija a la profundidad de trabajo; y cuarto, se realiza la corrida correspondiente y se vuelve a iniciar el ciclo de acondicionamiento de suelo.

## Evaluación de Discos y Abresurcos

Para la evaluación de herramientas de labranza, se seleccionaron cinco tipos de discos de 425 mm de diámetro, utilizados como discos cortadores de residuos, los cuales fueron: disco liso comercial (C1), disco de muescas comercial (C2), disco de muesca experimental-1 (C3), disco de muescas experimental-2 (C4) y disco de muescas experimental-3 (C5). Las variables independientes en la evaluación fueron: a) índice de profundidad de trabajo ( $D p^{-1}$ ) dado por la razón del diámetro del disco (D) entre la profundidad de trabajo (p) en intervalos de 4.5, 5.5, 8.0 y 13.0. b) densidad de residuo de caña de maíz de 2 y 4 t ha<sup>-1</sup> cortadas a 40 cm de largo espaciadas uniformemente a lo largo de 6 m del tanque de suelos. Las variables de respuesta consideradas fueron: fuerza de tiro (Fx), penetración (Fy) y eficiencia de corte de residuos (%). Para cada una de las combinaciones se hicieron tres repeticiones. Para medir la eficiencia del corte de residuos (%) se siguió la metodología descrita por Kushwaha *et al.* (1986).

Para la evaluación de la combinación de disco-abresurcos, se seleccionó el disco liso comercial (C1) fijando su profundidad de trabajo a ( $D p^{-1} = 4.5$ ) con dos tipos de abresurcos: el doble disco (DD) con diámetro de disco de 300 mm, ángulo de corte de 5°, ángulo de penetración de 72° y profundidades de trabajo (p) de 30, 40, 50 y 70 mm; y el cincel abridor con alas (CTW) con ángulo de ataque en la punta de 15°, ancho total de alas de 50 mm y con profundidades de trabajo de 30, 50, 70, 100, 120 y 150 mm. Para ambos casos se determinaron Fx y Fy expresadas en la ecuación:

$$F(x,y)=Kd^h$$

Donde: K y h son constantes generadas por la regresión y d la profundidad de trabajo (Tice y Hendrick, 1991; 1992).

Para todas las evaluaciones, se utilizó un suelo de textura franco-arenosa, tipo Río Cotaxtla (94.23% arena, 4.21% limo y 1.56% arcilla), a una humedad de trabajo promedio de 28% con base en peso seco.

Para el análisis de los datos de fuerzas y su transformación de dominancia de tiempo a dominancia de frecuencia se empleó el algoritmo de la transformada rápida de fourier contenida en el paquete de Matlab (Mathworks, 1994) siguiendo la metodología descrita por Campos (1995).

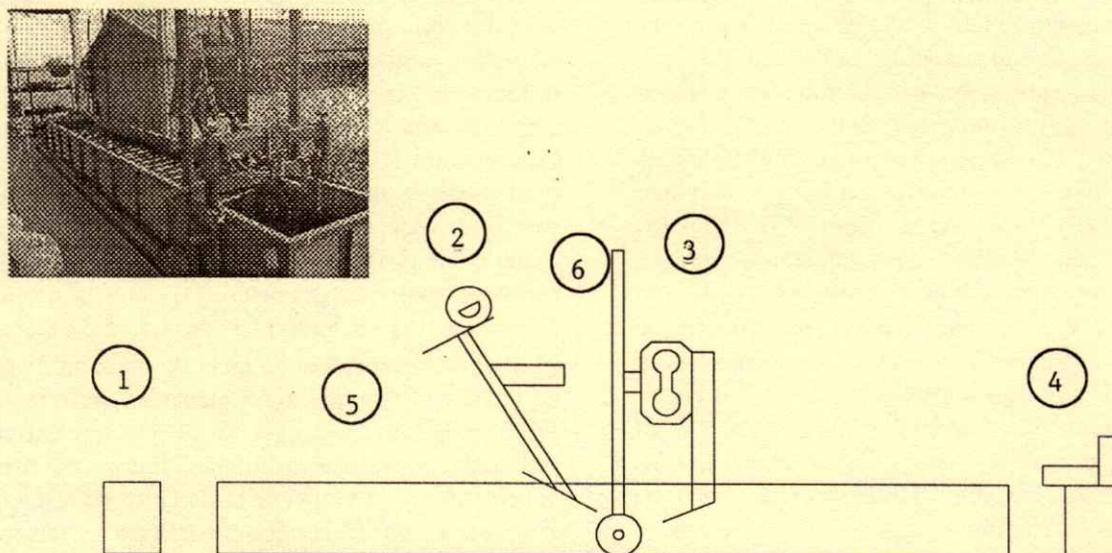


Figura 1. Sistema de simulación de fuerzas (SSF). (1) Transmisión de desplazamiento-fuerza de tiro (2). Herramienta acondicionadora de suelo. (3) Transductor octagonal. (4) Convertidor analógico digital. (5) Tanque de suelos. (6) Carro porta implementos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Simulación de Fuerzas

El desarrollo del sistema de simulación de fuerzas se muestra esquemáticamente en la Figura 1. Esta facilidad permite la evaluación continua en condiciones controladas de las herramientas de labranza pudiendo acondicionar el suelo en 4 h a 85% de las condiciones reales; como se muestra en el Cuadro 1. En condiciones de campo, se requeriría de dos a tres ciclos. Los componentes que integran este sistema son: a) tanque de suelos de 7.0 x 0.60 x 0.60 m, b) carro porta implementos con ajuste de profundidad de labranza de 0.03 a 0.40 m en

intervalos de 0.01 m y ancho de corte de 0.40 m, c) acondicionador de suelo, con sistema de vibrador-compactador y sistema de labranza, d) transmisión con moto-reductor reversible.

### Análisis de Fuerzas

Para el análisis de las fuerzas de cada tratamiento, se empleó el sistema de la potencia espectral (PSD) que permite reacondicionar las variables muestreadas de un sistema de dominancia de tiempo entregadas por el convertidor analógico digital (Daq-book 200) a dominancia de frecuencia utilizando la facilidad del algoritmo de la transformada rápida de Fourier, contenida en el paquete de MatLab (Mathworks,

Cuadro 1. Valores de la resistencia a la penetración en el tanque de suelos y campo con diferentes niveles de acondicionamiento de suelo.

Profundidad del penetrómetro mm	Número de pasos en el tanque de suelos					Campo	
	0	1	2	3	4		5
	kPa						
0	98.16	245.12	560.11	669.82	724.68	906.86	1279.02
50	140.89	546.25	652.21	786.18	796.86	1121.48	1504.22
100	129.92	690.32	591.58	786.46	852.58	1235.23	1466.68
150	559.24	823.71	798.30	934.87	981.06	1429.15	1634.14

1994). Este sistema tiene la ventaja de poder determinar la amplitud y la frecuencia de la falla de suelo debido a la fractura del mismo, eliminando picos de fuerzas casuísticos. El programa desarrollado para el ambiente Matlab, requiere indicar la velocidad de muestreo en potencia de  $2^n$  ( para el caso particular fue de 256 Hz), que permita reproducir la demanda de fuerza como producto de la falla del suelo y la ventana Hanning más apropiada de agrupación de datos a diferencia de la ventana Kaiser, propuesta por Lickso y Harrison (1988), que requieren de una reagrupación

de datos más compleja. En la Figura 2a se muestran las gráficas de fuerzas con dominancia de tiempo y su conversión a dominancia de frecuencia (Figura 2b) para un arreglo CTW a una profundidad de cincel de 150 mm. En éste indica que la fuerza media para  $F_y = 750$  N y para  $F_x = 1000$  N con una frecuencia de falla de 1.0 Hz. Esta frecuencia tan baja indica que el disco cortador contribuye significativamente al corte de suelo reduciendo el efecto de estallamiento del suelo producto del trabajo del cincel.

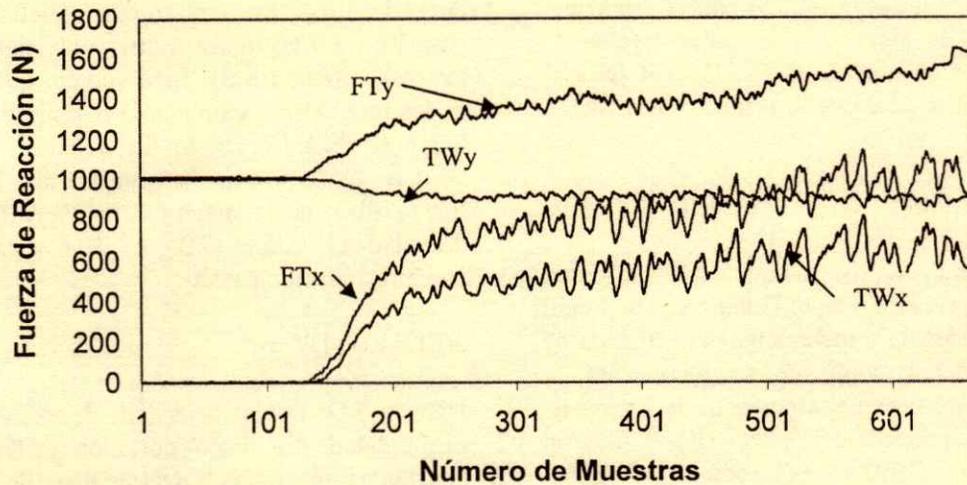


Figura 2a. Fuerzas en tiempo real de un sistema CTW. Mostrando la fuerza vertical (TWy) y horizontal (TWx) del cincel abridor con alas, y las fuerzas totales verticales (FTy) y horizontales (FTx) del cincel combinado con el disco cortador C1.

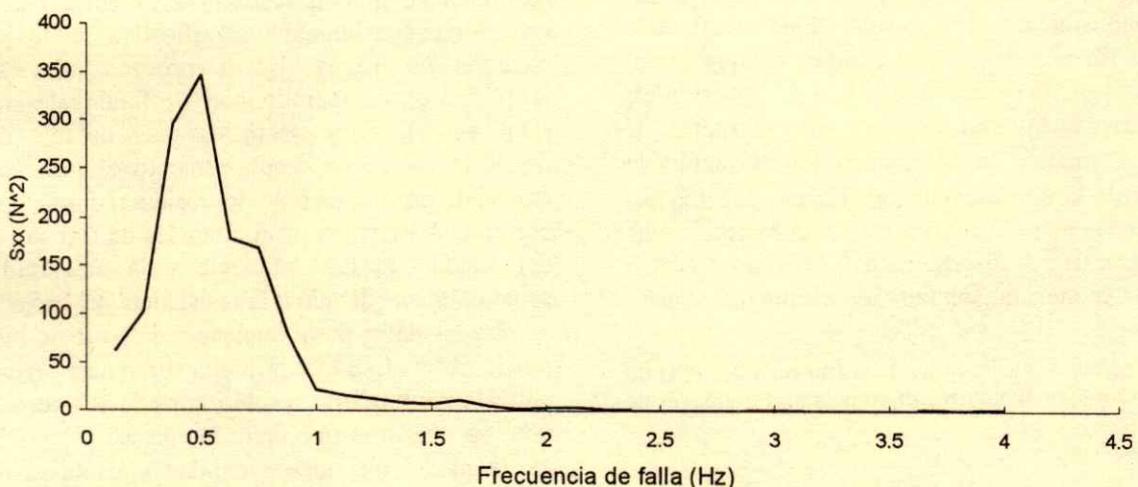


Figura 2b. Análisis espectral de un sistema (CTW) para la fuerza de tiro.

### Transductores de Fuerzas

Se diseñó un transductor de fuerzas del octagonal extendido (Figura 1), con una capacidad de fuerza de tiro y penetración de 5 kN y un momento máximo de 300 kN-m con un factor de seguridad de 3, que permite la medición de las fuerzas  $F_x$ ,  $F_y$  y el momento, con el cual se calcula la localización de la fuerza resultante. La sensibilidad obtenida en micro voltios por Newton por voltaje de excitación ( $\mu V N^{-1} V^{-1}$ ) fue de 1.26 para ( $F_x$ ) y 1.08 para ( $F_y$ ) con una sensibilidad cruzada de 2%. Valores similares a los obtenidos por Godwing (1975) con la diferencia de la localización de los nodos de concentración de esfuerzos para la medición de la  $F_y$ , la cual para el presente diseño fue a  $32.25^\circ$  con respecto a la fuerza de tiro.

### Cortadores de Residuos

Las magnitudes de las fuerzas que actúan sobre un disco liso cortador C1 están en el Cuadro 2, en el cual se muestra una tendencia a incrementar la demanda de fuerza de penetración conforme se incrementa la profundidad de corte en comparación de la fuerza de tiro; proporciones similares de  $F_y F_x^{-1}$  (R) obtuvieron Nieuwenburg *et al.* (1992) sobre todo a índices de profundidades de corte en el intervalo de 4.5 a 5.5. De las ecuaciones de respuesta obtenida, para cada uno de los discos evaluados en suelos sin residuo (Cuadro 3) puede observarse que el coeficiente exponencial refleja la fuerza de reacción del suelo y la uniformidad de acondicionamiento del mismo. Este coeficiente empírico es función de las propiedades dinámicas del suelo como son: densidad aparente ( $\zeta$ ), cohesión(c), ángulo de fricción interna del suelo ( $\phi$ ) y variables de suelo-disco como son la adhesión ( $c_a$ ) y el ángulo de penetración de la herramienta ( $\varphi$ ). La intersección (k) de la ecuación logarítmica representa las características de los discos. Estos coeficientes (k) en la ecuación exponencial son numéricamente diferentes

**Cuadro 2.** Fuerzas que actúan en disco liso cortador (C1) de residuos de 42 cm de diámetro a diferentes profundidades de trabajo.

Variable	Profundidad (mm)					
	30	50	70	100	120	150
$F_x$ (N)	33.6	86	160	308	431	650
$F_y$ (N)	75	214	429	896	1034	2064
$R=F_y F_x^{-1}$	2.23	2.5	2.7	2.9	3.03	3.18

**Cuadro 3.** Ecuaciones de respuestas y medias de las magnitudes de las fuerzas que actúan en discos cortadores de residuos de 42 cm de diámetro en función de la profundidad de trabajo ( $p = 7$  cm) en suelo sin residuo.

Disco cortador	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	Medias	
			$F_x$ (N)	$F_y$ (N)
C1	$4.45(p)^{1.84}$	$7.80(p)^{2.06}$	175.4	385.7
C2	$4.05(p)^{1.86}$	$6.19(p)^{2.04}$	198.5	387.3
C3	$3.91(p)^{1.82}$	$6.46(p)^{2.02}$	168.5	353.3
C4	$4.49(p)^{1.82}$	$6.58(p)^{2.03}$	172.7	360.9
C5	$4.41(p)^{1.82}$	$7.67(p)^{2.04}$	174.9	363.9

unos de otros. Sin embargo, el análisis de varianza para  $F_x$  y  $F_y$  no muestra diferencia significativa entre los discos (Cuadro 3). Esto sugiere que las secciones de las muescas no cambian la magnitud de  $F_x$  y  $F_y$  de lo que se obtendría con un disco liso.

Un análisis complementario del incremento de fuerza (dF), en la magnitud de  $F_x$  y  $F_y$  debido a la densidad de residuo (SD), se llevó a cabo empleando la expresión exponencial:

$$d(F) = k_d (SD)^a (p)^b$$

Donde: SD es la densidad de residuos, p es la profundidad del disco cortador y  $K_d$ , a y b son constantes generadas por el análisis de regresión. Las ecuaciones complementarias dF obtenidas, como una función de SD y d están dadas en el Cuadro 4. Cuando se analizan las expresiones anteriores de los valores medidos ( $F+dF$ ) para todos los discos, puede desprenderse que la resistencia al corte del residuo hace una contribución significativa a los valores medidos de  $F_x$  y  $F_y$  a profundidades someras ( $D p^{-1} = 8.0$ ) comparado con profundidades mayores ( $D p^{-1} = 4.5$ ). Este efecto es más notable con  $F_y$ , donde la fuerza de desplazamiento es principalmente empleada para el empuje del residuo sobre el suelo sin cortarla. A mayores profundidades de trabajo, el corte del residuo es más eficiente y la magnitud  $F_y$  es principalmente debido a la resistencia del suelo.

En los datos de la eficiencia de corte de los discos puede observarse que hay una diferencia significativa entre la cantidad de residuo cortado (Cuadro 5). Los análisis muestran que entre los discos C2 y C3 tienen en promedio una menor calidad y cantidad de corte que aquellos mostrados por los discos C1 y C5, y la mejor eficiencia de corte se obtuvo con el disco C4. El más bajo comportamiento lo tuvo el disco C2, resultado de su pobre habilidad de corte a profundidades someras. El funcionamiento del disco

**Cuadro 4. Incremento de Fuerzas horizontal (dFx) y vertical (dFy) que actúan en discos cortadores en función de la densidad de residuos (SD) y profundidad de trabajo (p).**

Disco cortador	dFy (N)	dFx (N)	dFy <sup>1</sup> (N)	dFx (N)
C1	41.70(SD) <sup>2.09</sup> p <sup>-0.852</sup>	7.45(SD) <sup>1.91</sup> p <sup>-0.148</sup>	316.1	58.3
C2	81.28(SD) <sup>2.21</sup> p <sup>-1.090</sup>	10.45(SD) <sup>1.96</sup> p <sup>-0.276</sup>	249.1	22.5
C3	36.30(SD) <sup>2.24</sup> p <sup>-0.669</sup>	9.27(SD) <sup>1.93</sup> p <sup>-0.250</sup>	266.3	32.8
C4	40.74(SD) <sup>2.24</sup> p <sup>-0.740</sup>	14.13(SD) <sup>1.90</sup> p <sup>-0.478</sup>	320.8	60.9
C5	27.54(SD) <sup>2.18</sup> p <sup>-0.571</sup>	8.11(SD) <sup>1.95</sup> p <sup>-0.162</sup>	172.5	26.8

<sup>1</sup> Valores calculados para un SD de 4 t ha<sup>-1</sup> y una p de 10 cm.

**Cuadro 5. Eficiencia de corte de residuos de caña de maíz con discos cortadores a diferentes índices (D p<sup>-1</sup>) de profundidades de corte y comparación de medias por Tukey.**

Disco cortador	Media*	4 t ha <sup>-1</sup>				2 t ha <sup>-1</sup>			
		4.5	5.5	8.0	13.0	4.5	5.5	8.0	13.0
	%								
C1	61.7 bc	87.7	81.1	59.5	0.0	100.0	91.8	73.5	0.0
C2	55.0 c	88.1	87.7	30.3	0.0	100.0	100.0	34.0	0.0
C3	56.7 c	92.0	76.0	50.5	0.0	100.0	78.7	54.5	0.0
C4	74.9 a	100.0	88.5	75.0	52.0	100.0	100.0	73.3	10.0
C5	63.8 b	88.0	86.0	65.0	0.0	100.0	93.3	78.3	0.0

\* Diferencia significativa a 0.05.

C3 estuvo influenciado por una sección de muesca más pronunciada donde a profundidades someras de trabajo únicamente atrapa al residuo pero no lo empuja contra la superficie del suelo, con el resultado que su habilidad para el corte de residuo es muy pobre. Este disco tiene un mejor comportamiento a profundidades mayores ( $D p^{-1} = 4.5$ ) donde la sección de la muesca trabaja debajo de la superficie del suelo. Los discos C1 y C5 tuvieron un comportamiento similar. A profundidades de trabajo poco profundas ( $D p^{-1} = 8$ ), el disco C5 mostró una mejora en su eficiencia de corte. La calidad de funcionamiento del disco C4 es significativamente mayor a profundidades someras comparada con los otros discos. Esto es debido a un ángulo más agudo del borde cortante del disco y a un porcentaje más alto de concavidad de la sección de muesca comparado con el de C3. Los resultados obtenidos de la eficiencia de corte, comparados con los de Kushwaha *et al.* (1986) muestran una mejoría para el disco experimental de muescas C4 de 15%.

### Abridores de Surcos

El Cuadro 6 muestra la tendencia del incremento de la magnitud de la fuerza de tiro (Fx) conforme se incrementa la profundidad de trabajo para un sistema

combinado disco cortador de residuos-chuzo abridor (CTW). El Cuadro 7 muestra las magnitudes de fuerza que actúan en el sistema de doble disco; en este cuadro se aprecia una mayor demanda de fuerza de penetración en comparación con un sistema CTW para la misma profundidad de trabajo. Esto indica que este sistema requiere de peso adicional para penetrar en el residuo o abrir el surco.

**Cuadro 6. Fuerzas que actúan en un sistema disco cortador-chuzo abridor (CTW).**

Variable	Profundidad (mm)					
	30	50	70	100	120	150
Fx (N)	133	252	384	601	754	997
Fy (N)	555	607	645	687	710	738
R=Fy Fx <sup>-1</sup>	4.02	3.05	2.40	1.67	0.94	0.74

Profundidad de disco: 100 mm, ancho de chuzo: 20 mm, profundidad de TW: 30...150 mm.

**Cuadro 7. Fuerzas que actúan en un Sistema de doble disco.**

Variable	Profundidad (mm)			
	30	40	50	70
Fx (N)	103	214	372	540
Fy (N)	308	574	871	1028
R=Fy Fx <sup>-1</sup>	2.99	2.68	2.34	1.9

Ángulo de disco: 15°, diámetro de discos: 300 mm, ángulo de penetración: 72°.

## CONCLUSIONES

- El sistema de simulación de fuerzas (SSF) desarrollado en su conjunto presenta una confiabilidad similar de 85% a las encontradas por otros autores con relación al acondicionamiento del suelo indicado por la resistencia a la penetración. Aportando, además, una metodología de muestreo de fuerzas y su análisis de mayor precisión con una reproducción del fenómeno de 256 puntos por segundo.
- El uso del SSF en la evaluación de nuevas herramientas de labranza, donde se pueden aislar variables y observar el efecto de éstas sobre su calidad de funcionamiento y la predicción del requerimiento de fuerzas  $F_x$  y  $F_y$ , puede ayudar a la aceleración del desarrollo de herramientas más precisas y específicas para diferentes tipos de labranza y coberturas.
- En la evaluación de la eficiencia de corte de discos se aprecia lo sensible de éstos a la variación del índice  $D p^{-1}$ . Esto indica que el intervalo óptimo de trabajo es de 4.5 a 5.5. Índices menores que éstos trae como consecuencia semilla depositada sobre residuos y sin contacto con el suelo.
- La fuerza que contribuye en forma significativa a incrementar el corte de residuos (CR) es la  $F_y + dF_y$ , que para el caso de la presente investigación fue a partir de 1200 N para lograr una eficiencia de CR superior a 90%. La magnitud de la  $F_x$  representa sólo 33% de  $F_y$ , lo cual significa una baja demanda de energía para la operación de los discos en condiciones de campo.
- Se requiere investigación en laboratorio para determinar el grado de micro-estructura requerido en la cama de siembra con diferentes texturas y propiedades dinámicas del suelo para obtener un porcentaje alto de nacencia de semilla en condiciones

de no-labranza. Con esta información, el SSF sería útil en la evaluación de nuevas geometrías y combinaciones de herramientas, evaluando la disgregación en el perfil del tanque de suelo en términos de índices de energía.

## LITERATURA CITADA

- Campos M., S.G. 1995. Force measurement-recording and data analysis for tillage tools. *Agric. Mechanization in Asia, Africa and Latin America* 26(4): 13-16.
- Godwing, R.J. 1975. An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. *J. Agric. Engng. Res.* 20: 347-352.
- Godwing, R.J. y G. Spoor. 1977. Soil failure with narrow tines. *J. Agric. Engng. Res.* 22: 213-228.
- Hettiaratchy, D.R.P. 1988. Theoretical soil mechanics and implement design. *Soil Tillage Res.* 11: 325-374.
- Hunt, D. 1983. *Maquinaria agrícola*. 7a. edición. Limusa. México, D.F.
- Kepner, R.A., R. Bainer y E.C. Barger, 1980. *Principles of farm machinery*. 3a edición. Editorial AVI Publishing Company. Westport, CT.
- Kushwaha, R.L., A.S. Vaishnav y S.G. Zoerb. 1986. Soil bin evaluation of disc coulters under no-till crop residue conditions. *Trans. ASAE* 29(1): 40-44.
- Lickso, Z.J. y P.H. Harrison. 1988. Acquisition and processing of soil reaction forces on tillage tools. *Trans. ASAE* 3(1): 315-318.
- Mathworks, Inc. 1994. *Matlab for Windows user's guide*. Version 4.2b. Natick, MA.
- McKyes, E. 1978. The calculation of draft forces and soil failure boundaries of narrow cutting blades. *Trans. ASAE* 21 20:24.
- McKyes, E. 1985. *Soil cutting and tillage*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Nieuwenburg, P.J., L. Speelman y H.E. Wensink. 1992. An evaluation of some disk coulters designs. *J. Agric. Engng Res.* 51: 67-80.
- Tice, E.M. y J.G. Hendrick. 1991. Disc coulters forces: Evaluation of mathematical models. *Trans. ASAE.* 34(6): 2291-2297.
- Tice, E.M. y J.G. Hendrick. 1992. Disc coulters operating characteristics. *Trans. ASAE* 35(1): 3-10.

# EFFECTO DEL METASILICATO DE SODIO SOBRE EL CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE CHÍCHARO

## Effect of Sodium Metasilicate on the Growth of Cultivated Pea

Benjamín Miramontes-Flores<sup>1†</sup>, León Arroyo-Vázquez<sup>1</sup>, Mario H. Alva-Reséndiz<sup>1</sup> y Tiburcio Espiricueta-Reyna<sup>1</sup>

### RESUMEN

En México, los Andisoles ocupan una superficie de 23 511 km<sup>2</sup> y la mayoría presentan deficiencia de fósforo y problemas de toxicidad debido a la presencia de óxidos de hierro y aluminio. En estos suelos, el Andisol húmico es la subunidad dominante; cubre cerca de 538 000 ha y, no obstante que es el más afectado por los óxidos señalados, se encuentra dedicado casi todo a la agricultura de temporal. En el presente trabajo, se localizó un Andisol húmico en los lomeríos del volcán Ocopiasco del ejido de Topilejo, D.F. Se eligió la parcela de uno de los ejidatarios y de ésta se tomó una muestra de 120 kg de suelo con la cual se montó un experimento en el que se probó metasilicato de sodio como una alternativa para bloquear la adsorción de los fosfatos por los óxidos de aluminio y hierro. El experimento se estableció con un diseño experimental completamente aleatorio en el que se aplicaron cinco tratamientos de metasilicato con cinco repeticiones, adicionándoles a cada tratamiento la cantidad equivalente de yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) para evitar el efecto dispersante del sodio. En cada unidad experimental, se sembró chícharo (*Pisum sativum*) y a 48 días de edad se tomaron los datos de altura de la planta y biomasa fresca y seca de la vaina. A través del análisis estadístico se encontró que los tratamientos tuvieron un efecto significativo y altamente significativo sobre la altura de la planta y las biomasa fresca y seca, respectivamente; el mejor tratamiento fue el de 3.28 cmol(+) de silicio kg<sup>-1</sup> de suelo.

**Palabras clave:** *Pisum sativum*, Andisoles, óxidos de aluminio y hierro, adsorción, toxicidad.

<sup>1</sup> Departamento de Producción Agrícola y Animal, Universidad Autónoma Metropolitana-X. Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Del. de Coyoacán, 04960 México, D.F.

<sup>†</sup> Autor responsable ([bmflores@cuevatl.uam.mx](mailto:bmflores@cuevatl.uam.mx))

Recibido: Septiembre de 2002. Aceptado: Enero de 2004.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 169-174.

### SUMMARY

In Mexico, Andisols occupy an area of 23 511 km<sup>2</sup>. The Humic andisol, the dominant subunit, includes about 538 000 ha. Most of this area is dedicated to cropping under rainfed conditions. Due to the toxicity of aluminum, crop yields are usually very low. In this work, a Humic andisol was located and a soil sample of 120 kg was collected and tested under greenhouse conditions to neutralize the effect of aluminum present in soils. The experiment was a totally randomized design with five treatments of sodium metasilicate. In order to avoid the sodium dispersant effect, the same equivalent quantity of gypsum (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) was added to each treatment. Pea (*Pisum sativum*) was seeded and the effect of the different treatments on plant growth was determined by the height and weight of the plants as expression of growth and the plants were harvested after 48 days. The statistical analysis of the collected data indicated significant effect on plant height and a highly significant effect on fresh and dry biomass, respectively. The best treatment was 3.28 cmol(+) silica kg<sup>-1</sup> soil.

**Index words:** *Pisum sativum*, Andisols, iron and aluminum oxides, sorption, toxicity.

### INTRODUCCIÓN

En los suelos ácidos, los cuales representan entre 40 y 70% de las tierras agrícolas del mundo, el aluminio y hierro son uno de los factores edáficos que limitan la productividad de los cultivos (Martínez *et al.*, 2001).

Los Andisoles, cuyo pH es en general ácido, ocupan en México una superficie de 23 511 km<sup>2</sup> (INEGI, 1999) y dentro de éstos la subunidad dominante es el Andisol húmico; se distribuye a través del Eje Neovolcánico en 538 000 ha y se encuentra dedicado casi todo a la agricultura de temporal. En Andisoles semejantes a los del sitio experimental, Poudel y West (1999), al estudiar su desarrollo y sus

características, encontraron que estos suelos contienen materiales amorfos, como alófono e inmogolita en todos los perfiles estudiados, y que tienen un pH en NaF mayor que 9. En la fracción arcilla presentaban halosita, gibsita, goetita, hematita y cristobalita. Su capacidad de fijación de fósforo variaba de 6.944 a 14.208  $\mu\text{g}$  de  $\text{P g}^{-1}$  de suelo y que ésta estaba relacionada estrechamente con la presencia de Al extractable con oxalato.

En los Andisoles de pH inferior a 5.0, se libera aluminio activo de los aluminosilicatos complejos (Delumeau *et al.*, 1998), afectando en las plantas superiores la elongación de las células y el crecimiento de cofia.

En algunos trabajos, como los realizados por Igual y Rodríguez (1997), se ha encontrado que el aluminio activo reduce la nodulación y fijación del nitrógeno en las plantas de casuarina, en especial cuando las concentraciones de aluminio rebasan 400  $\mu\text{M}$  a pH 4.0.

En plántulas de maíz de tres días de edad, Huttová *et al.* (1998) encontraron que el aluminio altera los polipéptidos de las proteínas citoplasmáticas de las puntas y base de la raíz y coleoptilos.

Se ha observado que el aluminio se acumula en la pared celular de los vegetales a través de su reacción con el pectato de calcio y que su adsorción varía en función de los ligandos presentes en el suelo, siendo el citrato el más eficiente para su bloqueo, le sigue el malato y después el fluoruro (Blamey *et al.*, 1997).

La respuesta a la toxicidad del aluminio varía entre los cultivos, tal es caso de los genotipos de triticale estudiados por Zhang y Jessop (1998), quienes encontraron que los genotipos africanos Tahara, Tahara "S" y Abacus son más tolerantes al aluminio que los genotipos australianos.

Cuenca *et al.* (2001) han encontrado que la tolerancia al aluminio de algunas plantas maderables, que crecen y se desarrollan en suelos ácidos, como es la *Clusia multiflora*, se debe a que las micorrizas arbusculares que conviven con estas especies vegetales bloquean la adsorción de los óxidos de aluminio y hierro y más aún si estos hongos micorrízicos provienen de suelos ácidos.

Los ácidos orgánicos cítrico, málico y succínico, excretados por las raíces de las plantas superiores, quelatan el aluminio activo del suelo, disminuyendo su efecto fitotóxico, como lo señalaron Gaume *et al.* (2000); estos investigadores encontraron, además, que la toxicidad del aluminio disminuía incrementando la concentración de fósforo en el sustrato de cultivos de

maíz (*Zea mays*) y trigo (*Triticum aestivum* L.) (Kinraide y Sweeney, 2000).

Se han probado diversos tratamientos para bloquear el efecto del aluminio activo presente en los Andisoles, como la incorporación de materia orgánica para incrementar el contenido de ácidos orgánicos (Dao *et al.*, 2001); el encalado para elevar el pH del suelo y precipitar el aluminio activo (Oettler y Horst, 2000); la aplicación de silicatos solubles para incrementar la relación silicio-óxidos libres (Corrales *et al.*, 1997) y la adición de zeolitas para estabilizar el aluminio soluble del suelo (Moirou y Xenidis, 2001).

Violante y Pigna (2002), en un estudio sobre la absorción de arsenatos y fosfatos utilizando filosilicatos, óxidos metálicos, complejos organo-minerales sintéticos y suelos afectados por pH (4.0 a 8.0), encontraron que los minerales no cristalinos, como la gibsita, boemita, alófono y caolinita, adsorbían más fosfatos que arsenatos. Catherine y Matthew (2002) señalaron que el ácido silícico es un adsorbente químico muy fuerte de los óxidos de hierro y que la adsorción del arsénico sobre goetita en presencia de silicio decrece conforme aumentan el pH y la concentración de este elemento, lo cual atribuye a la creación desfavorable de un campo electrostático.

El presente trabajo tiene como objetivo probar la eficiencia del metasilicato de sodio para bloquear la absorción de los fosfatos por los óxidos de hierro y aluminio presentes en los Andisoles húmicos dentro de los cuales se localiza el sitio experimental.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del Sitio Experimental

La muestra de suelo utilizada para instalar el experimento se colectó en una parcela de 15 000  $\text{m}^2$ , ubicada en los lomeríos del volcán Ocopiasco del ejido de Topilejo de la Delegación de Tlalpan, Distrito Federal, y cuyo propietario es el Sr. Elías Hernández-Rodríguez. El suelo de la parcela de referencia corresponde a un Andisol húmico, como se observa en la hoja E14A49, publicada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1980).

Para tomar la muestra de suelo de 120 kg, se abrieron cinco pozos de 1  $\text{m}^2$  por 15 cm de profundidad, distribuidos uno en el centro y los cuatro restantes en puntos equidistantes entre el centro y las cuatro esquinas de la parcela. La tierra extraída de los cinco sitios se mezcló y se colocó en bolsas de

plástico, las cuales se trasladaron al laboratorio donde la tierra se secó al sol, se pasó por un tamiz del número 10, se mezcló y se guardó nuevamente en bolsas de plástico.

En la muestra de suelo seca y tamizada, se realizaron, por triplicado, los análisis físicos y químicos: reacción del suelo (pH 1:2), densidad aparente (Da), nitrógeno nítrico (N-NO<sub>3</sub>), nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>4</sub>), fósforo aprovechable (P), potasio aprovechable (K), óxidos de hierro y aluminio (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y porcentaje de saturación (PS). Los procedimientos para realizar los análisis señalados se encuentran descritos en Sparks (1996) y Arnold (1986).

Para bloquear el efecto de adsorción de los óxidos de aluminio y hierro, cuyo contenido total fue de 7.08 cmol(+) kg<sup>-1</sup> de suelo (1.28 de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 5.80 de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), se consideró conveniente cubrir un intervalo de tratamientos comprendido entre 0 y 13.12 cmol(+) de metasilicato de sodio kg<sup>-1</sup> de suelo, dentro del cual podría variar la cantidad total de óxidos libres.

Las unidades experimentales fueron macetas del número 8 con 4 kg de suelo seco y tamizado a las cuales se aplicaron 0, 3.28, 6.56, 9.84 y 13.12 cmol(+) de metasilicato de sodio y los mismos cmol(+) de yeso kg<sup>-1</sup> de suelo para contrarrestar el efecto dispersante del sodio (Cuadro 1). Los tratamientos se repitieron cinco veces y cada una de las 25 unidades experimentales se fertilizó con la fórmula 200-160-160. Se sembraron cinco semillas de chícharo (*Pisum sativum*) en cada maceta; se regaron a capacidad de campo y se colocaron en invernadero, bajo un diseño completamente aleatorio.

A 48 días de edad, se tomaron los datos de altura de las plantas y pesos de la vaina fresca y seca a 70 °C. Los datos se sometieron a análisis de varianza y prueba de comparaciones múltiples de medias de Tukey (DSH), para evaluar el efecto del metasilicato de sodio sobre el crecimiento del cultivo y determinar el mejor tratamiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características físicas y químicas de los suelos utilizados en el experimento se presentan en el

Cuadro 2. Datos de las características físicas y químicas de los suelos utilizados en el experimento.

Característica	pH	Da	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P	K <sup>+</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>				cmol(+) kg <sup>-1</sup>	
Media	5.6	1.01	0	10.9	0.81	46.3	1.28	5.80

Cuadro 1. Cantidades en gramos y cmol(+) de metasilicato de sodio y yeso aplicadas a las macetas.

Metasilicato de sodio		Yeso	
g maceta <sup>-1</sup>	cmol(+) kg <sup>-1</sup> de suelo	g maceta <sup>-1</sup>	cmol(+) kg <sup>-1</sup> de suelo
0	0	0	0
8	3.28	11.28	3.28
16	6.56	22.56	6.56
24	9.84	33.84	9.84
32	13.12	45.12	13.12

Cuadro 2; los datos indican que son suelos ligeramente ácidos, con densidades aparentes cercanas a 1 g cm<sup>-3</sup>, deficientes en NPK y que contienen cantidades elevadas de óxidos de aluminio y hierro que pueden reducir el crecimiento y desarrollo de algunos cultivos, como el maíz que ocupa la mayor superficie en la zona.

La acumulación de hierro y aluminio en los Andisoles del sitio experimental está dominada por procesos de meteorización *in situ*, ocurridos durante su desarrollo. Ugolini y otros investigadores, citados por Shoji y Nanzyo (1993), han descrito estos procesos, conocidos como andisolización.

Las deficiencias de fósforo en los Andisoles se pueden atribuir a la abundancia de óxidos de hierro y aluminio, lo cual es típico de los suelos de origen volcánico o altamente intemperizados (Agbenin, 2003), como es el caso de los Alfisoles de sabana, en los cuales existe una relación estrecha entre la carencia de fósforo y la abundancia de óxidos de aluminio y hierro extraíbles con ditionito y oxalato.

Se ha observado que el maíz criollo cultivado en el área de estudio supera en rendimiento a la mayoría de las variedades comerciales introducidas; esto probablemente se debe a la adaptabilidad del cultivo al exceso de aluminio de los suelos. Gaume *et al.* (2000) han reportado que la tolerancia al aluminio de algunos cultivares de maíz se debe a que éstos secretan ácidos orgánicos en su zona radicular, quelatan el aluminio y liberan el fósforo adsorbido.

El silicio bloquea la absorción del aluminio, como señalaron Corrales *et al.* (1997), quienes establecieron plantas de maíz sensibles a este elemento adicionando

Cuadro 3. Datos de altura de la planta de chícharo y biomásas fresca y seca de la vaina a 48 días de edad.

	Tratamientos (cmol(+)) de metasilicato de sodio kg <sup>-1</sup> de suelo				
	0	3.28	6.56	9.84	13.12
	Altura de planta (cm)				
Réplicas					
1	20.25	21.83	20.46	10.50	18.00
2	18.65	21.15	17.00	18.35	13.87
3	14.16	23.50	16.80	18.05	13.73
4	14.65	18.60	12.75	19.01	3.45
5	18.55	26.20	5.50	13.60	11.70
Media	17.25	22.26	14.50	15.90	12.15
	Vaina fresca (g)				
Réplicas					
1	24.39	30.38	32.62	22.80	13.94
2	20.62	36.58	10.25	15.15	15.05
3	16.94	33.48	27.02	33.30	28.09
4	20.65	34.44	23.30	24.49	19.03
5	26.03	33.72	24.32	18.25	19.03
Media	21.06	33.72	23.50	22.80	19.03
	Vaina seca (g)				
Réplicas					
1	4.43	6.35	3.51	2.51	2.00
2	3.69	6.84	3.14	3.15	2.16
3	2.78	5.03	4.72	3.35	2.17
4	3.63	4.32	2.55	2.17	2.83
5	4.72	5.74	3.64	3.55	2.50
Media	3.85	5.66	3.51	2.95	2.33

soluciones nutritivas. A un grupo de soluciones nutritivas añadieron silicio y observaron que las raíces de las plantas que crecían en estas soluciones se desarrollaban mejor que las que crecían en las soluciones sin silicio. En el experimento realizado con adiciones de metasilicato de sodio a suelos, en los cuales se cultivó chícharo, se observó un incremento en la altura media de la planta y en las biomásas medias, fresca y seca de la vaina (Cuadro 3).

A través del análisis de varianza de los datos de altura, se observa que los tratamientos con metasilicato de sodio tuvieron un efecto significativo en la altura de la planta de chícharo ( $F_{05 (gl\ 4,20)} = 2.87 < F_{ob} = 3.93 < F_{01 (gl\ 4,20)} = 4.43$ ).

Los datos de altura media de la planta de chícharo 22.26, 17.25, 15.90 y 14.50 cm, correspondientes a los tratamientos 3.28, 0, 9.84 y 6.56 cmol(+) de metasilicato de sodio kg<sup>-1</sup> de suelo, fueron estadísticamente iguales o no tuvieron diferencia significativa honesta (DSH). La media de la altura de las plantas de chícharo 22.26 cm, correspondiente al tratamiento 3.28 cmol(+) de metasilicato de sodio kg<sup>-1</sup> de suelo, fue diferente a la media 12.15 cm correspondiente al tratamiento 13.12 cmol(+) de metasilicato de sodio kg<sup>-1</sup> de suelo. Esta diferencia en la altura media de las plantas de chícharo,

posiblemente se debió a que el tratamiento mencionado tuvo el mayor efecto negativo sobre el crecimiento del cultivo.

En el análisis de varianza de los datos del peso fresco de la vaina de chícharo se encontró que los tratamientos con metasilicato de sodio tuvieron un efecto altamente significativo ( $F_{05 (gl\ 4,20)} = 2.87 < F_{ob} = 4.78 > F_{01 (gl\ 4,20)} = 4.43$ ).

Los datos de peso fresco medio de la vaina de chícharo 23.50, 22.80, 21.06 y 19.03 g, correspondientes a los tratamientos 6.56, 9.84, 0 y 13.12 cmol(+) de metasilicato de sodio kg<sup>-1</sup> de suelo, fueron estadísticamente iguales, es decir, no mostraron diferencia significativa honesta (DSH). Las medias del peso fresco de la vaina de chícharo 33.72 y 23.50 g, correspondiente a los tratamientos 3.28 y 6.56 cmol(+) de metasilicato de sodio kg<sup>-1</sup> de suelo, tampoco mostraron diferencia significativa honesta (DSH). La media del peso fresco de la vaina de chícharo 33.72 g, correspondiente al tratamiento 3.28 cmol(+) de metasilicato de sodio fue estadísticamente igual a la media del peso fresco del tratamiento 6.56, pero diferente al resto de los tratamientos. El incremento en el peso fresco de la vaina de chícharo logrado con el tratamiento de 3.28 fue de 60% con respecto al testigo.

El análisis de varianza de los datos del peso seco de la vaina de chícharo indica que los tratamientos con metasilicato de sodio tuvieron un efecto altamente significativo ( $F_{05} (gl\ 4,20) = 2.87 < F_{ob} = 14.72 > F_{01} (gl\ 4,20) = 4.43$ ).

Entre los tratamientos 6.56, 9.84 y 13.12 cmol(+) de metasilicato de sodio  $kg^{-1}$  suelo no hubo diferencia significativa (DSH) en las medias del peso seco de la vaina de chícharo, al igual que entre los tratamientos 0, 6.56 y 9.84. En cambio, se observan diferencias significativas entre el tratamiento 3.28 y los demás tratamientos, como se puede ver en el Cuadro 4. El incremento en el peso seco obtenido con el tratamiento de 3.28 fue de 47% con respecto al testigo.

**Cuadro 4. Comparaciones múltiples de Tukey (DSH) del peso seco medio de la vaina de chícharo de los tratamientos al suelo con metasilicato de sodio.**

Media	5.66	3.85	3.51	2.95	2.33
Tratamiento	3.28	0	6.56	9.84	13.12
DSH = $q_{0.05(5,20)} \sqrt{CME/n} = 8.05$ .					

## CONCLUSIONES

- El análisis de varianza muestra una diferencia significativa entre los datos de altura de la planta, pero esta diferencia se debió a que los tratamientos superiores a 3.28 cmol(+) de metasilicato de sodio  $kg^{-1}$  de suelo causaron un decremento en la altura de la misma. No obstante lo anterior, con el tratamiento de 3.28 cmol(+) de metasilicato de sodio  $kg^{-1}$  de suelo se logró incrementar en 29% la altura de la planta, con relación al testigo.

- Los tratamientos que produjeron diferencias significativas en el peso de la biomasa fresca y seca de la vaina de chícharo, en relación con el testigo y los demás tratamientos, fueron los de 3.28 y 6.56 cmol(+) de metasilicato de sodio  $kg^{-1}$  de suelo. Entre los tratamientos 3.28 y 6.56 no hubo diferencia significativa, pero con el primero de éstos se logró incrementar el peso de las biomásas fresca y seca, con relación al testigo, en 60 y 47%, respectivamente.

- Los datos de altura y biomásas fresca y seca del chícharo indican que los tratamientos con metasilicato de sodio para estos suelos deben ser inferiores a 3.28 cmol(+) de metasilicato de sodio  $kg^{-1}$  de suelo, ya que

los tratamientos superiores afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo.

## LITERATURA CITADA

- Agbenin, J.O. 2003. Extractable iron and aluminum effects on phosphate sorption in a savanna Alfisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 589-595.
- Arnold, K. 1986. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. Part 1. Second Edition.* Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Blamey, F.P.C., Z. Ostatek-Boczynski y G.L. Kerven. 1997. Ligand effects on aluminium sorption by calcium pectate. *Plant Soil* 192: 269-275.
- Corrales, I, Ch. Poschenrieder y J. Barceló. 1997. Influence of silicon pretreatment on aluminium toxicity in maize root. *Plant Soil* 190: 203-209.
- Cuenca, G., Z. de Andrade y E. Meneses. 2001. The presence of aluminum in arbuscular mycorrhizas of *Clusia multiflora* exposed to increased acidity. *Plant Soil* 231: 233-241.
- Dao, T.H., L.J. Sikora, A. Hamasaki y R.L. Chaney. 2001. Aluminum and iron by-products and aerobic composting. *J. Environ. Quality* 30: 1693-1698.
- Delumeau, O., M.-A. Pou, F. Montrichard y D.L. Laval-Martin. 1998. Effect of aluminium on NAD<sup>+</sup> kinnase activity of *Euglena gracilis* grown heterotrophically. *Biol. Plantarum* 41: 415-425.
- Gaume, A., F. Mächler y E. Frossard. 2000. Aluminum resistance in two cultivars of *Zea mays* L. Root exudation of organic acids and influence of phosphorus nutrition. *Plant Soil* 234: 73-81.
- Hutová, J., L. Tamás e I. Mistrik. 1998. Quantitative changes in maize cytoplasmic proteins induced by aluminium. *Biol. Plantarum* 41: 547-554.
- Igual, J.M., C. Rodríguez-Barrueco y E. Cervantes. 1997. The effects of aluminium on nodulation and symbiotic nitrogen fixation in *Casuarina cunninghamiana* Miq. *Plant Soil* 190: 41-46.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1980. Carta Edafológica E14A49. 2ª edición. México, D.F.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1999. Estadística del medio ambiente. Tomo I. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México, D.F.
- Kinraide, T.B. y B.K. Sweeney. 2000. Buffered, phosphate-containing media suitable for aluminum toxicity. *Plant Soil* 235: 75-83.
- Martínez, E.M. y V. Loyola V. 2001. Aluminio: Metal tóxico para las plantas. ¿Cómo actúa y cuáles son los mecanismos de tolerancia?. *Ciencia* 52(1 y 2): 25-36.
- Moirou, A. y A. Xenidis. 2001. Stabilization of Pb, Zn and Cd, contaminated soil by means of natural zeolite. *Soil Sediment Contamination* 10: 251-267.
- Oettler, G., S. Wietholter y W.J. Horst. 2000. Genetic parameters for agronomic traits of triticale and other small-grain cereals grown on aluminium toxic soil in southern Brazil. *Plant Breeding* 119: 227.
- Poudel, D.D., D.J. Midmore y L.T. West. 1999. Soil development and fertility characteristics of a volcanic slope in Mindanao, the Philippines. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1258-1273.
- Shoji, S., M. Nanzyo y R. Dahlgren. 1993. Productivity and utilization of volcanic ash soils. pp. 209-251. *In: Shoji, S. et*

- al.* (eds). Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Sparks, D.L. 1996. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Violante, A. y M. Pigna. 2002. Arsenate and phosphate sorption on different clay minerals and soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1788-1796.
- Waltham, C.A. y M.J. Eick. 2002. Kinetics of arsenic adsorption on goethite in the presence of sorbed silicic acid. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 818-825.
- Zhang, X. y R.S. Jessop. 1998. Analysis of genetic variability of aluminium tolerance response in triticale. *Euphytica* 102: 177-182.

# FERTIRRIGACIÓN NITROGENADA, FOSFÓRICA Y PROGRAMA DE RIEGO Y SUS EFECTOS EN MELÓN Y SUELO

Nitrogenous, Phosphoric Fertigation and Watering Program and its Effect on Melon and Soil

Pablo Preciado-Rangel<sup>1†</sup>, Gustavo A. Baca-Castillo<sup>1</sup>, J. Luis Tirado-Torres<sup>1</sup>,  
Josué Kohashi-Shibata<sup>1</sup>, Leonardo Tijerina-Chávez<sup>1</sup> y Ángel Martínez-Garza<sup>2</sup>

## RESUMEN

En recipientes con suelo en condiciones de invernadero, se aplicaron mediante fertirrigación soluciones nutritivas (SN) resultantes de modificaciones a la solución nutritiva universal de Steiner (SNS), para determinar la producción y distribución de biomasa de plantas de melón (*Cucumis melo* L.), su contenido y extracción de nutrimentos, y los cambios causados en algunas características químicas del suelo. Los tratamientos correspondieron a un diseño factorial completo 3<sup>3</sup> y consistieron en nueve SN resultantes de la combinación de tres concentraciones de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (0, 12.5 y 25% del N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> total) y tres de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> (0, 50 y 100%) y de tres programas de riego, en los horarios siguientes: 8:00; 8:00 y 12:30; 8:00, 11:00 y 13:30 h. Las variables evaluadas a 48 y 125 días después del trasplante (ddt) fueron la producción y distribución de la biomasa de raíces, hojas, tallos y frutos, y el contenido y la extracción nutrimental de los mismos, excepto de las raíces; asimismo, el pH, la conductividad eléctrica (CE), N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> intercambiable y P aprovechable del suelo. En el muestreo a 48 ddt, se observó que por efecto del N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se incrementó la biomasa de la raíz, pero no la de la porción aérea; en cambio, dicho nutrimento aumentó a 125 ddt la biomasa aérea. Con el programa de riego: 8:00, 11:00 y 13:30 h, se obtuvo la mayor absorción de Mg por las hojas. El uso de las soluciones nutritivas no modificó la CE, ni el pH del suelo, pero sí el N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> intercambiable y el P aprovechable.

**Palabras clave:** *Cucumis Melo L.*, solución nutritiva Steiner, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, absorción nutrimental.

<sup>1</sup>Instituto de Recursos Naturales, <sup>2</sup>Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

<sup>†</sup> Autor responsable (ppreciado@yahoo.com.mx)

Recibido: Septiembre de 2001. Aceptado: Diciembre de 2003.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 175-186.

## SUMMARY

Nutrient solutions and watering programs applied by fertigation to melon plants (*Cucumis melo* L.) were evaluated. The plants were grown in containers with soil under greenhouse conditions. The objective was to determine the effect of the above factors on the production and distribution of biomass, as well as to study the changes brought about in some soil chemical characteristics. The solutions were modifications of Steiner's universal solution. The experiment was a complete 3<sup>3</sup> factorial design and consisted of the combination of three concentrations of N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (0, 12.5, and 25% of total N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), three of H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> (0, 50, and 100%), and three watering programs (8:00; 8:00, 12:30; 8:00, 11:00, 13:30 h). The variables evaluated were the production and partition of the biomass, the plant nutrient content, and some soil chemical characteristics. The N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> applied (25% of total N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) from transplant to the initial development of the fruit [48 days after transplant (ddt) modified the root but not the shoot biomass. In contrast, ammonia applied (25% of N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) from transplant to fruit maturity (125 ddt) increased biomass production. Phosphorus applied at 100% increased biomass production at fruit maturity. The watering program 8:00, 11:00, 13:30 h showed the highest absorption of Mg by the leaves. Application of the nutrient solutions by fertigation did not modify pH or electric conductivity of the soil, but did increase exchangeable ammonia and available phosphorus.

**Index words:** *Cucumis melo L.*, Steiner nutrient solution, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, plant nutrient content.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) ocupa el tercer lugar en importancia de las hortalizas de México; 90% de la producción se destina a la exportación. La Comarca Lagunera (Durango y

Coahuila) tiene la mayor superficie de cultivo, en el ciclo primavera-verano (ASERCA, 2000).

La fertirrigación consiste en la aplicación de los nutrimentos que requieren los cultivos en el agua de riego mediante un sistema que garantice la uniformidad de su aplicación, como es el caso del riego por goteo. (Dominguez, 1993). Su aplicación diaria en una solución nutritiva (SN) mantiene la humedad del suelo en condiciones óptimas similares a la hidroponía (Kafkafi, 1973), con un alto potencial matricial en la rizosfera (Phene y Sanders, 1976) y un adecuado balance entre el agua y el oxígeno que las raíces demandan (Phene *et al.*, 1973). Dicha SN debe suministrar el agua y los nutrimentos (iones) en concentraciones y distribución adecuadas (Bar-Yosef, 1999). En la fertirrigación, el uso apropiado de la SN se basa en los principios de la hidroponía, mediante los cuales se determinan las condiciones adecuadas para suministrar los nutrimentos. Posteriormente, la SN se adaptará en función del suelo, del clima y de la fenología del cultivo (Cadahía, 1998). Armenta *et al.* (2001) utilizaron la solución nutritiva universal de Steiner (SNS) en el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) con fertirrigación en el valle de Culiacán, Sinaloa; el rendimiento ( $145 \text{ t ha}^{-1}$ ) y la calidad obtenida fueron tan altos como los de los productores; no usaron fertilización de base y la SN requirió de cantidades de fertilizantes considerablemente menores (306-120-246) con relación a las empleadas por dichos productores (450-270-600, con riego por goteo). Con el empleo de la técnica de fertirrigación ya no es necesaria la fertilización de fondo con fertilizantes químicos (Moya, 1994). Burgueño *et al.* (1994) mencionaron que los cultivos manejados con fertirrigación que reciben fertilización de fondo no muestran diferencias significativas en su desarrollo en comparación con los cultivos sin dicha fertilización. Las SN utilizadas comúnmente en fertirrigación son relativamente diluidas para no ocasionar problemas de salinidad en el suelo (Armenta, 1998); pero presentan la desventaja de provocar una baja absorción de P por la planta (Sonneveld y Voogt, 1990; Satti y Al-Yahyai, 1995; Satti *et al.*, 1996; Hu y Schmidhalter, 1997). Una forma de incrementar la absorción de este nutrimento es con la incorporación de una parte del N en forma de  $\text{N-NH}_4^+$  en la solución nutritiva (Hageman, 1984; Feigin, 1990; Cao y Tibbitts, 1998; Havlin *et al.*, 1999), ya que la mayoría de las soluciones nutritivas contienen todo el N en forma de  $\text{N-NO}_3^-$ . Además, se ha comprobado que el suministro de pequeñas

cantidades de  $\text{N-NH}_4^+$  en combinación con el  $\text{N-NO}_3^-$  en la solución nutritiva produce un mayor rendimiento que su aplicación en forma individual (Hageman, 1984) y se incrementa la calidad de los frutos (Simonne *et al.*, 1992; Lara, 1998). Cuando el riego es localizado (p. ej. por goteo) y la irrigación es continua, el volumen del suelo mojado es menor que cuando se alternan períodos cortos sin riego, con la ventaja adicional de una aireación mayor (Dominguez, 1993). Este mismo autor señaló que, en el riego por goteo, la eficiencia en el uso del agua debe ser mayor que en otros sistemas, debido a su mayor repercusión en el rendimiento y en el costo de los insumos. En la actualidad, se busca la automatización del riego mediante programas específicos, alimentados con datos que reciben de diferentes sensores (estaciones climatológicas y tensiómetros). Baca *et al.* (1991), tomando en cuenta la distribución de la transpiración, probaron tres horarios de riego en el cultivo hidropónico de melón: 8:30 y 12:30; 8:30 y 13:30; y 8:30 y 14:30 h; con el segundo de ellos obtuvieron el mayor rendimiento. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de concentraciones de  $\text{N-NH}_4^+$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en la solución nutritiva universal de Steiner y de programas de riego sobre la producción de biomasa de plantas de melón y los cambios químicos en el suelo al utilizar el sistema de riego por goteo en un suelo agrícola de textura migajón arenosa en condiciones de invernadero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó del 8 de mayo al 10 de septiembre de 1999 en la unidad de investigación Dr. Ramón Fernández, ubicada a  $19^\circ 29' \text{ N}$  y  $98^\circ 54' \text{ O}$ , en un invernadero de cubierta de polietileno y ventilación lateral, con temperaturas promedio de  $40.5/10.7^\circ \text{ C}$  (día/noche). Plántulas de melón (*Cucumis melo* L.), híbrido Crusier de 33 días de edad, se trasplantaron a contenedores de plástico con 26 kg de suelo agrícola, de textura migajón arenosa y que, según la clasificación del USDA, corresponde a un Lithic Ustorthent (Soil Survey Staff, 1994).

Los tratamientos se diseñaron a partir de modificaciones a la solución nutritiva universal de Steiner (FAO, 1990) y consistieron en incrementar la concentración del  $\text{N-NH}_4^+$  con relación al total de cationes ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) ( $\text{me L}^{-1}$ ), así como la concentración del  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  con relación al total de

aniones ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ), y del fraccionamiento del volumen total de la SN y su aplicación en los siguientes programas de riego (PR): PR<sub>1</sub>: 8:00 (programa común de la región); PR<sub>2</sub>: 8:00 y 12:30; PR<sub>3</sub>: 8:00, 11:00 y 13:30 h, es decir, el volumen diario de la SN se dividió en volúmenes iguales y se aplicó de acuerdo con los programas de riego anteriores (Cuadro 1). La lámina de riego aplicada se calculó a partir de la evaporación diaria medida en un tanque evaporímetro tipo "A" ajustada por el factor de tanque y el coeficiente del cultivo (1.0) indicado por Cadahía (1998). El primer riego con SN se aplicó cuando la humedad en el suelo (determinada gravimétricamente) disminuyó 18% (1 atm de tensión). La estructura de los tratamientos fue la de un factorial completo 3<sup>3</sup> con dos repeticiones y con dos submuestras (de los contenedores); su distribución correspondió a un diseño completamente al azar. Las SN se colocaron en 18 depósitos de plástico de 200 L, cada uno con tres líneas regantes, cada línea correspondiente a un programa de riego y ésta estuvo conformada por seis plantas (cada una en su contenedor), con una separación de 50 cm entre plantas y de 50 cm entre líneas de riego. Cada planta se regó con un gotero autocompensante con un gasto promedio de 0.8 L h<sup>-1</sup>.

Las SN se prepararon con los siguientes fertilizantes comerciales: nitrato de calcio (15.5-0-0-19), nitrato de potasio (13-2-44), sulfato de potasio

(0-0-50-0-0-54.1), sulfato de amonio (21-0-0-0-0-22) y ácido fosfórico comercial (85.3% de pureza, con una densidad de 1.71 g mL<sup>-1</sup>). Los valores del análisis químico efectuado al agua corriente utilizada se presentan en el Cuadro 2. Las SN se prepararon descontándole los nutrientes que contenía el agua utilizada, la cual, previamente, se aciduló con ácido sulfúrico hasta pH 5.5 (el sulfato correspondiente también se descontó de las SN). En todas las SN, las concentraciones de los micronutrientes fueron: 8, 1.6, 0.023, 0.011 y 0.865 mg L<sup>-1</sup> de Fe, Mn, Zn, Cu y B, respectivamente (Armenta *et al.*, 2001). El Fe fue proporcionado como Fe-EDTA (Steiner y Van Winden, 1970).

Cuando comenzaron a guiar, las plantas se podaron a dos tallos para eliminar el exceso de follaje y lograr un mejor manejo de las mismas (Maroto, 1989). Se utilizó como tutor para las guías una malla plastificada (20 x 20 cm).

Las variables cuantificadas fueron la producción y asignación de biomasa a los órganos de la planta, para lo cual se realizaron dos muestreos destructivos: a 48 días después del trasplante (ddt), cuando los frutos estaban en desarrollo y a la madurez del fruto (125 ddt). En cada muestreo, de cada línea de riego, se tomaron al azar dos plantas de cada tratamiento y se dividieron en sus órganos (raíces, hojas, tallos y frutos). Posteriormente, se lavó el material vegetal con

**Cuadro 1. Composición química de los tratamientos con base en la solución nutritiva universal de Steiner (SNS) (no se incluyen los elementos aportados por el agua).**

Tratamiento	$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{NH}_4^+$	pH	CE
	me·L <sup>-1</sup>							dS·m <sup>-1</sup>
1 <sup>†</sup>	7.5	0.625	0.361	4.023	3.594	0.352 <sup>‡</sup>	4.78	1.33
2	7.5	0.937	0.361	4.023	3.594	0.352	3.67	1.34
3	7.5	1.250	0.361	4.023	3.594	0.352	3.64	1.35
4	7.5	0.625	1.298	4.023	3.594	1.2895	4.78	1.41
5	7.5	0.937	1.298	4.023	3.594	1.2895	3.71	1.42
6	7.5	1.250	1.298	4.023	3.594	1.2895	3.56	1.37
7	7.5	0.625	2.236	4.023	3.594	2.227	5.06	1.27
8	7.5	0.937	2.236	4.023	3.594	2.227	3.92	1.35
9	7.5	1.250	2.236	4.023	3.594	2.227	3.68	1.39

<sup>†</sup> Corresponde a la SNS cuando la presión osmótica es de 0.46 atm, excepto que aquí se incluye una cantidad pequeña de amonio. Cabe indicar que de acuerdo con dicho autor, su solución nutritiva es en realidad una relación particular de aniones, en combinación con otra de cationes y que los valores absolutos de las concentraciones de nutrientes dependen de la presión osmótica de la solución que se elija.

<sup>‡</sup> Proporcionado por los fertilizantes Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y KNO<sub>3</sub>.

**Cuadro 2. Composición química del agua utilizada.**

	CE	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$
	me·L <sup>-1</sup>								
pH	dS·m <sup>-1</sup>								
7.3	0.555	2.05	0.17	1.75	2.64	0.42	1.33	0.54	4.32

agua corriente y después con agua destilada. Las raíces se lavaron con agua a presión y se determinó su volumen y peso seco. Los frutos se cortaron en pequeños trozos para su secado. Todo el material vegetal se secó hasta peso constante en una estufa de circulación forzada de aire a 70 °C.

El nitrógeno se determinó por el método microkjeldahl (Brearen y Mulvaney, 1982), el resto de los nutrimentos por el método de digestión húmeda convencional (Alcántar y Sandoval, 1999) y su cuantificación se realizó en un espectrofotómetro de inducción con plasma acoplada (ICP-AES), marca Varian. En el suelo, al término del ciclo de cultivo, se determinaron el pH y la CE, utilizando un equipo Conductronic PC-18;  $\text{NH}_4^+$  intercambiable, por el método de Nessler; y P disponible por el de Olsen.

El estudio de las variables respuesta se realizó mediante el análisis de varianza correspondiente, la comparación de medias de los efectos principales del diseño factorial con la prueba de Tukey y las de las interacciones significativas mediante la prueba de Scheffé.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Producción y Asignación de la Biomasa

En la primera fecha de muestreo, el peso seco del vástago (tallo, hojas y fruto) y de la planta (vástago más raíz) no resultó afectado por las concentraciones de  $\text{N-NH}_4^+$  en la SN (Cuadro 3), se infiere que con la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  propia de la SNS, la planta satisfizo su requerimiento de N. Por otra parte, la concentración alta de  $\text{NH}_4^+$  en la SN (25%, ó 2.227  $\text{me L}^{-1}$ ) causó, en general, disminución en la concentración y extracción de Mg en las hojas y de K, Ca y Mg en los frutos (Cuadro 4); se desprende que la absorción del  $\text{NH}_4^+$  fue antagónica con la absorción de dichos cationes, antagonismo ya señalado por Hageman (1984); Goyal y Huffaker (1984); Feigin (1990); Stanley (1994); Cao y Tibbitts (1998) y Havlin *et al.* (1999).

Por otra parte, el volumen y el peso seco de la raíz alcanzaron su mayor valor con la concentración más alta de  $\text{NH}_4^+$ , 2.227  $\text{me L}^{-1}$  (Cuadro 3). Estos efectos

**Cuadro 3.** Efectos simples e interactivos de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  de la solución nutritiva y el programa de riego (PR), en el volumen radical (VR), peso seco de la raíz (PSR), del tallo (PST), de la hojas (PSH), del fruto (PSF), del vástago (PSV) y de la planta (PSP) en el cultivo de melón bajo fertirrigación.

Factor de estudio		VR	PSR	PST	PSH	PSF	PSV	PSP
		$\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{g}\cdot\text{planta}^{-1}$					
<b>Primer muestreo<sup>†</sup></b>								
$\text{NH}_4^+$	0.352	26.94 ab <sup>‡</sup>	8.57 ab	11.63 a	27.63 a	58.70 a	97.97 a	106.55 a
	1.289	21.22 b	7.36 b	8.03 b	23.67 a	50.77 a	84.60 a	92.32 a
	2.227	34.00 a	12.35 a	10.81 ab	27.82 a	41.12 a	79.72 a	92.16 a
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	0.625	27.44 a	8.30 a	8.54 b	24.35 b	46.27 a	80.42 a	88.82 a
	0.9375	28.00 a	8.50 a	10.12 ab	25.37 ab	52.18 a	86.32 a	96.67 a
	1.250	26.72 a	11.49 a	11.81 a	29.41 a	55.44 a	98.40 a	107.68 a
PR	1	24.55 a	8.07 a	10.27 a	25.55 a	49.11 a	86.32 a	95.13 a
	2	26.55 a	8.80 a	9.81 a	26.05 a	57.13 a	93.01 a	101.81 a
	3	31.05 a	11.41 a	10.40 a	27.63 a	45.57 a	85.21 a	95.66 a
<b>Segundo muestreo<sup>§</sup></b>								
$\text{NH}_4^+$	0.352	108.89 b	22.52 a	13.38 a	36.08 a	67.80 b	117.27 b	139.80 b
	1.289	122.22 ab	27.57 a	15.05 a	39.85 a	76.57 ab	130.48 ab	158.52 ab
	2.227	148.89 a	30.42 a	16.45 a	39.06 a	88.33 a	143.85 a	174.28 a
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	0.625	116.67 a	20.73 a	13.92 a	33.35 b	72.48 a	119.76 b	140.33 b
	0.9375	133.89 a	31.60 a	15.20 a	41.05 a	72.99 a	129.25 ab	160.86 ab
	1.250	129.44 a	27.81 a	15.76 a	39.60 ab	87.23 a	142.60 a	170.41 a
PR	1	123.89 a	26.62 a	14.15 a	37.43 a	76.75 a	128.34 a	154.97 a
	2	133.89 a	29.05 a	16.21 a	37.43 a	76.37 a	130.02 a	159.51 a
	3	122.22 a	24.92 a	14.53 a	39.12 a	79.58 a	133.25 a	158.18 a

<sup>†</sup> Realizado a los 48 días después del trasplante. <sup>‡</sup> Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). <sup>§</sup> Realizado a 125 días después del trasplante. PR = horario de riegos, 1) 8:00; 2) 8:00 y 12:30; 3) 8:00, 11:00 y 13:30 h.

**Cuadro 4. Efectos simples e interactivos de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> de la solución nutritiva y el programa de riego (PR), en la concentración y extracción nutrimental en hojas, tallos y frutos del cultivo de melón, con fertirrigación evaluados a 48 días después del trasplante.**

Factor de estudio	me L <sup>-1</sup>	Concentración					Extracción				
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
		g kg <sup>-1</sup>					mg planta <sup>-1</sup>				
<b>Hojas</b>											
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.352	27.3 a <sup>†</sup>	2.60 a	21.48 a	69.52 a	19.78 a	751 ab	73 a	598 a	1630 a	546 a
	1.289	28.2 a	1.77 b	20.77 a	56.33 a	12.62 b	655 b	40 b	485 a	1350 a	299 c
	2.227	29.6 a	2.07 b	18.01 a	58.02 a	14.15 b	822 a	58 a	505 a	1550 a	392 b
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.625	29.8 a	1.78 b	20.00 a	62.11 a	15.51 a	713 a	42 b	503 a	1508 a	378 b
	0.9375	27.7 a	2.09 ab	20.34 a	60.88 a	15.66 a	700 a	53 b	502 a	1274 a	395 ab
	1.250	27.8 a	2.57 a	19.88 a	61.19 a	15.50 a	816 a	77 a	584 a	1765 a	463 a
PR	1	29.0 a	2.05 a	22.62 a	61.37 a	16.03 a	731 a	52 a	551 a	1560 a	408 a
	2	28.8 a	2.34 a	19.51 a	69.14 a	15.25 a	749 a	63 a	513 a	1490 a	399 a
	3	27.4 a	2.07 a	17.98 a	53.17 a	15.44 a	750 a	56 a	524 a	1492 a	429 a
<b>Tallos</b>											
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.352	15.8 a	2.16 a	19.47 a	24.39 a	10.08 a	176 a	26 ab	223 a	269 a	112 a
	1.289	18.6 a	2.50 a	17.55 a	25.05 a	11.05 a	142 a	19 b	141 b	197 a	87 a
	2.227	17.5 a	2.61 a	20.38 a	23.12 a	11.21 a	182 a	28 a	217 a	215 a	104 a
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.625	18.5 a	1.86 b	18.68 a	26.25 a	10.69 a	151 a	16 b	158 a	222 a	90 a
	0.9375	17.1 a	2.41 ab	19.73 a	23.57 a	11.20 a	166 a	23 b	199 a	208 a	97 a
	1.250	16.2 a	2.95 a	18.85 a	22.93 a	10.42 a	182 a	34 a	224 a	252 a	117 a
PR	1	17.5 a	2.38 a	19.17 a	27.48 a	11.28 a	165 a	23 a	200 a	269 a	109 a
	2	16.9 a	2.30 a	19.12 a	23.30 a	10.38 a	159 a	23 a	190 a	210 a	95 a
	3	17.5 a	2.59 a	18.95 a	21.61 a	10.61 a	175 a	26 a	191 a	202 a	98 a
<b>Frutos</b>											
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.352	18.5 b	3.97 a	20.48 a	38.88 a	38.83 a	1070 a	228 a	1205 a	225 a	222 a
	1.289	20.4 a	4.13 a	17.56 ab	30.93 b	37.46 a	1050 a	223 a	917 ab	157 ab	194 ab
	2.227	20.5 a	4.06 a	15.68 b	27.41 b	32.41 b	830 a	164 a	628 b	113 b	129 b
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.625	20.2 a	3.69 a	18.98 a	35.66 a	37.86 a	922 a	174 a	929 a	169 a	175 a
	0.9375	19.2 a	4.15 a	18.05 a	35.35 a	37.28 a	995 a	214 a	947 a	189 a	192 a
	1.250	19.6 a	4.30 a	17.68 a	28.93 b	35.00 a	1087 a	238 a	987 a	161 a	196 a
PR	1	18.9 b	3.87 a	17.73 a	34.61 a	35.92 a	938 a	194 a	923 a	173 a	178 a
	2	19.4 ab	4.00 a	17.70 a	33.00 a	36.05 a	1090 a	229 a	1032 a	192 a	205 a
	3	20.7 a	4.27 a	19.37 a	30.07 a	38.14 a	946 a	198 a	886 a	147 a	174 a

<sup>†</sup> Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor, son iguales según la prueba de Tukey (P ≤ 0.05). PR: Horario de riegos, 1) 8:00; 2) 8:00 y 12:30; 3) 8:00, 11:00 y 13:30 h.

aparentemente fueron importantes en el crecimiento posterior de la planta, mismos que se destacan más adelante. Cabe señalar que hubo considerable variación en las medias de los tratamientos de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, en parte debida a que, en el lapso indicado, algunas plantas no produjeron fruto; esto fue más notorio en aquellas tratadas con la mayor concentración de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

La mayor producción de materia seca en la segunda fecha de muestreo se obtuvo cuando se adicionó 25% de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (2.227 me L<sup>-1</sup>), con respecto al N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> propio de la SNS, registrándose diferencia significativa en el volumen de raíz y el peso seco del fruto, del vástago y de la planta (Cuadro 3). Estos resultados coinciden con lo indicado por Feigin (1990) para melón y por Dinev y Stancheva (1995)

para trigo y maíz; en el sentido de que una mezcla de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> produce mayor rendimiento que cuando se utilizan ambas fuentes en forma separada. Cabe indicar que el efecto benéfico del N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se manifestó inclusive a 48 ddt, como antes se indicó, en mayor crecimiento y mayor volumen de la raíz. Por otra parte, a 125 ddt, el N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> incrementó significativamente la concentración y extracción del N en tallos; además, la extracción del N y la concentración y extracción del P en frutos (Cuadro 5). Este resultado coincide con los registrados en la literatura, en el sentido de que la presencia del N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en la solución nutritiva incrementa la absorción de N [Cao y Tibbitts (1993), en papa] y la del P [Hageman (1984), en las plantas superiores;

**Cuadro 5. Efectos simples e interactivos de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  de la solución nutritiva y el programa de riego (PR), en la concentración y extracción nutrimental en hojas, tallos y frutos del cultivo de melón, con fertirrigación, evaluados a 125 días después del trasplante.**

Factor de estudio	me·L <sup>-1</sup>	Concentración					Extracción				
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
		g kg <sup>-1</sup>					mg planta <sup>-1</sup>				
<b>Hojas</b>											
$\text{NH}_4^+$	0.352	19.6 a <sup>†</sup>	2.95 a	10.17 a	35.5 a	14.6 a	694 a	108 a	387 a	1300 a	536 a
	1.289	20.5 a	3.07 a	12.35 a	50.9 a	16.0 a	800 a	119 a	479 a	1990 a	627 a
	2.227	21.4 a	2.79 a	13.64 a	40.1 a	15.1 a	818 a	109 a	525 a	1700 a	586 a
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	0.625	23.5 a	2.65 b	13.71 a	34.3 b	15.0 ab	784 ab	89 b	463 a	1180 b	507 a
	0.9375	21.4 a	2.52 b	11.22 a	39.6 ab	14.1 b	880 a	107 ab	471 a	1630 ab	595 a
	1.250	16.5 b	3.65 a	11.36 a	54.0 a	16.7 a	648 b	140 a	456 a	2180 a	647 a
PR	1	20.2 a	2.77 a	10.51 a	34.6 a	13.6 b	736 a	105 a	399 a	1370 a	515 b
	2	20.3 a	2.93 a	12.20 a	44.5 a	14.7 b	731 a	109 a	444 a	1660 a	553 ab
	3	21.1 a	3.10 a	13.58 a	47.9 a	17.4 a	846 a	122 a	548 a	1960 a	680 a
<b>Tallos</b>											
$\text{NH}_4^+$	0.352	17.4 b	3.27 a	14.4 a	24.7 a	12.4 a	238 b	45 a	198 a	337 a	165 a
	1.289	21.5 a	3.01 a	17.1 a	21.2 a	9.1 a	329 ab	44 a	252 a	298 a	131 a
	2.227	22.9 a	2.93 a	15.0 a	23.7 a	9.1 a	358 a	54 a	253 a	424 a	159 a
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	0.625	20.5 a	2.57 b	14.5 a	21.3 a	9.8 a	293 a	35 b	203 a	292 a	133 a
	0.9375	21.1 a	2.67 b	15.8 a	21.6 a	10.2 a	326 a	42 ab	242 a	324 a	150 a
	1.250	20.0 a	3.97 a	16.0 a	26.9 a	10.7 a	307 a	66 a	258 a	443 a	171 a
PR	1	20.1 a	3.43 a	15.1 a	26.4 a	11.1 a	287 a	54 a	223 a	406 a	166 a
	2	20.1 a	2.88 a	16.4 a	19.3 a	9.3 a	324 a	47 a	263 a	307 a	143 a
	3	21.4 a	2.89 a	14.0 a	24.0 a	10.2 a	315 a	42 a	216 a	346 a	146 a
<b>Frutos</b>											
$\text{NH}_4^+$	0.352	20.8 a	4.00 b	14.5 a	3.81 a	4.06 a	1396 b	276 b	1036 a	265 a	278 a
	1.289	21.4 a	4.82 a	9.5 b	3.47 a	3.74 a	1660 ab	366 ab	683 a	267 a	280 a
	2.227	21.8 a	4.86 a	8.9 b	3.66 a	3.90 a	1907 a	423 a	788 a	321 a	342 a
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	0.625	22.0 a	4.06 b	10.2 a	4.13 a	4.11 a	1610 a	296 b	729 a	307 a	300 a
	0.9375	20.4 b	4.51 ab	13.3 a	3.42 a	3.76 a	1480 a	327 b	972 a	248 a	269 a
	1.250	21.5 ab	5.10 a	9.5 a	3.41 a	3.82 a	1870 a	442 a	807 a	298 a	331 a
PR	1	21.7 a	4.42 a	12.2 a	3.45 a	3.80 a	1650 a	346 a	954 a	270 a	288 a
	2	21.2 a	4.76 a	9.1 a	4.36 a	4.20 a	1630 a	352 a	671 a	330 a	316 a
	3	21.1 a	4.50 a	11.6 a	3.15 a	3.70 a	1670 a	367 a	882 a	254 a	297 a

<sup>†</sup> Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor, son iguales según la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). PR: Horario de riegos 1) 8:00; 2) 8:00 y 12:30; 3) 8:00, 11:00 y 13:30 h.

Feigin (1990), en melón; Cao y Tibbitts (1998), en papa; Havlin *et al.* (1999), en los cultivos en general]. Por último, cabe destacar que el efecto antagonístico del N- $\text{NH}_4^+$  con los cationes K, Ca y Mg, observado en la primera fecha de muestreo (48 ddt), no se presentó en la segunda (125 ddt); sin embargo, en la concentración de K en el fruto sí se manifestó (Cuadro 5). De aquí, que dicho antagonismo no tuvo efecto en la producción general de biomasa.

De los anteriores resultados se desprende la conveniencia de añadir N- $\text{NH}_4^+$  a la SNS, inclusive a partir del trasplante, a reserva de definir, en el futuro, con mayor precisión la concentración más adecuada. Al respecto cabe indicar que Lara (1998), quien también agregó N- $\text{NH}_4^+$  a la SNS durante la etapa del crecimiento del fruto, en el cultivo hidropónico de

tomate, logró obtener, además de mayor producción, frutos de mejor calidad con relación al que no recibió N- $\text{NH}_4^+$ .

Hohjo *et al.* (1995), Magalhães *et al.* (1995) y Santamaría *et al.* (1997) indicaron que otra ventaja de adicionar  $\text{NH}_4^+$  a la SN consiste en la reducción de la concentración de N- $\text{NO}_3^-$  en los frutos; en el estudio presente, esta determinación no se hizo. Por otra parte, Jones (1997) recomendó incluir N- $\text{NH}_4^+$  en la SN durante las etapas tempranas del crecimiento vegetativo del tomate y suprimirlo desde la fructificación hasta el término del ciclo del cultivo, ya que de no hacerlo así, se provoca una deficiencia de Ca en los frutos, causante del desorden nutrimental denominado pudrición apical. En el presente estudio, los frutos de melón no presentaron ninguna anomalía

y los cambios en la concentración y extracción del Ca de los frutos de la segunda fecha de muestreo no resultaron significativos (Cuadro 5).

Al incrementar el  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en la SNS en la primera fecha de muestreo, se obtuvieron aumentos significativos en el peso seco de tallos y hojas (Cuadro 3), debido a la mayor concentración y extracción de P por estos órganos (Cuadro 4), pero no aumentó el peso seco del fruto, del vástago, ni de la planta (Cuadro 3). En la segunda fecha de muestreo, los incrementos en cuestión provocaron un aumento significativo en el peso seco de las hojas, del vástago y de la planta entera (Cuadro 3), de la concentración y extracción de P y Ca en las hojas, de la concentración de Mg en las hojas y de la concentración y extracción de P en los tallos y frutos (Cuadro 5). Lo anterior coincide con lo señalado por Gunes *et al.* (1998), quienes encontraron que, al aumentar la concentración de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en la SN, se incrementó significativamente la absorción de P, Ca y Mg.

Con respecto al riego, en ninguno de los dos muestreos (48 ó 125 ddt) los programas de riego causaron efectos significativos de las variables de crecimiento (Cuadro 3). Los únicos nutrimentos que mostraron diferencias significativas debidas a los programas de riego fueron la concentración del N en los frutos en la primera fecha de muestreo (Cuadro 4) y la concentración y extracción del Mg en las hojas en la segunda fecha de muestreo (Cuadro 5) y fueron mayores con el tercer programa de riego. Se infiere que, al fraccionar la lámina de riego total diaria (con SN) en tres volúmenes iguales y aplicándolos a las 8:00, 11:00 y 13:30 h, se cubre en mejor forma la evapotranspiración del cultivo, la cual es mayor durante las horas centrales del medio día (Martínez y García, 1993); también a que el Mg es transportado vía xilema por el flujo transpiratorio (Jones, 1997). Además, aparentemente, el Mg es un nutrimento requerido por este cultivo con cierta preferencia; al respecto, Raupach y Hall, y Heiberg y White, citados por Reuter y Robinson (1997) indicaron que, en melón, es adecuada la concentración de Mg en la hoja, comprendida entre 1.0 y 1.5%, mientras que la de pepino es entre 0.3 y 1.0%

Cabe señalar que varias de las medias de las variables de crecimiento debidas al efecto de los factores en estudio presentan variación amplia (Cuadro 3), la explicación probable, aparte de la antes señalada, es que la polinización de las flores por las abejas de la colmena, colocada en el invernadero con ese objetivo, no fue suficientemente efectiva, lo cual

ocasionó variación en el del número de frutos por parcela y, por lo mismo, diferente asignación de la biomasa a los órganos de las plantas correspondientes (Kohashi-Shibata *et al.*, 1997).

Diversas interacciones simples y la doble de los factores de estudio, de algunas de las variables presentadas en los Cuadros 3, 4, 5 y 6, resultaron significativas en los análisis de varianza correspondiente; sin embargo, en las comparaciones de medias correspondientes mediante la prueba de Scheffé, revelaron diferencias significativas sólo para el peso seco de raíz, las concentraciones de N de la hoja y del fruto, y las extracciones de P por el fruto y de Mg por la hoja.

El mayor peso seco de raíces: punto "k" en la Figura 1.1, parte I, se alcanzó con la SN resultante de la combinación de la mayor concentración de  $\text{NH}_4^+$  e intermedia de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . El punto "k" fue mayor que el obtenido con la misma concentración de  $\text{NH}_4^+$  y la concentración baja de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . El punto "l" en la Figura 1.1, parte II, con el mismo valor que el punto "k" fue mayor que el obtenido con las concentraciones intermedias de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . El peso seco mayor de raíces: puntos "k" o "l", no se observó que estuviese relacionado con otra variable en la primera fecha de muestreo (Cuadros 3 y 4); sin embargo, pudo tener efecto en la segunda, según antes se indicó lo tuvo  $\text{NH}_4^+$ .

Con la SN preparada con la concentración alta de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y baja de  $\text{NH}_4^+$  se obtuvo la menor concentración de N en los frutos: punto "m", de la Figura 1.2, parte II, significativamente menor que la concentración de N resultante de la concentración alta de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e intermedia de  $\text{NH}_4^+$ . En la misma forma, con las concentraciones altas de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , la concentración de N en las hojas fue la menor: punto "n", en la Figura 1.3, parte I, significativamente inferior a la resultante con la concentración alta de  $\text{NH}_4^+$  e intermedia de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Los puntos "m" y "n" tienen en común que son los valores más pequeños de la concentración de N en los frutos en la primera fecha de muestreo y de la concentración de N en las hojas en la segunda fecha de muestreo, respectivamente. Ambos puntos ("m" y "n") también coinciden en que fueron resultado de la concentración más alta de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en la SN; difieren en que el punto "m" se debió a la concentración menor de  $\text{NH}_4^+$ , mientras que en el punto "n", en forma aparentemente contradictoria, lo fue de la concentración mayor de  $\text{NH}_4^+$  en la SN. Tanto el punto "m", como el punto "n", son resultados de SN con condiciones de

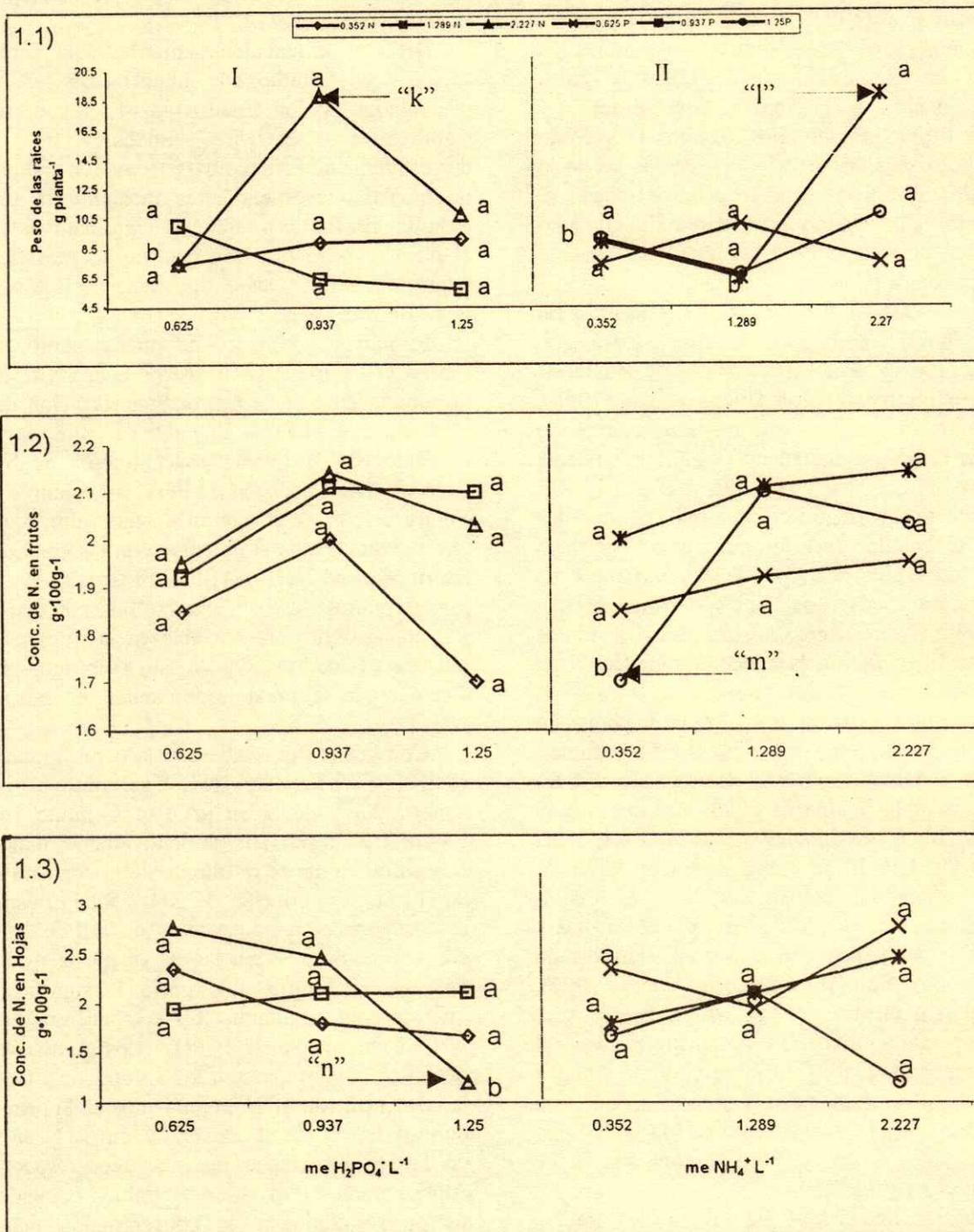


Figura 1 Interacción de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> en la solución nutritiva para el peso de las raíces (1.1), la concentración de N en frutos (1.2), ambos en la primera fecha de muestreo y la concentración de N en las hojas en la segunda fecha de muestreo (1.3). Puntos adyacentes con la misma letra en cada línea son iguales según la prueba de Scheffé (p ≤ 0.05).

desequilibrio nutrimental que podrían considerarse corresponden a deficiencias de N; al respecto, Raupach y Hall, citados por Reuter y Robinson (1997) indicaron que concentraciones de N en la hoja, comprendidas entre 20 y 30 g kg<sup>-1</sup>, constituyen el valor adecuado de N, los puntos "m" y "n" están abajo de dicho valor.

El punto "p" es la extracción de P por las hojas en la primera fecha de muestreo, debida a la SN con la concentración mayor de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> y la menor de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Figura 2.1, parte II). Por otra parte, los puntos "n" y "p" son contrastantes entre sí (el más bajo y el más alto en la Figura 1.2, parte II, y en la Figura 2.1, parte II), a pesar de ser producto de la misma SN (la más alta en fósforo y la más baja en amonio). Como en el caso anterior, ambos puntos son resultado de condiciones de desequilibrio nutrimental; además, el valor alto de "p" podría considerarse que corresponde a consumo excesivo de fósforo; dicho punto fue función, por una parte, de mayor peso seco de las hojas (PSH) (29.41 contra 24.35 g, Cuadro 3) y, por otra parte, de la mayor concentración de P (2.57 contra 1.78 g kg<sup>-1</sup>, Cuadro 4); Hopmans, citado por Reuter y Robinson (1997) indicó que 2.0 g kg<sup>-1</sup> de P es la concentración adecuada de dicho nutrimento.

El punto "q" en la Figura 2.2, parte II, es la extracción de P por los tallos en la primera fecha de muestreo, corresponde a la nutrición con la concentración baja de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> e intermedia de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>; dicha extracción (punto "q") se incrementó significativamente cuando se aumentó la concentración de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> de la SN; esto significa que la incorporación del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> al metabolismo implica menor desgaste energético para la planta y, por lo tanto, mayor acumulación de P (Bugarín *et al.*, 1998).

El punto "r" en la Figura 2.3, parte II, representa la extracción de Mg por las hojas en el primer muestreo lograda con la SN con la concentración intermedia de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y la más alta de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>; dicha extracción fue menor que la alcanzada con la concentración baja de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y la misma concentración de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Dicho punto "r" se debió principalmente a la disminución significativa de la concentración de Mg de 19.78 a 12.62 g kg<sup>-1</sup> (Cuadro 4); Raupach y Hall, citados por Reuter y Robinson (1997), señalaron que la concentración adecuada de Mg es de 10 a 15 g kg<sup>-1</sup>; de esto se infiere, que el valor medio de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en la SN, con relación al valor bajo del mismo, limitó la absorción excesiva de Mg.

### Análisis Químico del Suelo

Al término del ciclo de las plantas, se realizó el análisis químico del suelo utilizado, con la finalidad de determinar los cambios en las características químicas del mismo, por efecto de los factores y niveles estudiados. Al incrementar el nivel de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en la SN de 1.289 a 2.227 me L<sup>-1</sup>, el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> intercambiable del suelo aumentó 0.978 me kg<sup>-1</sup>. En forma similar, al aumentar el nivel de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> de 0.625 a 1.250 me L<sup>-1</sup>, el P aprovechable aumentó 0.742 me kg<sup>-1</sup> (Cuadro 6). El pH del suelo no disminuyó significativamente al aumentar la concentración del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en la SN; al respecto, Parchomchuk *et al.* (1993), advirtieron una

disminución significativa en el pH del suelo (5.8 a 3.7), a una profundidad de 20 a 30 cm debajo del emisor y después de tres años de aplicar en el sistema de fertirrigación 47.0 g árbol<sup>-1</sup> de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. En el caso presente, la cantidad de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> aplicada se considera relativamente baja (más adelante se da información complementaria al respecto), también el periodo de estudio fue corto para afectar el pH. En lo referente a la CE del suelo, no hubo efecto significativo debido al NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Cuadro 6). A cada planta se le suministró 68 L de solución nutritiva, equivalentes a 2.13 g planta<sup>-1</sup> de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> con la concentración mayor del mismo y 0.337 con la concentración menor. La planta extrajo (hoja + tallo + fruto, Cuadro 6) 0.755 g planta<sup>-1</sup> de N de diferencia, entre los niveles mayor y menor de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Por lo que en el suelo correspondiente al nivel mayor, quedaron (bajo el supuesto que no hubo pérdidas de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en el suelo y sin tomar en cuenta el N extraído por la raíz) 1.038 g de N; cada planta creció en 25.8 kg de suelo; la determinación de CE se hizo en una relación de peso de 1:5 (suelo:agua); por efecto N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y del anión acompañante se esperaba una diferencia de CE entre los suelos provenientes de la mayor y la menor concentración de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> de 0.076 dS m<sup>-1</sup>. La prueba de Tukey dio una DMS = 0.063; lo anterior aclara porque no se encontraron diferencias significativas. Recomendable hubiese sido determinar la CE en el extracto de saturación del suelo. En forma similar, el análisis anterior también explica porque no se encontraron diferencias en la CE debida a los niveles de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> de dicha solución. En lo que respecta al programa de riego, como era de esperarse, no hubo diferencias significativas en los parámetros químicos evaluados en el suelo (Cuadro 6).

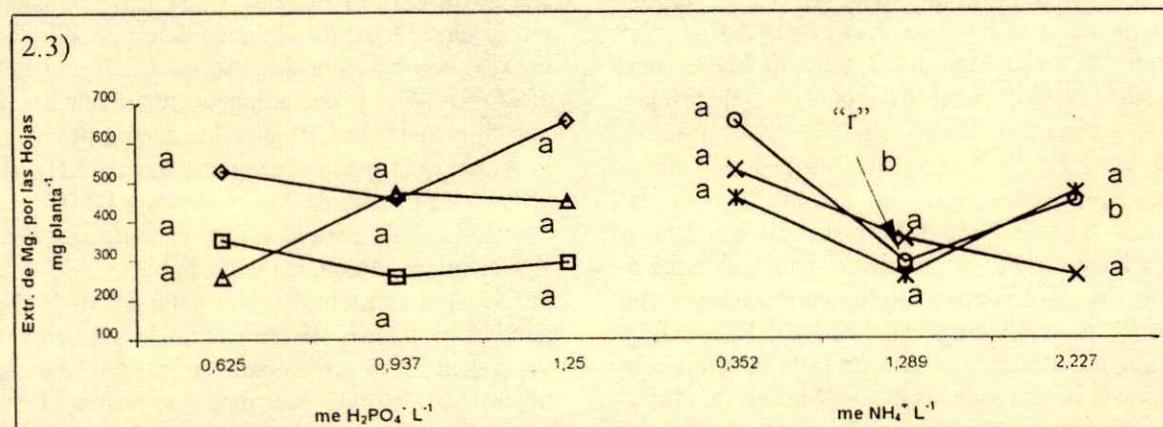
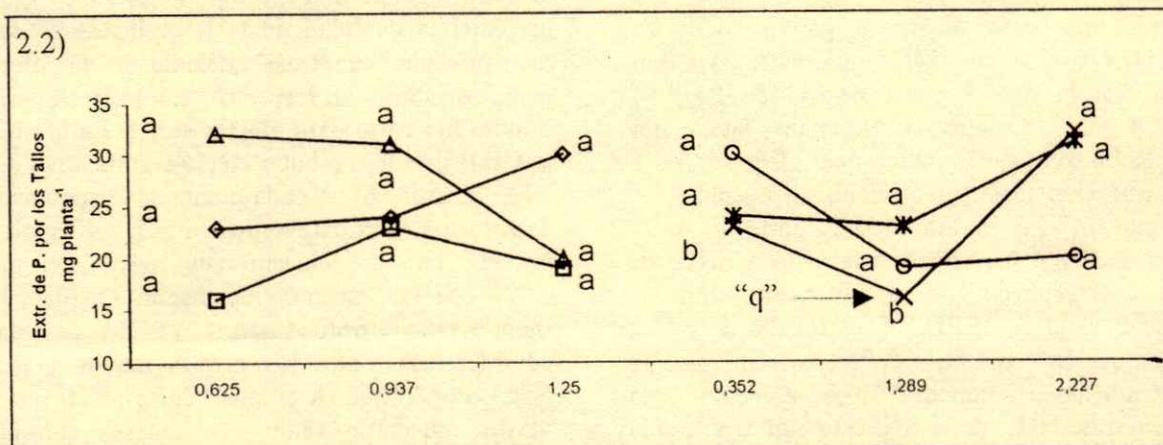
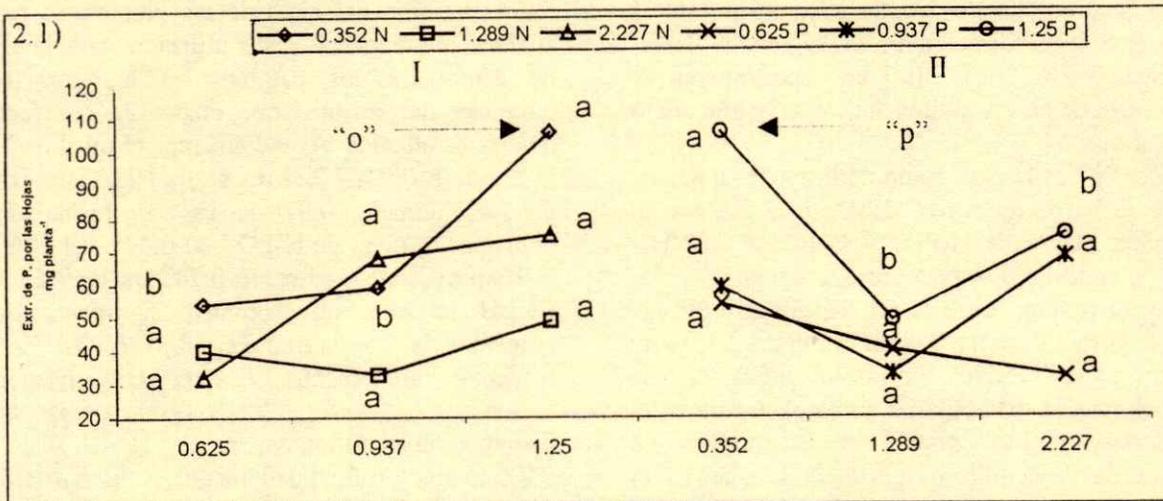


Figura 2 Interacción de  $\text{NH}_4^+$  -  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en la solución nutritiva para la extracción de P por las hojas (2.1), y por los tallos (2.2) y de Mg por las hojas (2.3), en la primera fecha de muestreo. Puntos adyacentes con la misma letra en cada línea son iguales según la prueba de Scheffé ( $p \leq 0.05$ ).

**Cuadro 6. Efectos simples e interactivos de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  de la solución nutritiva y el programa de riegos (PR) en algunas características químicas del suelo al final del experimento de plantas de melón bajo fertirrigación.**

Factor de estudio		pH	CE <sup>†</sup>	$\text{NH}_4^+$	p <sup>‡</sup>
	me·L <sup>-1</sup>		dS m <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	
$\text{NH}_4^+$	0.352	7.26 a <sup>†</sup>	0.248 a	32.05 b	28.40 a
	1.289	7.13 a	0.286 a	32.44 b	30.71 a
	2.227	7.00 a	0.287 a	50.05 a	26.28 a
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	0.625	7.11 a	0.260 a	33.78 a	16.83 c
	0.9375	7.16 a	0.300 a	41.76 a	28.52 b
	1.250	7.12 a	0.250 a	39.76 a	40.04 a
PR	1	7.13 a	0.274 a	36.38 a	26.63 a
	2	7.13 a	0.268 a	40.33 a	26.67 a
	3	7.13 a	0.278 a	37.81 a	32.09 a

<sup>†</sup> Conductividad eléctrica. <sup>‡</sup> Amonio intercambiable en el suelo. <sup>§</sup> Fósforo disponible en el suelo. <sup>¶</sup> Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor, son iguales según la prueba de Tukey (P ≤ 0.05). PR: Horario de riegos 1) 8:00; 2) 8:00 y 12:30; 3) 8:00, 11:00 y 13:30 h.

### CONCLUSIONES

- La adición de 12.5 ó 25% de N, en forma de  $\text{N-NH}_4^+$ , a la SNS en la etapa comprendida desde el trasplante hasta la formación inicial de los frutos [48 días después del trasplante (ddt)], no modificó la cantidad de biomasa aérea producida, sin embargo, sí aumentó el peso y volumen de la raíz. En la etapa comprendida desde el trasplante hasta la madurez del fruto (125 ddt), la adición de 25% amonio incrementó la producción de biomasa aérea y las extracciones de N y P por el fruto, y disminuyó la concentración de K en el fruto. El aumento de la concentración de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  de dicha solución al doble, en el lapso de 48 ddt, aumentó la biomasa correspondiente a la hoja y al tallo. El mismo incremento de fósforo en el periodo comprendido entre el trasplante y la madurez del fruto (125 ddt) incrementó la biomasa aérea, la concentración y la extracción de P de la hoja, tallo y fruto, la concentración y extracción de Ca de la hoja y la concentración de Mg de la hoja. También a 125 ddt, con el programa de riego en el horario 8:00, 11:00 y 13:30 h, se obtuvo mayor concentración y extracción de Mg de la hoja. La adición de  $\text{NH}_4^+$  o de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  a la SNS no incrementó la CE, ni el pH del suelo, sin embargo, aumentó los valores amonio intercambiable y de fósforo aprovechable.

### AGRADECIMIENTO

Se agradece el apoyo de CONACYT para este trabajo realizado bajo el proyecto CONACYT G009-B.

### LITERATURA CITADA

Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.

Armenta B., A.D. 1998. Relaciones óptimas de aniones y cationes en la solución nutritiva en riego por goteo para la producción de tomate. Tesis Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Armenta-Bojórquez, A.D., G.A. Baca Castillo, G. Alcántar-González, J. Kohashi-Shibata, J.G. Valenzuela-Ureta y A. Martínez Garza. 2001. Relaciones de nitratos y potasio en fertirriego sobre la producción, calidad y absorción nutrimental de tomate. Revista Chapingo, Serie Horticultura VII(1): 61-68.

ASERCA. Apoyos y Servicios de la Comercialización Agropecuaria. 2000. El melón mexicano: Ejemplo de una tecnología aplicada. Claridades Agropecuarias 84.

Baca C., G.A., S. Alcalde B., R.J. Laird y A. Martínez G. 1991. Efecto de la solución nutritiva, el riego, el sustrato y la densidad de siembra en tres cultivos hortícolas en hidroponía al aire libre. II. Melón y jitomate. Agrociencia, Serie Agua-Suelo-Clima 2: 33-55.

Bar-Yosef, B. 1999. Advances in Fertigation. Adv. Agron. 65: 1-77.

Brearen, L. y C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. pp. 595-634. In: Page, A.L., R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (Agronomy 9). 2<sup>nd</sup> edition. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.

Bugarín M., R., G.A. Baca C., J. Martínez H. y J.L. Tirado T. 1998. Amonio/nitrato y concentración iónica total de la solución nutritiva en crisantemo. II Extracción nutrimental de hojas. Terra 16: 125-134.

Burgueño, H., F. Uribe y M. Valenzuela. 1994. La fertigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Vol. I. Folleto. BURSAG. Culiacán, Sinaloa, México.

Cadahía L., C. 1998. Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales. Mundi-Prensa. Madrid, España.

- Cao, W. y T.W. Tibbitts. 1993. Study of various  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  mixtures for enhancing growth of potatoes. *J. Plant Nutr.* 16: 1691-1704.
- Cao, W. y T.W. Tibbitts. 1998. Response of potatoes to nitrogen concentration differs with nitrogen forms. *J. Plant Nutr.* 21: 615-623.
- Dinev, N. e I. Stancheva. 1995. Response of wheat and maize to different nitrogen sources. I. Plant growth and biomass accumulation. *J. Plant Nutr.* 18: 1275-1280.
- Domínguez V., A. 1993. *Fertirrigación*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- FAO. Food and Agricultural Organization. 1990. *Soilless culture for horticultural crop production*. Rome, Italy.
- Feigin, A. 1990. Interactive effects of salinity and ammonium/nitrate ratio on growth and chemical compositions of melon plants. *J. Plant Nutr.* 13: 1257-1269.
- Goyal, S.S. y R.C. Huffaker. 1984. Nitrogen toxicity in plants. pp. 7-17. *In: Hauck, R.D. (ed.). Nitrogen in crop production*. American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Gunes, A., M. Alpaslan y A. Inal. 1998. Critical nutrient concentrations and antagonistic and synergistic relationships among the nutrient of NFT grown young tomato plants. *J. Plant Nutr.* 21: 2035-2047.
- Hageman, R.H. 1984. Ammonium versus nitrate nutrition of higher plants. pp. 67-85. *In: Hauck, R.D. (ed.). Nitrogen in crop production*. American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale y W.L. Nelson. 1999. *Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- Hohjo, M., C. Kuwata, K. Yoshikawa y T. Ito. 1995. Effects of nitrogen form, nutrient concentration and Ca concentration on the growth, yield and fruit quality in NFT-tomato plants. *Acta Horticulturae* 396: 145-152.
- Hu, Y. y U. Schmidhalter. 1997. Interactive effects of salinity and macronutrient level on wheat. II. Composition. *J. Plant Nutr.* 20: 1169-1182.
- Jones Jr., J.B. 1997. *Hydroponics. A practical guide for soilless grower*. St. Lucie Press. Boca Raton, FL.
- Kafkafi, U. 1973. Nutrient supply to irrigated crops. pp. 177-188. *In: Yaren, B., E. Danpors y Y. Vaadia (eds.). Arid zone irrigation*. Heidelberg-Berlin, Germany.
- Kohashi-Shibata, J., G. Baca-Castillo y C. Santos-Vigil. 1997. Effect of pod picking on growth and dry matter allocation in snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Phyton*. 60(1/2): 77-82.
- Lara H., A. 1998. Soluciones nutritivas para cuatro etapas fenológicas del jitomate. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Magalhães, J.R., D.M. Huber y C.Y. Tsai. 1995. Influence of form of nitrogen on ammonium, amino acid and N-assimilating enzyme activity in maize genotypes. *J. Plant Nutr.* 18: 747-763.
- Maroto, B.J.V. 1989. *Horticultura práctica especial*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Martínez, C.E. y L.M. García. 1993. *Cultivos sin suelo: Hortalizas en clima mediterráneo. Compendio de Horticultura 3*. Caja Rural de Almería. Almería, España.
- Moya T., J.A. 1994. *Riego localizado y fertirrigación*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Parchomchuk, P., G.H. Nielsen y E.J. Hogue. 1993. Effects of fertigation of  $\text{NH}_4\text{-N}$  and P on soil pH and cation leaching. *Can. J. Soil Sci.* 73: 157-164.
- Phene, C.J. y D.C. Sanders. 1976. Influence of combined row spacing and high frequency trickle irrigation on production and quality of potatoes. *Agron. J.* 68: 602-607.
- Phene, C.J., G.J. Hoffman y R.S. Austin. 1973. Controlling automated irrigation with a soil matric potential sensor. *Trans. ASAE* 16: 773-776.
- Reuter, D.J y J.B. Robinson (eds.). 1997. *Plant Analysis. An Interpretation Manual*. Second Edition. Commonwealth Scientific Institute Research Organization. Victoria, Australia.
- Santamaría, P., A. Elia y M. Gonnella. 1997. Changes in nitrate accumulation of endive plants during light period as affected by nitrogen level and form. *J. Plant Nutr.* 20: 1255-1266.
- Satti, S.M.E. y R.A. Al-Yahyai. 1995. Salinity tolerance in tomato: Implications of potassium, calcium, and phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 2749-2760.
- Satti, S.M.E., R.A. Al-Yahyai y F. Al-Said. 1996. Fruit quality and partitioning of mineral elements in processing in response to saline nutrient. *J. Plant Nutr.* 19: 705-715.
- Simonne, E.H., H.A. Mills y D.A. Smittle. 1992. Ammonium reduces growth, fruit yield and fruit quality of watermelon. *J. Plant Nutr.* 15: 2727-2741.
- Soil Survey Staff. 1994. *Claves para la Taxonomía de suelos. Trad. al español por Ortiz S., C.A. y Ma. del C. Gutiérrez C. Publicación Especial 3*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Texcoco, México.
- Sonneveld, C. y W. Voogt. 1990. Response of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* L.) to an unequal distribution of nutrient in the root environment. pp. 509-514. *In: Van Beusichem, M.L. (ed.). Plant nutrition-physiology and applications*. Kluwer Academic Publishers. Wageningen, The Netherlands.
- Stanley, A.B. 1984. Nutrient balance and use. pp. 87-95. *In: Hauck, R.D. (ed.). Nitrogen in crop production*. American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Steiner, A.A. y H. van Winden. 1970. Recipe for ferric salt of ethylenediaminetetra acetic acid. *Plant Physiol.* 46: 862-863.

# SALINIDAD SÓDICA EN EL DESARROLLO VEGETATIVO Y REPRODUCTIVO DEL PIMIENTO

## Salinity on Vegetative and Reproductive Growth of Pepper

J.J. Muñoz-Ramos<sup>1‡</sup>, M. Guzmán<sup>2</sup> y J.Z. Castellanos<sup>1</sup>

### RESUMEN

El estudio se realizó en el primer cuatrimestre del 2001, en condiciones climáticas del litoral Mediterráneo del sureste español. Plantas de pimiento, cv. California, se cultivaron con el sistema de cultivo (*Capsicum annuum* L.) sin suelo, en un invernadero tipo "parral" o "Almería". Se utilizó un sistema de fertirriego con un autómata por tiempo. Como sustrato se utilizó perlita B12, contenida en una canaleta negra de polietileno acartonado. El objetivo del estudio fue determinar el efecto de la salinidad ( $CE = 9 \text{ dS m}^{-1}$ ) sobre el crecimiento y desarrollo temprano del pimiento. Se utilizaron tres fuentes de sales: NaCl (para simular la intrusión salina en los litorales),  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (predominante en aguas subterráneas en regiones áridas y semiáridas) y alta concentración salina, manteniendo el equilibrio iónico de la solución nutritiva (SNc), comparadas con la concentración salina del abonado normal (SNn). Al inicio de la etapa generativa y en el desarrollo de los primeros frutos, se realizaron dos muestreos de biomasa separada en sus componentes: raíz, tallo, hojas y frutos. Hasta el inicio de la etapa generativa, la salinidad no afectó el número de hojas; en cambio, sí al área foliar que se redujo en 23 y 43% en los tratamientos correspondientes de Na y SNc. Durante la etapa de desarrollo de los frutos, la salinidad redujo la biomasa fresca total en 46, 33 y 50% en los tratamientos NaCl,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y SNc, respectivamente, y afectó en forma negativa al peso fresco de frutos, en 43 y 55% para los tratamientos con Na y SNc. A 23 días del inicio de la floración, ya estaba manifiesta la "podredumbre apical" en los frutos ("Blossom End Rot" o BER). La salinidad contribuyó al incremento en la incidencia de esta fisiopatía ( $P < 0.07$ ). El incremento de frutos

afectados fue de 64% en la presencia de NaCl y hasta en 186% en el tratamiento con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  respecto de los tratamientos con SN, que se afectaron por igual en 22%.

**Palabras clave:** *Capsicum annuum* L., partición de materia seca, podredumbre apical, cultivo sin suelo, horticultura protegida, fertirriego.

### SUMMARY

This study was carried out during the first trimester of 2001, under the climatic conditions of the Mediterranean coast in Spain. Pepper (*Capsicum annuum* L.) plants, cv. California, were grown in soilless culture in greenhouse. An automatic timed fertigation system was used. Perlite B12 was used as substrate, contained in a channel of stiff black polyethylene. The objective of the study was to determine the effect of salinity ( $EC = 9 \text{ dS m}^{-1}$ ) on growth and early plant development. Three sources of salt were used: NaCl (to simulate saline intrusion in the littorals),  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (a common salt in underground water in arid and semi-arid regions), and a high salinity treatment maintaining the ionic balance of the concentrated nutrient solution (SNc), compared with the normal nutrient solution (SNn). At the beginning of the generative stage and during the development of the first fruit, two samplings of biomass were carried out, separating the components root, shoot, leaves, and fruit. Up to the beginning of the generative stage, salinity did not significantly affect the number of leaves ( $P < 0.05$ ). On the other hand, leaf area decreased significantly in 23 and 43% in the treatments with Na ( $\text{SO}_4$  and Cl) and SNc, respectively. During the stage of fruit development, the salinity significantly reduced total fresh biomass by 46, 33, and 50% in the treatments NaCl,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , and SNc, respectively, compared with the control treatment. The weight of fresh fruit was reduced by 43 and 55% for the treatments with Na ( $\text{SO}_4$  and Cl) and SNc. At 23 days after the beginning of flowering, the presence of Blossom End Rot (BER) in the fruits was observed. Salinity contributed to the increase in the

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío. Apartado Postal 112, 34010 Celaya, Guanajuato, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (murj59@hotmail.com)

<sup>2</sup> Universidad de Almería, Dpto. Produc. Vegetal. La Cañada de San Urbano, 04120 Almería, España.

Recibido: Noviembre de 2001. Aceptado: Mayo de 2003.

Publicado en Terra *Latinoamericana*: 187-196.

incidence of this physiological disorder ( $P < 0.07$ ). BER increased 64% in presence of NaCl and 186% in the treatment with  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , compared with the treatments with SN, in which the increase was only 22%.

**Index words:** *Capsicum annum L., dry matter allocation, Blossom End Rot, soilless culture, protected horticulture, fertigation.*

## INTRODUCCIÓN

La salinidad o "muerte blanca" es un problema agrícola severo en muchas partes del mundo y será un tópico relevante a través del actual milenio; además, la explosión demográfica mundial demanda de suficientes alimentos para abastecer a más de  $6 \times 10^9$  individuos que, en la actualidad, habitan el planeta, población de tan solo  $1 \times 10^9$  individuos hace 200 años (Naciones Unidas, 1999).

Con riego se alcanzan los más altos potenciales de rendimientos unitarios y éstos incrementan su estabilidad. Un adecuado suministro del agua de riego es, por lo tanto, importante para la producción agrícola. Sin embargo, los recursos hídricos de buena calidad no satisfacen la demanda creciente. En la actualidad, el agua subterránea es el mayor recurso hídrico, pero 55% de ésta es salina (Yeo, 1999), con  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  como los iones más abundantes. En regiones costeras hay riegos de intrusión marina, tal es el caso del litoral de Murcia, España, donde 55% del agua de riego tiene una conductividad eléctrica (CE) mayor que  $3.5 \text{ dS m}^{-1}$  (Flower, 1999).

Alrededor de la agricultura intensiva protegida del litoral del Mediterráneo español, se han desarrollado actividades e industrias auxiliares económicamente significativas, pero también se ha aumentado el déficit y empeorado la calidad del agua (Ferraro *et al.*, 2000). En este tipo de agricultura ha sido posible obtener altos rendimientos con buena calidad, gracias a técnicas culturales modernas y nuevos cultivares. Sin embargo, la salinización secundaria del suelo como una consecuencia del excesivo aporte de fertilizantes es un problema creciente. A este respecto, la transición del cultivo en suelo a cultivo sin suelo es un gran desafío, pero que está en marcha.

En los sistemas de cultivo sin suelo (CSS), los nutrientes son aportados a las plantas disolviéndolos en el agua de riego. La concentración de la solución nutritiva está estrechamente relacionada con la CE. No obstante, en los CSS la solución nutritiva debe ser

renovada y abundante para mantener el balance de nutrientes. En cultivos en lana de roca y perlita normalmente se necesita 30% más de agua y entre 15 y 25% más de sales para reunir la demanda de agua y prevenir la acumulación de solutos. Las sales y aguas adicionales drenan y contaminan tanto al suelo, como a las aguas superficiales y profundas. Para paliar este problema, los productores holandeses han adoptado la recirculación de la solución nutritiva, mediante sistemas cerrados, en tanto que en el litoral mediterráneo estos sistemas aún son incipientes a escala comercial (Marfà, 2000) y se presume que estos sistemas cerrados sólo se impondrán mediante legislación. Sin embargo, paulatinamente se está encaminando el cultivo en "enarenado" hacia el cultivo en sustratos inertes como lana de roca y perlita cuya superficie actual ronda las 3000 hectáreas, aunque con sistemas abiertos o solución perdida (Lorenzo *et al.*, 2000).

Un sistema "cerrado" con la recirculación de la solución nutritiva asegura un reutilización total del agua y nutrientes encadenando el ahorro de agua y decreciendo la emisión de nutrientes. Al proyectar el sistema de reutilización de la solución de drenaje, es fundamental considerar la calidad química y biológica del agua de riego (Lorenzo *et al.*, 2000). La concentración de uso de los nutrientes no es necesariamente igual a la concentración de la solución (Van Noordwijk, 1990). Como consecuencia, algunos nutrientes se acumularán después de un cierto período de recirculación. Es decir, las sales no nutrientes, como  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , pueden acumularse en la solución nutritiva, además del  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , dado que estos iones no son del todo absorbidos por muchas especies de plantas (Cunill, 2000). Así, una calidad de agua pobre puede causar problemas de salinidad en los sistemas de cultivo cerrados. La CE de la solución nutritiva es muy importante para la producción de cultivos, dado que la CE afecta la cantidad y calidad de la producción del cultivo.

Debido a las regulaciones ambientales, el reutilización del agua de la fracción de lavado está siendo una práctica común para muchos cultivos de invernaderos en Holanda. En estos sistemas, tanto los fertilizantes no usados, como ciertos iones de la fuente de agua ( $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ ) tienden a acumularse en la solución nutritiva. Varios investigadores han documentado que una alta concentración de solutos en el ambiente radical reduce el rendimiento y esto está relacionado con algunos desórdenes del fruto (Adams, 1991; Van

Ieperen, 1996), pero no con el número de frutos cosechados, ni con la materia seca de éstos (Li, 2000). Sin embargo, la salinidad moderada puede también mejorar la calidad de frutos (Adams y Ho, 1989). Se cree que los efectos antes mencionados están modelados por las condiciones climáticas durante el crecimiento del cultivo (Banuelos *et al.*, 1985; Adams y Holder, 1992; Cockshull, 1998; Stanghellini *et al.*, 1998; Li, 2000).

La absorción de agua y la transpiración son dos procesos fisiológicamente diferenciados en la planta, no obstante, están muy relacionados. El balance entre estos procesos de control está dirigido por el potencial hídrico, el cual afecta la acumulación de agua en los tejidos de crecimiento. A alta salinidad (bajo potencial osmótico de la solución nutritiva), el potencial hídrico de la planta decrecerá. Asimismo, una transpiración alta causará un descenso del potencial hídrico de toda la planta. Porque ambas, transpiración y salinidad, afectan el estado hídrico (Van Ieperen, 1996) y una baja transpiración puede ayudar a compensar los efectos negativos de la salinidad (Hoffman y Rawlins, 1971).

La producción de frutos está determinada por dos flujos (Ho *et al.*, 1987): el influjo de agua y el influjo de asimilados. El crecimiento vegetativo, en particular el área foliar, afecta ambos flujos. La superficie de las hojas es el sitio de pérdida de agua (transpiración) y asimilación de carbono (fotosíntesis). Sin embargo, la expansión de las hojas en muchas especies es un proceso fisiológico de la planta afectado por el estrés hídrico (Hsiao, 1973). Las células y hojas son más pequeñas durante el estrés hídrico, resultando en área reducida para la fotosíntesis.

El objetivo de esta evaluación fue estudiar la salinidad elevada, estableciendo una CE de 9 dS m<sup>-1</sup> con diferentes sales: NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, solución madre concentrada (SNc) con respecto a una solución nutritiva estándar (SNn) y su efecto sobre el crecimiento y desarrollo temprano de pimiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en condiciones climáticas del litoral Mediterráneo del sureste peninsular Ibérico, en la Bahía de Almería. La plantación de pimiento (*Capsicum annuum* L.), cv. California, se estableció en un invernadero tipo "parral", correspondiente al subtipo de multicapilla o de "raspa y amagado" del recinto universitario de Almería (36°49'37" N, 2°24'20" O y a una altitud de 5 m). El estudio se

realizó en el primer cuatrimestre del 2001, con el sistema de cultivo sin suelo.

El estudio se realizó en fertirriego y se utilizó un cabezal de riego con un autómata de riego por tiempo. El sistema de riego contó con goteros autocompensados con un gasto de 2 L h<sup>-1</sup> a 2 kPa de presión y un coeficiente de uniformidad de 92.4% (Valiente, 2000). Como sustrato se utilizó Perlita B12, (23 L m<sup>-1</sup>), dispuesta en una canaleta de polietileno negro acartonado con las dimensiones siguientes: 6 m de largo por 0.25 m de ancho y 0.12 m de alto. El marco de plantación fue de 0.5 y 1 m entre plantas e hileras, respectivamente (2 plantas m<sup>-2</sup>). La parte superior de la canaleta se cerró para disminuir la proliferación de algas y para reducir las pérdidas de agua por evaporación directa.

Los cálculos correspondientes para preparar las soluciones nutritivas fueron con base en la calidad de agua siguiente: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 0.2; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 2.5; Cl<sup>-</sup>, 0.6; K<sup>+</sup>, 0.3; Ca<sup>2+</sup>, 1.0; y Mg<sup>2+</sup>, 0.79 mmol L<sup>-1</sup>, respectivamente, además un pH de 7.2 y una CE de 0.5 dS m<sup>-1</sup>.

Al preparar las soluciones nutritivas, se emplearon las sales y ácidos fertilizantes siguientes: H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (75%); HNO<sub>3</sub> (56%); 5[Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O]·NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>; KNO<sub>3</sub>; NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>; K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O y micronutrientes (Kanieltra 10 Fe), a 0.2 mL L<sup>-1</sup> de solución nutritiva.

La solución nutritiva de fertirriego de referencia (Tratamiento 4) con una CE de 2.5 dS m<sup>-1</sup> fue la siguiente: 15, 2, 4.4, 1, 5.2, 9.5, y 4.8 mmol L<sup>-1</sup> de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, y Mg<sup>2+</sup>, respectivamente. Se utilizó un pimiento cv. California (Marín, 2001).

Los tratamientos evaluados se plantearon para representar tres escenarios de salinidad (conductividad eléctrica elevada, CE = 9 dS m<sup>-1</sup>) con tres sales:

1. Elevada CE en aguas subterráneas con cloruro de sodio (NaCl) por intrusión salina, lo cual puede ocurrir en litorales.
2. Elevada CE de aguas subterráneas con sulfato de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), lo cual puede ocurrir en regiones áridas y semiáridas.
3. Elevada CE manteniendo el equilibrio iónico mediante aportes de la solución madre concentrada (SNc).
4. CE en un abonado normal (SNn), utilizando agua de buena calidad, el cual constituyó el tratamiento testigo de referencia (CE = 2.5 dS m<sup>-1</sup>).

El incremento de la CE hasta 9 dS m<sup>-1</sup> en los Tratamientos 1, 2 y 3 se consiguió añadiendo NaCl,

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y solución madre concentrada (SNc), respectivamente. En el tratamiento de SNc, la solución nutritiva se ajustó a pH 5.5 con aportaciones de HCO<sub>3</sub>, previa valoración de un determinado volumen.

En dos etapas del cultivo se evaluaron parámetros de desarrollo y crecimiento. La fenología del cultivo se registró mediante el esquema numérico BBCH (Bleiholder *et al.*, 1994; Krung, 1997), que es un compendio de claves numéricas para la identificación de los estadios de desarrollo de las plantas mono y dicotiledóneas (Cuadro, 1), número de órganos reproductivos (botones, flores y frutos), materia seca en raíz, tallo, hojas y frutos, diámetro y altura del tallo, área foliar mediante la digitalización de imágenes. También se estimaron algunos parámetros indirectos (Krung, 1997), como la relación vástago/raíz, relación altura-diámetro, superficie foliar específica (SLA), la tasa de área foliar (LAR) y la tasa de peso foliar (LWR). El primer muestreo se realizó cuando las plantas iniciaron su etapa generativa, es decir, cuando aparecieron las primeras flores (BBCH 6-0-1); esta evaluación se realizó sin haber efectuado la poda y, posterior al muestreo, se podaron tres tallos.

El segundo muestreo se realizó cuando los primeros frutos estaban en pleno desarrollo (BBCH 7-0-4 a 7-0-6). También se le dio seguimiento a la CE y al pH en el drenaje, ambas determinaciones se registraron en cada línea, conformando una bandeja de control con la misma canaleta conteniendo tres plantas.

La información se trató con un análisis de varianza en bloques al azar de sólo una vía. Las repeticiones se tomaron dentro de cada línea,

**Cuadro 1. Estados fonológicos del pimiento codificados de acuerdo con las claves numéricas BBCH, según Bleiholder *et al.* (1994).**

Estadio fenológico	BBCH
Germinación y emergencia	0-0-0
Desarrollo de hojas verdaderas	1-0-0
Desarrollo de tallos secundarios	2-0-0
Elongación de tallo	3-0-0
Brotos en tallo principal	4-0-0
Aparición de botones	5-0-0
Floración	6-0-0
Desarrollo de fruto	7-0-0
Maduración de frutos	8-0-0
Senescencia	9-0-0

Nota: Dentro de cada BBCH, si se desea, puede subdividirse según el nivel de apreciación que se fije.

siguiendo la pendiente de la canaleta. Se utilizó el paquete estadístico STAT GRAPHICS 4.0 (Llovet *et al.*, 2000), la comparación de medias se realizó mediante la prueba de intervalo múltiple (LSD), en los casos en que procedió, la separación de medias se efectuó con una probabilidad de 95%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la discusión de los resultados señalados en porcentajes u otra cantidad se referirán a la comparación de los tratamientos de salinidad (NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y SNc) con respecto al tratamiento testigo (SNn), a menos que se especifique otro orden.

### Inicio de la Etapa Generativa (BBCH 6-0-1)

Los resultados del análisis de varianza y valores medios de tratamientos, durante el inicio de la etapa generativa del pimiento se presentan en los Cuadros 2 y 3. Los tratamientos de salinidad no afectaron al número de hojas en el tallo principal. No obstante, en los tres tallos secundarios, el número de hojas por planta disminuyó en 11, 10 y 23; asimismo, se observó una reducción significativa en el área foliar de 22, 24 y 43%, respectivamente. Precisamente en pimiento, Marfà y Guri (1999) evaluaron dos concentraciones de salinidad (1.6 y 5.5 dS m<sup>-1</sup>) en combinación con dos concentraciones de oxígeno disuelto (6 y 16 mg L<sup>-1</sup>); sus resultados indican que en un medio radicular reducido confinado como ocurre en los cultivos sin suelo, el agotamiento de oxígeno, en particular en condiciones Mediterráneas, ocurre a una escala temporal acelerada, siendo aun más acusado el efecto si se dan condiciones de salinidad y temperaturas elevadas, manifestándose un una menor expansión foliar y biomasa del vástago.

El estrés hídrico temprano (en este caso impuesto por salinidad) restringió el crecimiento vegetativo y desarrollo del área foliar (Cuadro 2), afectando la producción de biomasa total de la planta (Cuadro 3). La respuesta más rápida en la tasa de elongación foliar a sustratos salinos es atribuida a cambios en el estatus del agua en la hoja, ya que los resultados de Waldron *et al.* (1985) indican que, al suprimir la salinidad de la zona radical, la tasa de expansión foliar inmediatamente diverge de la presalinización, lo que sugiere que el déficit de agua fue la razón principal de la reducción del crecimiento por salinidad en el sustrato más que la toxicidad de sales.

**Cuadro 2. Efecto de la salinidad sobre algunos parámetros de desarrollo y crecimiento durante el inicio de la etapa generativa del pimiento.**

Trat.	nhtp	nhts	nbo	Dtp	Htp	RHD	Rvr	Af	SLA	LAR	LWR
				- - - - cm - - - -				cm <sup>2</sup>	- - cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> - -		
NaCl	12	34	32 b	0.90 b	24.7	27.4	10.2	1032 ab	188	90	0.41
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11	35	29 b	0.87 b	23.3	27.0	10.4	1001 ab	181	85	0.40
SNc	11	22	19 a	0.80 a	25.0	31.0	12.0	752 a	177	91	0.44
SNn	11	45	33 b	1.00 c	24.3	24.3	11.2	1318 b	185	91	0.41
P valor	NS	NS	**	**	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS

Trat. = tratamiento de salinidad; nhtp y nhts = número de hojas en el tallo principal y secundarios; nbo = número de botones; Dtp y Htp = diámetro y altura del tallo principal; RHD = relación altura diámetro; Rvr = relación vástago (hojas + tallo)/raíz sobre la base de peso seco; Af = área foliar por planta; SLA = superficie foliar específica; LAR = tasa de área foliar; LWR = tasa de peso foliar; NS = no significativo \* y \*\* significación estadística > 5, 5 y 1%, respectivamente.

El grado de salinidad y el área foliar usualmente están inversamente relacionadas. Con el incremento de la salinidad, la pérdida de agua por transpiración en la planta puede, por consiguiente, también decrecer por esta razón. No sólo el área foliar total, sino también la fijación neta de CO<sub>2</sub> por unidad de área puede declinar, mientras que la respiración durante la noche incrementa, lo que conduce a una reducción drástica en la asimilación neta de CO<sub>2</sub> por unidad de área foliar por día. Bajas tasas de fijación neta de CO<sub>2</sub> durante el periodo luminoso pueden ser causadas por déficit de agua y cierre parcial de estomas, pérdida de turgor en las células del mesofilo por la acumulación de sales en el apoplasto o efectos tóxicos directos de iones (Marschner, 1995). La salinidad también puede incrementar la tasa de respiración de las raíces, las cuales tienen requerimientos más altos de carbohidratos para mantener la respiración en sustratos salinos (Schwartz y Gale, 1981). Estos requerimientos más altos presumiblemente resultan de la compartimentación de iones, secreción de iones (e.g., bombeo del eflujo de Na<sup>+</sup>) o por la reparación del daño celular.

Los índices de expansión foliar: superficie foliar específica (SLA), tasa de área foliar (LAR) y tasa de peso foliar (LWR) no fueron afectados

significativamente por los tratamientos de salinidad (Cuadro 2), quizás como resultado del corto periodo de tratamiento (trasplante a floración).

La salinidad redujo el diámetro de tallo en 10, 23 y 20%; en cambio, no afectó significativamente a la altura del tallo principal ni a la relación altura-diámetro (RHD). A mayores valores en la RHD, los tallos son más débiles para soportar la carga de los frutos y la salinidad al valor estudiado (CE = 9 dS m<sup>-1</sup>) contribuye a ello con 13, 11 y 28% (Cuadro 2). Como regla general, en sustratos salinos el crecimiento del vástago es más afectado que el crecimiento de la raíz (Termaat y Munns, 1986) y el pimiento no ha sido excepción. Aun cuando no fueron significativas las diferencias entre tratamientos; la relación vástago/raíz (Rvr) fue afectada negativamente en los tratamientos con sodio en torno a 8%, sin embargo, esta relación en el tratamiento con SNc fue afectada positivamente en 7%.

En la transición del estado de desarrollo de vegetativo a generativo, la salinidad a base de SNc respecto a la SNn afectó significativa y negativamente el número de botones, reduciéndolos en 42% (Cuadro 2). La gran cantidad de botones en esta transición sugiere un cambio en la gestión del fertirriego y prácticas de manejo, lo que justifica la

**Cuadro 3. Efecto de la salinidad sobre la partición de la producción de materia seca durante el inicio de la etapa generativa del pimiento.**

Trat.	Materia fresca					Materia seca					Ws <sup>†</sup>
	Raíz	Tallo	Hojas	Brotos	Total	Raíz	Tallo	Hojas	Brotos	Total	
	- - - - - g m <sup>-2</sup> - - - - -										%
NaCl	103.4 b	92.9 bc	79.5 ab	12.6	288 b	2.39 b	11.96 ab	11.03 ab	1.70	27.1 ab	9.4
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	105.6 b	86.1 b	79.3 ab	15.7	287 b	2.44 b	12.32 b	11.02 ab	2.01	27.8 ab	9.7
SNc	64.8 a	55.4 a	59.9 a	9.6	190 a	1.50 a	8.00 a	8.49 a	1.30	19.3 a	10.2
SNn	124.3 b	119.3 c	104.4 c	23.5	371 b	2.88 b	14.83 b	14.24 b	2.78	34.7 b	9.4
P valor	*	*	*	NS	*	*	*	*	NS	*	NS

<sup>†</sup> Porcentaje de peso seco. NS y \* significación estadística > 5 y 1%, respectivamente.

eliminación del primer fruto (práctica que comúnmente hacen los productores) para fortalecer la lámina foliar, dado que los frutos son grandes sumideros de carbohidratos (Figura 1).

El efecto de los tratamientos de salinidad con CE de  $9 \text{ dS m}^{-1}$  respecto al testigo con  $2.5 \text{ dS m}^{-1}$  sobre el total y la partición de la biomasa en los componentes de la planta se presentan en la Cuadro 3. La biomasa seca total es significativamente reducida por los tratamientos de salinidad, siendo más acusado el efecto en el tratamiento S<sub>Nc</sub>, en 44% y, de manera intermedia, los tratamientos con Na en torno a 20% de reducción en la biomasa total.

La reducción de la biomasa producida afectó en mayor medida a la raíz y al tallo que a las hojas en el tratamiento de S<sub>Nc</sub>, mientras que en los tratamientos de salinidad sobre la base de sodio ocurrió lo contrario, se redujo más la producción de biomasa en las hojas que la de raíces y tallos (Cuadro 3). De acuerdo con Alarcón (1996), no es conveniente que el cloruro y sodio sobrepasen de 8 mM. Una relación Na/K excesivamente elevada puede llegar a destruir las células del floema, impidiendo la distribución del Na que se acumula en las hojas. En regiones áridas y

semiáridas, en particular bajo irrigación, concentraciones de 50 a 100 mM de  $\text{Na}^+$  (la mayoría como NaCl en la solución del suelo) son típicas y tienen un efecto depresivo sobre el crecimiento de la mayoría de las plantas cultivadas (Marschner, 1995). De igual manera, la razón Na/Ca elevada disminuye el Ca en las hojas por el antagonismo catiónico monovalente-divalente. En este ensayo, estas relaciones Na/K y Na/Ca fueron de 4.3 y 3.8 para el tratamiento con NaCl y 2.8 y 2.5 para el tratamiento con  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

El efecto de la salinidad sobre el porcentaje de peso seco es poco manifiesto y no significativo en estos estadios iniciales, no obstante, los tratamientos de S<sub>Nc</sub> y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  presentaron 9 y 4% más de peso seco, lo cual significa una menor proporción hídrica en la constitución de los tejidos de las plantas.

#### Etapa de Desarrollo de Primeros Frutos (BBCH 7-0-4 a 7-0-6)

El número de hojas y botones en esta etapa fue menor respecto a la etapa anterior; esto se debió a la poda vegetativa efectuada, dejando sólo tres tallos

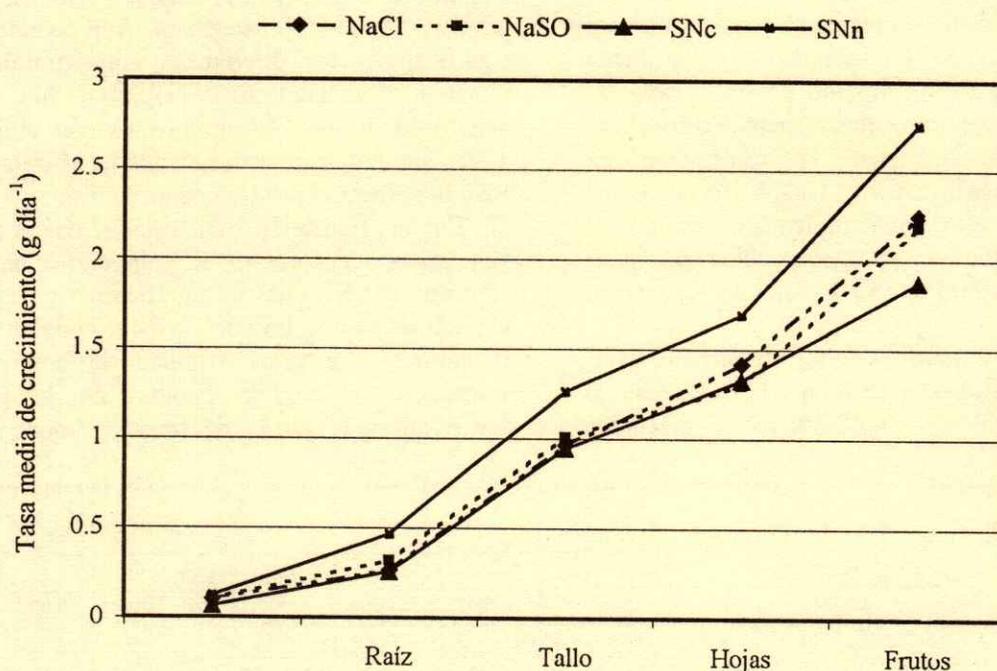


Figura 1. Efecto de la salinidad sobre la tasa media de crecimiento (MGR) del pimiento a partir de floración durante 23 días de desarrollo de los frutos.

principales. No obstante, el número de hojas continúa siendo afectado por la salinidad. En cambio, se exhibe un comportamiento inverso entre los tratamientos con Na y con SNc respecto al muestreo anterior. La disminución en el número de hojas fue de 16, 13 y 10%; dicho efecto no se manifiesta en el total de órganos reproductivos (tor).

En cuanto a la altura de la planta y el diámetro del tallo y su cociente, aunque sin diferencias estadísticas entre tratamientos, numéricamente la salinidad afectó en forma adversa estas características. La relación altura diámetro (RHD), proporciona un índice de ahilamiento, el tratamiento de SNc, la redujo en 12.5% (Cuadro 4), mientras que, al considerar sólo la altura del tallo principal, la longitud de entrenudos aumentó 21.6% en la determinación previa (Cuadro 2), la cual resultó de una mayor altura y un menor diámetro. La relación vástago/raíz disminuyó respecto al muestreo anterior como consecuencia de la poda realizada. Aun cuando las diferencias entre tratamientos no fueron significativas, el desequilibrio por efecto de la salinidad fue de 32, 18 y 21% para NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y SNc, respectivamente.

Sin haber diferencias significativas entre tratamientos en la producción de biomasa seca, la salinidad causó una reducción cercana a 30% que fue significativa en la biomasa seca radical con reducciones entre 28 y 37% en los tratamientos con Na y de 66% en SNc. En cambio, las diferencias fueron más pronunciadas y significativas en la biomasa fresca con una reducción de 46, 33 y 50% y afectaron fundamentalmente al sistema radical y a los frutos; esto revela que la salinidad disminuye el contenido hídrico de las plantas, incrementando su porcentaje de peso seco (%Ws), en torno a 2% (Cuadro 5) y, como consecuencia, dificultando sus funciones metabólicas.

El efecto de la salinidad sobre la tasa media de crecimiento (g d<sup>-1</sup>) por los órganos del pimiento se presenta en la Figura 1. Después de la floración del pimiento, los frutos son los órganos con más actividad de crecimiento (Cuadros 3 y 4, Figura 1), de acuerdo con Hall (1977), a 20 días después de la floración ya se ha definido la tasa media de crecimiento de los frutos (MGR), misma que diverge de manera considerable de las de la raíz, tallo y hojas que mantienen un equilibrio al sostener tasas de crecimiento paralelas. No obstante, las tasas medias de crecimiento son afectadas por la salinidad, siendo el efecto más acusado en la biomasa de los frutos (Figura 1). En primer lugar, se observa que la salinidad en el medio radical reduce, en general, las tasas medias de crecimiento. En segundo lugar, los frutos surgen demandando gran cantidad de carbohidratos (Rincón *et al.*, 1995), en el presente estudio significaron 25, 20 y 25% de la biomasa total para los tratamientos con Na, SNc y SNn, respectivamente. Las diferencias entre tratamientos se aprecian en los cambios de pendiente de las líneas, siendo éstos más pronunciados en la biomasa de los frutos y de las raíces y no en la biomasa de los tallos ni de las hojas que guardan un cierto paralelismo entre tratamientos. De lo anterior se deduce que debe haber una correspondencia entre las demandas: frutos-raíces. Los índices correspondientes de esta relación fueron 2.15 y 1.75 para los tratamientos con Na<sup>+</sup> y SN, lo que quiere decir que los tratamientos con Na<sup>+</sup> enviaron 19% más de materia seca al crecimiento de las raíces que con los de SN. La menor tasa media de crecimiento (MGR) en los frutos correspondió al tratamiento con SNc, en tanto entre los tratamientos con Na<sup>+</sup> prácticamente no hubo diferencias (Figura 1).

Los frutos de pimiento, aun antes de alcanzar la madurez, mostraron daños en forma de manchas

**Cuadro 4.** Efecto de la salinidad sobre algunos parámetros de desarrollo y crecimiento del pimiento durante la formación de los primeros frutos.

Trat.	nhts	nbo	nfr	BER	tor	Dt	Hp	RHD	Rvr	Wsmf	Wfmf
				%		cm	m			- - - g m <sup>-2</sup> - - -	
NaCl	19 a	13	9	38	23	1.23	0.55	44.8	8.2	2.1	22.2 a
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	19 a	12	11	63	23	1.27	0.53	42.4	7.3	1.8	19.7 a
SNc	20 a	14	8	22	23	1.27	0.45	36.3	7.5	1.6	16.6 a
SNn	22 b	13	10	22	24	1.40	0.57	40.8	6.2	2.5	36.8 b
P valor	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**

nfr = número de frutos; BER = frutos con podredumbre apical (Blossom End Rot); tor = total de órganos reproductivos (botones + flores + frutos); Hp = altura de planta; Wsmf y Wfmf = peso seco y fresco medio de fruto; el resto de las variables se describen en el Cuadro 2. NS, \* y \*\* significación estadística > 5, 5 y 1%, respectivamente.

Cuadro 5. Efecto de la salinidad sobre la partición de la producción de materia seca del pimiento en la etapa del desarrollo de los primeros frutos.

Trat.	Materia fresca					Materia seca					Ws <sup>†</sup>
	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos	Total	Raíz	Tallo	Hojas	Frutos	Total	
	----- g m <sup>-2</sup> -----										
	----- % -----										
NaCl	141 a	176	130	206 a	652 a	8.6 a	27.8	23.2	19.1	78.8	12.08 b
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	160 a	163	124	219 ab	667 a	9.8 a	28.1	19.8	20.3	78.1	11.75 b
SNC	100 a	149	115	131 a	495 a	7.4 a	23.7	18.6	12.6	62.3	12.60 b
SNn	225 b	224	185	361 b	995 b	13.6 b	33.1	26.9	24.5	98.2	9.88 a
P valor	*	NS	NS	*	*	*	NS	NS	NS	NS	**

<sup>†</sup> porcentaje de peso seco. NS, \* y \*\* significación estadística > 5, 5 y 1%, respectivamente.

necróticas circulares hacia el ápice y costado de los mismos, fisiopatía conocida como Blossom End Rot (BER) o "podredumbre apical", que deprecia seriamente la calidad de los frutos comerciales. Normalmente, aparece con frecuencia en los cultivos de pimiento de Alicante-Murcia y, en menor importancia, en Almería (Gamayo, 1996). Este desorden fisiológico, causado por una deficiencia local de calcio (Ca) en la pulpa del tejido de la parte terminal del fruto (Ho, 1999), en pimiento se ha menos estudiado que en tomate (Ho *et al.*, 1993), pero realmente la causa es similar (Wien, 1997). Aparece cuando los valores de Ca son bajos, cuando el fruto se está expandiendo rápidamente. Ho (1999) asentó que el BER puede ser inducido por un estatus de Ca bajo en la planta (debido a un estrés hídrico u osmótico), por un estatus bajo de Ca en el fruto (debido a una alta transpiración del dosel o por una resistencia alta del transporte en el xilema dentro del fruto) o por una demanda extra de Ca para mantener la permeabilidad de las membranas de las células (debido a un alargamiento acelerado de las células). Este problema es más evidente con temperaturas altas, agravado por problemas de salinidad (Adams y Ho, 1993; Gamayo, 1996). La alta presión osmótica de la solución, originada por el exceso de la concentración de sales, hace disminuir el gradiente del potencial hídrico de la planta. Esto ocasiona una disminución en la absorción de agua, afectando la absorción de iones que son transportados por flujo de masas, como el calcio y el boro.

Estadísticamente, la salinidad no afectó al número total de frutos con BER; sin embargo, los porcentajes de frutos afectados por los tratamientos de salinidad con NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y SNC se incrementaron en 70, 170 y 10%, respectivamente (Cuadro 4). Por lo tanto, de esta manera es evidente que los tratamientos con sodio incrementan la incidencia de BER en los frutos,

siendo este efecto mucho más acusado en el tratamiento de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Lo anterior ocurre debido a que el importe de agua y Ca vía xilema hacia los órganos de baja transpiración depende, en gran medida, de la presión radical. Así, la disponibilidad de agua en el medio radical no debe ser limitada, en particular durante el período nocturno para favorecer el transporte a larga distancia del calcio hacia los órganos de baja transpiración (frutos y brotes jóvenes) con alta demanda de Ca para su crecimiento (Marschner, 1995). De acuerdo con lo anterior, altos potenciales osmóticos en la zona radical reducen la presión radical y el influjo del Ca hacia las hojas jóvenes o frutos, causando síntomas de deficiencias de Ca, como los manifestados en este estudio. Adams y Ho (1993) atribuyeron la causa básica de esta fisiopatía a la falta de coordinación entre el transporte de asimilados por el floema y el de calcio por el xilema durante la rápida elongación celular en la placenta del tejido terminal de los frutos. El desarrollo del xilema interno del fruto también es restringido por la salinidad (Belda y Ho, 1993), decreciendo la habilidad de transporte de los frutos a la parte terminal. Además, cambios ambientales tienen influencia sobre la incidencia de BER; la susceptibilidad genética es la mayor causa del desorden. Por otro lado, Bar-Tal *et al.* (2001) encontraron que, tanto el rendimiento total de pimiento, como la calidad decrecieron rápidamente cuando la concentración de NH<sub>4</sub> en la solución se incrementó más de 2 mmol L<sup>-1</sup>. Para estos autores, el incremento en la concentración de NH<sub>4</sub> en la solución fue la principal causa de supresión de la concentración de Ca<sup>2+</sup> en las hojas y frutos, así como el incremento en la incidencia de BER y en los frutos aplanados.

Aunque se han argumentado incrementos en la relación Na/Ca como justificación del retraso en el transporte de Ca vía xilema hacia los frutos. Esta

limitación en la movilidad del Ca parece estar fuertemente modulada como consecuencia del efecto del ión acompañante, ya que la incidencia del BER es prácticamente el doble cuando la causa de la salinidad son los sulfatos, lo que sin duda está relacionado con la diferente solubilidad de ambas sales durante los procesos de transporte

El incremento de la salinidad no produjo variaciones en el número ni en el peso seco de los frutos; Le (2000) encontró resultados similares en tomate. Con la misma CE utilizada en este estudio tampoco encontró diferencias en el número ni en el peso total de los frutos. Sin embargo, la reducción del peso fresco por fruto a causa de la salinidad fue de 40, 46 y 55%. El efecto adverso de la salinidad también fue significativo en el peso medio de los frutos en fresco (Cuadro 4).

Como consecuencia del menor contenido hídrico en la planta, la salinidad, además de reducir el peso por fruto y aumentar la incidencia de BER, dificulta la sostenibilidad de estos sistemas agrícolas, por lo tanto, estos resultados se unen a las evidencias encontradas (Adams, 1991; Van Ieperen, 1996) y alertan una vez más la necesidad de hacer un uso racional de los recursos hídricos y la gestión del fertirriego en estas condiciones, dado que la recuperación de las tierras degradadas será muy costosa, difícil y muy lenta.

### CONCLUSIONES

- La salinidad afectó significativa y negativamente el diámetro del tallo, el área foliar, la biomasa seca total y la distribución de la misma, así como el desarrollo de botones florales. El efecto fue más pronunciado al incrementar la salinidad mediante la solución nutritiva concentrada, respecto a la salinidad impuesta con cloruro de sodio y sulfato de sodio, los cuales presentaron un efecto similar sobre dichos parámetros.
- La salinidad impuesta sobre la base de sodio afectó, en mayor medida, la biomasa del vástago respecto a la radical; lo contrario ocurrió con la salinidad impuesta al concentrar la solución nutritiva y manteniendo el equilibrio iónico.
- La salinidad mediante aportaciones de sodio redujo el contenido hídrico en la planta y en los frutos, en éstos causó una mayor incidencia de podredumbre apical (Blossom-End Rot, BER); el efecto fue más acusado en presencia de iones sulfato que de iones cloruro.

### AGRADECIMIENTOS

Al Plan Andaluz de Investigación, por la asignación de recursos para esta investigación a través del proyecto Recursos Naturales Medioambientales 151. Asimismo, al CONACyT, por el apoyo parcial brindado a través del proyecto 35248-B.

### LITERATURA CITADA

- Adams, P. 1991. Effect of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on the yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. *J. Hortic. Sci.* 66: 201-207.
- Adams, P. y L.C. Ho. 1989. Effect of constant and fluctuating salinity on the yield, quality and calcium status of tomatoes. *J. Hortic. Sci.* 64: 725-732.
- Adams, P. y L.C. Ho. 1993. Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and on the incidence of blossom-end rot. *Plant Soil* 154: 127-132.
- Adams, P. y R. Holder, 1992. Effect of humidity, Ca and salinity on the accumulation of dry matter and Ca by the leaves and fruit of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *J. Hortic. Sci.* 67: 137-142.
- Alarcón V., A.L. 1996. Fertirrigación del pimiento dulce en invernadero. pp. 45-52. *In: A. Namesny V. (Coord.). Pimientos. Compendio de Horticultura, S.L. Reus, España.*
- Banuelos, G.S., G.P. Offermann y E.C. Saim. 1985. High relative humidity promotes Blossom-End Rot on growing tomato fruit. *Hort. Sci.* 20: 894-895.
- Bar-Tal, A., B. Aloni, L. Karni, J. Oscrovitz, A. Hazan, M. Itach, S. Gantz, A. Avidan, I. Posalski, N. Tratkovski y R. Rosenberg. 2001. Nitrogen nutrition of greenhouse pepper. I. Effects of nitrogen concentration and NO<sub>3</sub>:NH<sub>4</sub> ratio on yield, fruit shape, and the incidence of Blossom-end Rot in relation to plant mineral composition. *HortSci.* 36: 1244-1251.
- Belda, R.M y L.C. Ho. 1993. Salinity effects on the network of vascular bundles during tomato fruit development. *J. Hortic. Sci.* 68: 557-564.
- Bleiholder, H., L. Buhv y C. Fellev. 1994. Compendium of growth stage identification keys for Mono- and Dicotyledonous Plants. Ciba-Geigy. Basel, Switzerland.
- Cockshull, K.E. 1998. Plant response and adaptation to water issues in the greenhouse environment. *Acta Horticulturae* 458: 201-206.
- Cunill, C. 2000. Recomposición de soluciones nutritivas. pp. 29-38. *In: Marfà, O. (Coord.). Recirculación en cultivos sin suelo. Compendios de Horticultura, S. L., España.*
- Ferraro G., F.J., J.A. Aznar, E. Mesa y B. Aguilera. 2000. El sistema productivo Almeriense y los condicionamientos hidrológicos. Estudios y monografías, Colección Economía. Instituto de Estudios de Caja Rural de Almería. Almería, España.
- Flower, T.J. 1999. Salinization and horticultural production. *Sciencia Horticulturae* 78: 1-4.
- Gamayo, J.D. 1996. El cultivo protegido de pimiento. pp. 34-39. *In: Namesny V., A. (Coord.). Pimientos. Compendio de Horticultura, S. L., España.*

- Hall, A.J. 1977. Assimilate source-sink relationship in *Capsicum annum* L. I. The dynamics of growth in fruiting and deflorated plants. *Austr. J. Plant Physiol.* 4: 623-636.
- Ho, L.C. 1999. The physiological basis for improving tomato fruit quality. *Acta Horticulturae* 487: 33-40.
- Ho, L.C., R.I. Grange y A.J. Picken. 1987. An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. *Plant, Cell and Environ.* 10: 157-162.
- Ho, L.C., R. Belda, M. Brown, J. Andrews y P. Adams. 1993. Uptake and transport of calcium and the possible cause of blossom-end rot in tomato. *J. Exp. Bot.* 44: 504-518.
- Hoffman, G.J. y S.L. Rawlins. 1971. Growth and water potential of root corps as influenced by salinity and relative humidity. *Agron. J.* 63: 877-880.
- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Ann Rev. Plant Physiol.* 24: 519-570.
- Krungs, H. 1997. Environmental influences on development, growth and yield. pp. 101-180. *In: Wien, H.C. (ed.) The physiology of vegetable crops.* CAB International, Oxford, UK.
- Li, Y.L. 2000. Analysis of greenhouse tomato production in relation to salinity and shoot environment. PhD dissertation. Wageningen University. Wageningen, The Netherlands.
- Lorenzo, P., E. Medrano y Ma. C. Sánchez-Guerrero. 2000. Recirculación en cultivo sin suelo de pepino en Almería. pp. 73-80. *In: Marfà, O. (Coord.) Recirculación en cultivos sin suelo.* Compendios de Horticultura, S. L., España.
- Marfà, O. 2000. La recirculación en los cultivos sin suelo. Elementos básicos. pp. 21-27. *In: Marfà, O. (Coord.) Recirculación en cultivos sin suelo.* Compendios de Horticultura 14. Ediciones de Horticultura. S.L. Reus, Catalunya, España.
- Marfà, O. y S. Gurí. 1999. Física de sustratos y oxigenación del medio radical. pp. 93-106. *In: Fernández F., M. e I.Ma. Cuadrado G. (eds.) Cultivo sin suelo. II Curso Superior de Especialización 5. 2ª Edición actualizada.* Junta de Andalucía, FIAPA. Caja Rural de Almería. España.
- Marín R., J. 2001. Portagrano 2001 Vademécum de Variedades Horticolas. Editorial ECIR. Almería, España.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. San Diego, CA.
- Naciones Unidas. 1999. World Population Prospects: The 1998 Revision (ST/ESA/SER.A/177). División de Población, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, Naciones Unidas. Nueva York.
- Rincón, L., J. Saez, E. Balsalobre y C. Pellicer. 1995. Crecimiento y absorción de nutrientes del pimiento grueso en cultivo bajo invernadero. *Invest. Agr. Prod. Prot. Veg.* 10(1): 47-59.
- Schwartz, M. y J. Gale. 1981. Maintenance respiration and carbon balance of plants at low levels of sodium chloride salinity. *J. Exp. Bot.* 32: 933-941.
- Stanghellini, C., W.T.M. Van Meurs, L. Simonse y J. Van Gaalen, 1998. Combined effect of climate and concentration of the nutrient solution on a greenhouse tomato crop. I. Vegetative growth. *Acta Horticulturae* 458: 221-230.
- Termaat, A. y R. Munns. 1986. Use of concentrated macronutrient solution to separate osmotic from NaCl-specific effects on plant growth. *Aust. J. Plant Physiol.* 13: 509-522.
- Valiente G., M. 2000. Riego y fertirrigación. pp. 13-89. *In: Alarcón, A.L. (Coord.) Tecnologías para cultivos de alto rendimiento.* Editorial Novedades Agrícolas. Torre Pacheco, Murcia, España.
- Van Ieperen, W. 1996. Consequences of diurnal variation in salinity on water relations and yield of tomato. PhD dissertation. Wageningen University. Wageningen, The Netherlands.
- Van Noordwijk, M. 1990. Synchronisation of supply and demand is necessary to increase efficiency of nutrient use in soilless horticulture. Van Beusichem, M.L. (ed.). *Plant Nutr. Physiol. and Application*, PLSO IPNC350: 525-531.
- Yeo, A. 1999. Predicting the interaction between the effects of salinity and climate change on crop plants. *Scientia Horticulturae* 78: 159-174.
- Waldron, L.J., N. Terry y J.A. Nelson. 1985. Diurnal cycles of leaf extension in unsalinized and salinized *Beta vulgaris*. *Plant Cell Environ.* 8: 207-211.
- Wien, H.C. 1997. Peppers. pp. 256-293. *In: Wien, H.C. (ed.) The physiology of vegetable crops.* CAB International. Oxford, UK.

# IMPACTO DE LA FUMIGACIÓN CON BROMURO DE METILO EN TIPOS MORFOLÓGICOS DE AMEBAS DESNUDAS DE UN SUELO AGRÍCOLA

## Impact of Methyl Bromide Fumigation on Morphological Types of Naked Amoebae in an Agricultural Soil

Salvador Rodríguez-Zaragoza<sup>1†</sup>, Ivonne Dorantes<sup>1</sup>, Joel Velasco-Velasco<sup>2</sup> y Ronald Ferrera-Cerrato<sup>2</sup>

### RESUMEN

Las amebas desnudas son organismos clave en el ciclo de los nutrientes, pues son depredadores de hongos y bacterias, y son las presas de los microinvertebrados del suelo. Por ello, el impacto negativo de los biocidas sobre los tipos morfológicos de las amebas puede explicar la ruptura del ciclo de los nutrientes en los suelos fumigados. El objetivo de este trabajo fue determinar el impacto de la fumigación con bromuro de metilo ( $43 \text{ mg m}^{-3}$ ) en los tipos morfológicos de amebas desnudas de un suelo agrícola. La hipótesis de esta investigación fue que el bromuro de metilo afectaría por igual a los tipos morfológicos. Se tomaron muestras de suelos antes de la fumigación y a seis, siete y ocho días posteriores a ésta, y se contrastaron con suelo sin fumigar. La cantidad de amebas se estimó mediante el número más probable y los datos se trataron con ANOVA de una vía. Las amebas más sensibles al tratamiento ( $P < 0.01$ ) fueron las del tipo *Acanthamoeba*, los tipos *Hartmannella* y *Mayorella* fueron menos sensibles y las del tipo *Naegleria* fueron resistentes. Hubo diferencia significativa ( $P < 0.01$ ) entre las cantidades de los grupos en el suelo fumigado, pero no hubo diferencia entre los grupos del suelo sin fumigar. La cantidad de amebas totales enmascaró las variaciones observadas en los diferentes grupos morfológicos en ambos tratamientos, por lo que se concluye que los tipos morfológicos reaccionan de manera diferente al bromuro de metilo y esta respuesta diferencial podría utilizarse como indicador de la persistencia del biocida en el suelo.

<sup>1</sup> Unidad de Biología, Tecnología y Prototipos. Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Iztacala, Tlalnepantla, estado de México

<sup>†</sup> Autor responsable (srodri@campus.iztacala.unam.mx)

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

Recibido: Mayo de 2001. Aceptado: Noviembre de 2003.  
Publicado en *Terra Latinoamericana*: 197-205.

**Palabras clave:** Biocidas, Amebas de vida libre, tipos morfológicos amebianos.

### SUMMARY

Free-living amoebae play a key role in nutrient cycling as predators of bacteria and fungi, and as prey of soil micro-invertebrates. This lead to the possibility of using these protozoa as indicators of biocide pathways in food webs, and their impact on the nutrient cycle in agricultural soils. Analysis of morphological types is a better approximation than total number of amoebae to distinguish the changes produced by methyl bromide in soils. Our objective was to determine the effect of methyl bromide fumigation ( $43 \text{ mg m}^{-3}$ ) on morphological types of naked amoebae in a cultivated soil. Our hypothesis was that all the morphological types would change in the same way with the amendment of methyl bromide. We took samples of both soils before fumigation and at six, seven, and eight days after the event. Samples were readily processed for MPN determination and these data were used for one way ANOVA analysis. *Acanthamoeba* (Type 1) was the most sensitive group ( $P < 0.01$ ), followed by *Hartmannella* (Type 3) and *Mayorella* (Type 4). *Naegleria* (Type 2) was resistant to the biocide at the concentration tested. We found significant differences ( $P < 0.01$ ) between the quantities of all the morphological groups in the treated soil. Total quantity of amoebae (sum of all types) masked the variation of individual groups in both soils. We concluded that morphological types react in a different way to methyl bromide, which can be used as an indicator of biocide persistence in soils.

**Index words:** Biocides, free-living amoebae.

### INTRODUCCIÓN

Las prácticas de protección de los cultivos, mediante la desinfección del suelo y la aplicación de toda la gama de biocidas, son muy comunes en la

agricultura moderna que intente disminuir las pérdidas por enfermedades o plagas y aumentar, así, el rendimiento de los cultivos. Estos métodos se contraponen al desarrollo de la eco-agricultura, en el sentido de que ésta es un tipo de uso sustentable del suelo, cuya principal idea es proteger y estimular la vida del mismo para incrementar o, al menos, mantener su productividad. Esta aproximación surge de la biología y de la ecología, en especial del principio de regulación de la abundancia, distribución y actividad de las especies en el espacio y en el tiempo (Foissner, 1997). La desinfección del suelo es una práctica común en los sistemas agrícolas no sustentables o de explotación intensiva que puede tener efectos deletéreos en otros grupos de organismos diferentes de aquellos a los que va dirigido, originando nichos vacíos y el rompimiento de las redes tróficas del suelo (Foissner, 1999). El uso de fungicidas como el Captan y el Fenpropimorph, por ejemplo, pueden tener efectos negativos en la microflora involucrada en el ciclo del nitrógeno en el suelo (Yeates *et al.*, 1991; Martínez-Toledo *et al.*, 1998; Ekelund, 1999), por lo que su utilización podría considerarse contraproducente. Los funguicidas, por lo regular, no tienen efectos muy marcados en todos los grupos de protozoos. Afectan marcadamente la cantidad de flagelados y ciliados, pero tienen poco efecto sobre la cantidad de amebas desnudas (Ekelund, 1999; Bjornlund *et al.*, 2000; Ekelund *et al.*, 2000). Los insecticidas y los herbicidas tienen un mayor efecto nocivo sobre los grupos funcionales de protozoos (Foissner, 1999). Los biocidas más potentes, como el bromuro de metilo, eliminan casi totalmente la población de protozoarios del suelo forestal y de pastizal sometidos a una fumigación de  $43 \text{ mg m}^{-3}$  (Yeates *et al.*, 1991).

Los protozoos son los principales depredadores de bacterias y hongos. Son responsables de 70% de la respiración animal del suelo (Foissner, 1997), por lo que son muy importantes para la nutrición de los invertebrados y, además, su ausencia puede retardar en varios meses la descomposición de la hojarasca (Foissner, 1999). Sin embargo, el cambio en la cantidad de estos organismos puede ser imperceptible en el sistema, ya que éste puede funcionar con pocas especies, aunque muestre la misma cantidad de individuos que antes de la perturbación (Bamforth, 1995).

Las amebas desnudas juegan un papel importante en la conexión entre las redes tróficas de la microflora y la fauna del suelo (Rodríguez-Zaragoza, 1994), pues

liberan los nutrientes retenidos en la biomasa de bacterias y hongos, con lo que evitan que éstas se conviertan en competidoras de las plantas. Al mismo tiempo, sirven de alimento para los microinvertebrados del suelo (Coleman *et al.*, 1977; Clarholm y Rossward, 1980), además, son los protozoarios más abundantes en la matriz edáfica (Wood, 1995; Rodríguez-Zaragoza, 2000). Sin embargo, los estudios sobre el efecto de los biocidas toman en cuenta la cantidad de amebas totales en el suelo después de la fumigación (Ingham *et al.*, 1991) o la cantidad de especies amebianas que recolonizan el suelo (Yeates *et al.*, 1991). Pero el problema en este último tipo de estudios es la falta de entrenamiento en el reconocimiento taxonómico de las amebas desnudas (Foissner, 1997), trabajo que requiere del aislamiento y cultivo de las muestras para poderlas identificar. De lo anterior, se desprende la necesidad de tener alternativas de diferenciación de las amebas, al menos en el nivel de grupos morfológicos o funcionales, pues estos grupos pueden ofrecer respuestas variadas a los biocidas, pero estas diferencias no se hacen evidentes en la cantidad total de amebas. Lo anterior posibilitará entender mejor el impacto de las fumigaciones en la parte biológica del ciclo de los nutrientes del suelo. Por ello, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la fumigación con bromuro de metilo en los tipos morfológicos de amebas desnudas de un suelo agrícola.

## MATERIALES Y MÉTODOS

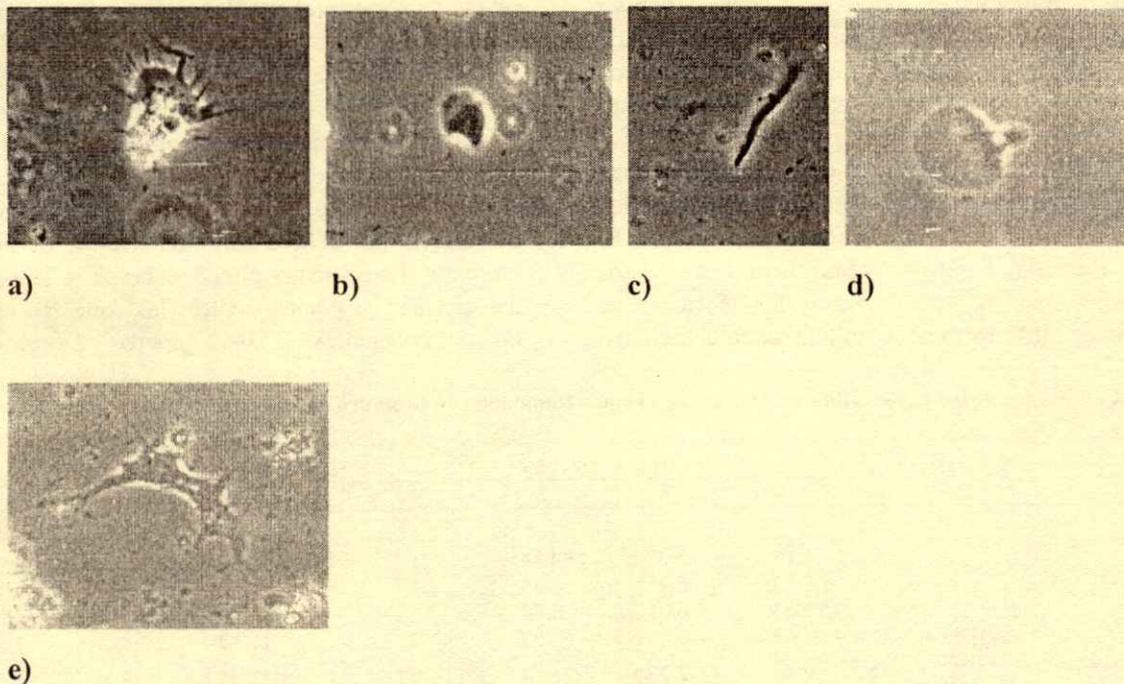
Se prepararon camas elevadas de 1 m de ancho por 10 m de largo, con suelo del lugar, en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados, en Montecillo, estado de México. Ambas camas se cubrieron con plástico negro y una de ellas se fumigó con bromuro de metilo, a una concentración final de  $43 \text{ g m}^{-3}$  de suelo. Se tomaron muestras de ambas camas por espátula, en la profundidad de 0 a 10 cm, antes de la fumigación y a seis, siete y ocho días posteriores a ésta (Velasco y Ferrera-Cerrato 1998). El suelo se colocó en bolsas de plástico y se mantuvo a  $4^\circ\text{C}$  hasta su análisis en el laboratorio. Para hacer la estimación de la cantidad de amebas, se procedió como sigue: las muestras se cernieron en fresco, se pesó 1 g de suelo y se resuspendió en 10 mL de extracto de suelo. El suelo se homogeneizó en vortex, mediante cinco a seis pulsos de 15 s cada uno. La mezcla se dejó reposar durante 1 h para la sedimentación de las arenas, los limos gruesos y

medios, y se tomó la cantidad necesaria para hacer una dilución inicial de  $1:10^1$ . Se tomaron 0.3 mL de esta dilución y se mezclaron con 2.7 mL de extracto de suelo para hacer una dilución de  $1:10^2$ , la cual se hizo directamente en los primeros cuatro pozos de la placa de cultivo celular. A partir de ésta, se hicieron diluciones decimales de  $1:10^3$ ,  $1:10^4$ ,  $1:10^5$ ,  $1:10^6$  y  $1:10^7$  en las siguientes hileras de cuatro pozos.

El extracto se preparó de la siguiente manera, se colocaron 250 g de suelo en 500 mL de agua bidestilada y se calentó por 3 h a  $60^\circ\text{C}$ , se le dejó reposar por 72 h a  $4^\circ\text{C}$  y se filtró en papel Whatman No. 2, se esterilizó a  $121^\circ\text{C}$  y 15 libras de presión durante 15 min. El extracto también se utilizó para hacer las diluciones en una placa de cultivo celular de 24 pozos, la cual se enriqueció con 0.1 mL de una suspensión de *Enterobacter aerogenes* muerta por calor.

Se observaron la presencia y tipos morfológicos distintivos de amebas desnudas (Anderson y Rogerson, 1995) con un microscopio invertido de

contraste de fases y se registró la presencia o ausencia en cada pozo. Los tipos morfológicos se distinguieron como sigue: las del Tipo 1 presentan subpseudópodos y están mejor representadas por la forma del género *Acanthamoeba* (Figura 1a), las del Tipo 2 presentan un solo pseudópodo envolvente cuya mejor representación la tienen los organismos de la familia Vahlkampfiidae (Figura 1b), las del Tipo 3 son amebas en forma de babosa de jardín y están mejor representadas por el género *Hartmannella* (Figura 1c), y las del Tipo 4 son las amebas con forma de abanico y están representadas por los géneros *Vannella*, *Platyamoeba* y *Mayorella* (Figura 1d). También se agregaron las amebas del Tipo 5, correspondiente a las reticuladas como *Vampyrella*, *Biomyxa* y *Leptomyxa* (Figura 1e). Estas amebas se presentan en los suelos no alterados y sólo en raras ocasiones se le han aislado de los suelos cultivados. Estas amebas presentan una forma de espiga con ramificaciones que se entrelazan, por lo que semejan a una raíz o una red.



**Figura 1. Tipos morfológicos de amebas de vida libre desnudas.**

a) *Acanthamoeba* sp (40x), b) *Rosculus ithacus* (100x), c) *Hartmannella* sp. (40x), d) *Vannella* sp. (40x), y e) *Biomyxa* sp. (40x). Todas las fotos se tomaron en microscopio de contraste de fases.

Esta división en tipos morfológicos permite registrar, a mayor profundidad, el efecto de los biocidas sobre la variedad de estos organismos, pues la estructura de la comunidad y su dinámica poblacional pueden indicar la dirección de los cambios bióticos y abióticos que se producen en su ambiente. La comparación del número de amebas totales se realizó mediante la prueba de Chi cuadrada del programa Systat® Ver. 6 para Windows® (Systat, 1996) y la comparación del número de individuos de los tipos morfológicos entre los suelos se hizo mediante el análisis de varianza de una vía con muestras repetidas, utilizando el mismo programa.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El bromuro de metilo es un biocida muy potente, pero tuvo poca o nula actividad en la eliminación de los quistes de resistencia de las amebas totales. Por eso, se observó una cantidad de poco más de 4 millones de amebas totales en el suelo hacia el sexto día (Cuadro 1). Esta población se mantuvo al séptimo día y decreció rápidamente a cantidades previas a la esterilización hacia el octavo día. En contraste, el crecimiento poblacional en el suelo testigo experimentó un alza de alrededor de 10 millones de individuos hacia el sexto día, aumentó otros 5 millones hacia el séptimo día y sólo aumentó 4 millones más hacia el octavo día.

En este estudio, se tomó la cantidad de amebas totales como la suma de los quistes viables y los trofozoítos presentes en las muestras de suelo. El método utilizado para contabilizar a estos protozoarios, *per se*, no separó las formas de resistencia de las formas fisiológicamente activas.

Para ello, debe agregarse algún compuesto químico que elimine instantáneamente a los trofozoítos, o incrementar la temperatura a 60 °C, pero estos procedimientos pueden amplificar el efecto del biocida y exagerar su verdadero impacto en la población de amebas desnudas (Singh, 1975). Todos los métodos de cuenta basados en el cultivo de los microorganismos dan una idea sesgada de la respuesta de la comunidad a las variaciones ambientales. Este sesgo exagera el papel de los organismos cultivables sobre los otros microorganismos de la comunidad (Foissner, 1999). Sin embargo, hasta que se desarrollen metodologías para contar directamente las amebas del suelo, se tendrá que hacer la estimación de las poblaciones de amebas por el número más probable.

El método de conteo también puede tener un efecto de subestimación de la población viable de amebas de vida libre de alrededor de 30% (Singh, 1975), pero el estudio se enfocó a la determinación de la tendencia de crecimiento de los tipos morfológicos de las amebas más que a determinar sus poblaciones máximas. Como se utilizó el mismo método de conteo en todos los casos, el error es similar en todos ellos y, en esencia, no modifica las curvas de crecimiento que se describen aquí.

La respuesta de los tipos de amebas fue diferencial, dado que el mayor efecto se encontró en las amebas del Tipo 1 (o *Acanthamoeba*), en las que la población descendió a la mitad a seis días, se mantuvo así las 24 h siguientes y luego declinó a valores no detectables al octavo día posterior a la adición del químico. Este efecto puede deberse a la sensibilidad de algunas especies, entre las que se encuentran las pertenecientes a los géneros *Echinamoeba* y

Cuadro 1. Cantidades de los cuatro tipos amebianos en el suelo fumigado con bromuro de metilo y sin fumigar<sup>†</sup>.

Suelo	Tiempo día	Tipo de ameba <sup>†</sup>				Total de amebas	Carbono microbiano mg g <sup>-1</sup>
		1	2	3	4		
Fumigado	0	4.54 a <sup>§</sup>	2.27 b	4.54 c	0 d	11.35 e	4.3
	6	2.27	6.81	4.54	2.27	15.89	4.4
	7	2.27	6.81	4.54	2.27	15.89	4.0
	8	0	9.1	2.27	0	11.37	2.6
No fumigado	0	4.54 f	2.27 f	4.54 f	0 f	11.35 g	4.6
	6	2.27	11.36	4.34	2.27	10.24	2.2
	7	4.54	6.81	9.1	4.54	24.99	2.1
	8	2.27	13.63	4.54	9.1	26.54	2.6

<sup>†</sup> Las cantidades están expresadas en millones de individuos por gramo de suelo y el tiempo está expresado en horas posteriores a la fumigación con bromuro de metilo. El tiempo cero es la toma de muestra antes de la aplicación del compuesto químico. <sup>‡</sup> Los tipos morfológicos de las amebas corresponden con los determinados en la Figura 1. <sup>§</sup> Las columnas con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ).

*Filamoeba*. El quiste de estos organismos carece de la doble pared de celulosa y queratina, característico del exoquiste de *Acanthamoeba* (Martínez, 1985). Esta característica del quiste explica la resistencia de las especies de *Acanthamoeba* a muchos de los factores que son letales para otras especies. Así, la disminución de organismos hacia el sexto día puede considerarse dentro de los límites normales para las amebas de este tipo morfológico, pues lo mismo sucedió en el suelo no fumigado. Sin embargo, el efecto amebicida del bromuro de metilo se observó hacia el final del periodo de estudio, lo cual puede significar que la población de amebas del Tipo 1 fue muy sensible al biocida y que aun *Acanthamoeba* sucumbió al bromuro de metilo, posiblemente en forma de trofozoito, pues la mayoría de las especies de este género tienden a exquistar en siete días (Martínez, 1985). Lo anterior explica porque sus cantidades cayeron a niveles inferiores al umbral de detección del método de conteo después de este tiempo.

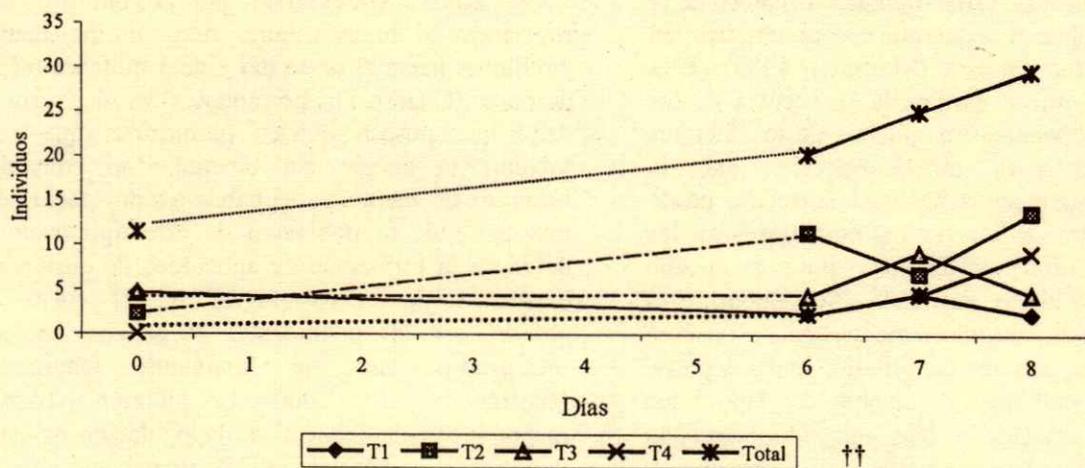
Una dinámica parecida se observó en las amebas del Tipo 4 (*Vannella - Mayorella*), que pasaron de cantidades abajo del umbral de detección de la técnica (Cuadro 1) a 2.27 millones al sexto día y luego declinaron como las del Tipo 1. La respuesta de las amebas del Tipo 4 fue inesperada porque la mayoría de las especies que pueden ordenarse en este grupo no producen quistes de resistencia en condiciones de cultivo (Page, 1988). Sus estrategias de resistencia consisten en la disminución de tamaño, el redondeo del trofozoito y el engrosamiento de la membrana celular, lo cual incrementa la superficie de exposición a la matriz edáfica y aumenta la relación superficie-volumen celular. Esto último implica un mayor contacto de los organismos con el biocida, lo que haría suponer una eliminación más efectiva de estas amebas, manteniéndolas por debajo del umbral de detección de la técnica. Sin embargo, es posible que su respuesta al bromuro de metilo esté en función de su actividad metabólica, por lo que el biocida no eliminaría las formas de resistencia, pero entonces tampoco tendría una actividad quisticida.

Las del Tipo 3 (*Hartmannella*) mantuvieron una cantidad constante hasta el séptimo día, pero descendieron a la mitad 24 h después (Cuadro 1). Las amebas del Tipo 3 poseen quistes sencillos cubiertos de una matriz gelatinosa (Page, 1988) y también tardan en exquistar alrededor de seis días, por lo que el biocida actuó de la misma forma que en las del Tipo 1.

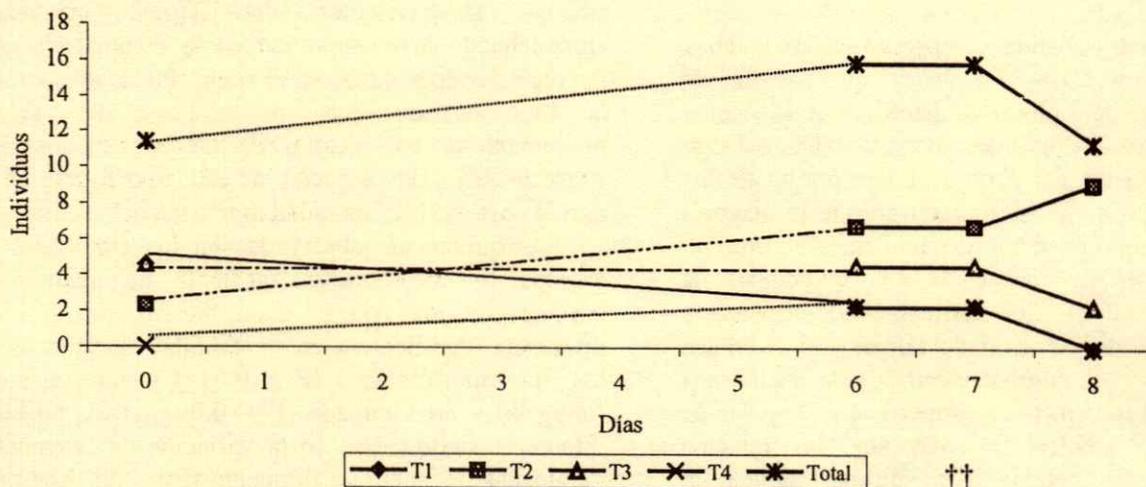
El Tipo 2 (*Naegleria*), por el contrario, mostró resistencia al biocida, pues tuvo un incremento de 4 millones hacia el sexto día y de 3 millones más 48 h después (Cuadro 1). Lo anterior es de sorprender, dado que poseen quistes permeables que podrían facilitar la acción del biocida. Sin embargo, el bromuro de metilo pudo haber tenido efecto sólo en una parte de la población de este tipo de amebas, debido a la formación de agregados de quistes o a la existencia de micro-refugios en el suelo, como sucedió con las poblaciones de hongos, bacterias y protozoarios ante el funguicida fenpropimorph (Bjornlund *et al.*, 2000). Lo anterior explicaría el menor incremento inicial de la población de este tipo de amebas, comparado con su incremento en el suelo no fumigado. Su tendencia a crecer hacia el octavo día podría deberse a dos razones: a) la concentración del bromuro de metilo ya estuviese por debajo del umbral biocida y b) se habría hecho una selección de las amebas más resistentes. Esto permitiría que las amebas supervivientes del Tipo 2 estuviesen aprovechando la disminución en la competencia por los recursos disponibles en el suelo. Puede adelantarse la hipótesis de que las amebas del Tipo 2 predominarían en el total de amebas en los días subsiguientes y las especies de este tipo formarían la mayor parte de la comunidad amebiana del suelo.

Las diferencias observadas en las cantidades de amebas se corroboraron mediante un análisis de varianza de una vía, el cual mostró que sí hubo diferencia significativa en la cantidad de amebas de los tipos morfológicos ( $P = 0.013$ ) y entre el suelo fumigado y no fumigado ( $P = 0.001$ ). Pero no hubo diferencia significativa en la variación de la cantidad de amebas del suelo no fumigado ( $P = 0.2$ ). Los tipos amebianos presentaron oscilaciones poblacionales no sincrónicas en el suelo sin fumar, pero estas oscilaciones quedaron enmascaradas en la cuenta de amebas totales, las que muestran una tendencia sostenida de crecimiento poblacional con una leve desaceleración hacia el final del estudio (Figura 2a). Por su parte, la tendencia de crecimiento en los tipos amebianos y en el total de amebas en el suelo fumigado fue negativa hacia el final del estudio (Figura 2b). Las amebas del Tipo 1 y 4 fueron las más sensibles al tratamiento con bromuro de metilo ( $P < 0.01$ ).

El efecto tóxico del bromuro de metilo sobre los cuatro tipos de amebas desnudas puede apreciarse mejor a ocho días del tratamiento. Lo anterior se debe a que las especies de crecimiento rápido pueden



### a). Suelo no fumigado



### b). Suelo fumigado con bromuro de metilo

Figura 2. Dinámica poblacional de los diferentes tipos amebianos.<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Las unidades están expresadas en millones de individuos por gramo de suelo.

<sup>††</sup> La leyenda se refiere a los tipos morfológicos de las amebas y

Total se refiere a la suma de los tipos de amebas.

exquistar en un término de tres a siete días después de la adición de agua, mientras que otras especies lo hacen hasta el día 25 (Rodríguez-Zaragoza, 1994, 2000). La declinación en la cantidad de amebas se pudo haber producido por el consumo de bacterias muertas por el bromuro de metilo (efecto indirecto) o

directamente por la acción de éste sobre los trofozoítos, como se observó en la comunidad de flagelados expuestos al propiconazol (Ekelund *et al.*, 2000).

En contraste con el suelo fumigado, los tipos morfológicos presentaron oscilaciones no sincrónicas

en la cantidad de organismos del suelo no tratado. Esto implica que el cambio en la composición de especies amebianas, por la aplicación del biocida, se produce en mucho menos tiempo que el observado en otros estudios y con otros grupos de protozoos. Por ejemplo, Ekelund *et al.* (2000) observaron que el propiconazol tuvo un ligero efecto en la comunidad total de flagelados, pero que tres de las cuatro especies que probaron fueron sensibles al biocida. Petz y Foissner (1989) hallaron que el cambio de especies en la comunidad de ciliados persistió a 90 días posteriores a la aplicación de fungicidas, pero no hubo un cambio apreciable en la cantidad total de ciliados. Por ello, la sustitución de la variedad de especies y tipos morfológicos es un indicador más fino del efecto del bromuro de metilo en la red trófica del suelo, que la estimación de la cantidad total de amebas.

Un estudio taxonómico de las amebas puede mostrar con mayor precisión y rapidez los cambios operados en el sistema por la aplicación del biocida (Foissner, 1997) y la duración del efecto residual del mismo, pues las especies sensibles sólo aparecerán cuando las concentraciones biodisponibles del compuesto estén por debajo de su concentración letal o umbral biocida. La cantidad total del compuesto en el suelo puede ser mayor que la biodisponible, debido a que la presencia de ácidos húmicos provoca una disminución neta del biocida, inmovilizando una parte del compuesto mediante la adsorción, el secuestro e, incluso, mediante reacciones químicas que reducen su toxicidad (Gevao *et al.*, 2000).

La comparación de las variaciones de la cantidad de amebas con la cantidad de carbono microbiano (obtenido como miligramos de carbono por gramo de suelo, Cuadro 1) arrojaron las siguientes correlaciones ( $\alpha < 0.05$ , Figura 2). El carbono microbiano del suelo fumigado correlacionó negativamente con todos los tipos de amebas desnudas, pero las correlaciones más altas las tuvo con las amebas del Tipo 2 (*Naegleria*,  $r = -0.84$ ), con las amebas del Tipo 4 (*Vannella*,  $r = -0.715$ ) y con las amebas totales ( $r = -0.72$ ). En este tratamiento también hubo correlaciones entre los tipos de amebas, por ejemplo, las amebas del Tipo 1 (*Acanthamoeba*) tuvieron correlación negativa con las del tipo *Naegleria* ( $r = -0.97$ ), mientras que las mismas *Acanthamoeba* tuvieron correlación positiva con las del Tipo 3 (*Hartmannella*,  $r = 0.82$ ). En el suelo no fumigado, las correlaciones más negativas las obtuvo el carbono microbiano con las amebas tipo *Vannella* y con las totales ( $r = -0.9$  y  $-0.8$ , respectivamente), se mantuvo la correlación negativa

entre *Acanthamoeba* y *Naegleria* ( $r = -0.91$ ), pero hubo correlaciones positivas entre *Naegleria* y *Vannella* ( $r = 0.77$ ), *Naegleria* y la cantidad de amebas totales ( $r = 0.81$ ), y entre estas últimas y las del tipo *Vannella* ( $r = 0.95$ ). Un diagrama basado en las correlaciones entre los tipos de amebas y el carbono microbiano y cómo se modifican por la aplicación del biocida en el suelo, puede verse en la Figura 3. La aplicación del bromuro de metilo tuvo un impacto directo en las relaciones de depredación entre los tipos morfológicos de amebas y la biomasa bacteriana tomada como mg de CO<sub>2</sub> por gramo de suelo.

La correlación más alta en el suelo fumigado se encontró entre la biomasa microbiana y las amebas del tipo *Naegleria*, debido a su resistencia al bromuro de metilo. Las correlaciones positivas que se encontraron en el suelo no fumigado implican un crecimiento poblacional más o menos sincronizado de los tipos de amebas en ausencia del factor de tensión. En esta situación, las amebas regulan las poblaciones bacterianas, estimulan la mineralización del carbono por las bacterias y ellas mismas contribuyen a la mineralización del nitrógeno, lo que produce un efecto benéfico para las plantas (Coleman *et al.*, 1977; Clarholm y Rossward, 1980; Weekers y Van der Drift, 1993; Foissner, 1997), pero la inexistencia de dichas correlaciones en el suelo fumigado con bromuro de metilo indican que este biocida afecta, de manera importante, el ciclo de los nutrientes en el suelo.

La retención de los nutrientes del suelo se lleva a cabo por dos vías: la formación de complejos con otros compuestos de la matriz edáfica, como sucede con el fósforo (Vetterlein *et al.*, 1999), y la fijación de los nutrientes en la biomasa (Raulud-Rasmussen y Vejre, 1995). En el primer caso existen grupos de microorganismos especializados que hacen posible la liberación de los nutrientes de la matriz del suelo y su posterior utilización por ellos mismos y por las plantas, mientras que los nutrientes fijados en la biomasa se liberan por la depredación de los protozoos sobre las bacterias y de éstos por los microinvertebrados (Brown, 1995; Zheng *et al.*, 1997). La liberación ocurre en forma de desechos y exudados de los microorganismos que quedan a disposición de las plantas (Coleman, 1994). La aplicación de biocidas, como el bromuro de metilo, rompe el ciclo de los nutrientes al eliminar a las especies sensibles y al favorecer a las resistentes, como sucede con otros desinfectantes (Foissner, 1997). Al interrumpir en varias vías el ciclo de los

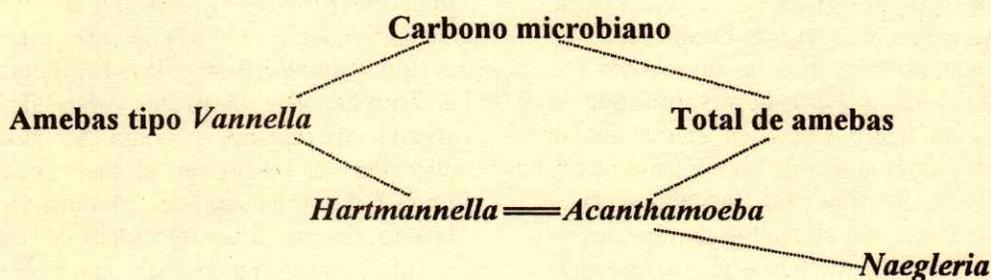
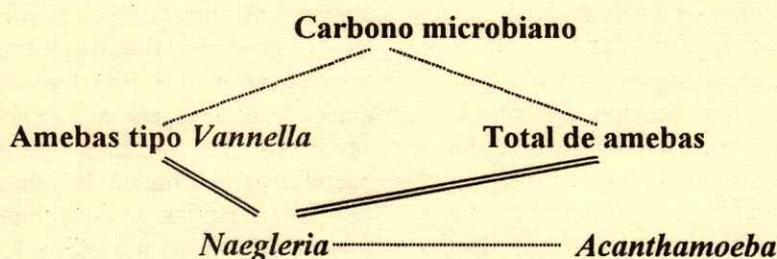
(a) Suelo Fumigado<sup>†</sup>(b) Suelo sin Fumigar<sup>†</sup>

Figura 3. Diagramas de las correlaciones entre los tipos amebianos y el carbono microbiano.

<sup>†</sup> La doble raya implica una correlación positiva, mientras que la raya punteada significa una correlación negativa.

nutrimentos, el suelo se expone a la pérdida neta de éstos, mediante la volatilización, la lixiviación o el lavado, debido a que las rutas biológicas de retención de los nutrimentos quedaron rotas o severamente alteradas. Por ello, puede haber una productividad alta del cultivo en el primer ciclo posterior a la desinfección, pero deberá tomarse en cuenta la pérdida de nutrimentos para fertilizar de manera adecuada el cultivo en los ciclos subsecuentes. Esta tarea es más difícil de lo que parece, debido a que cada tipo de biocida (funguicida, herbicida e insecticida) impacta negativamente a los grupos de microorganismos (Foissner, 1997), por lo que es necesario hacer el diagnóstico de su impacto sobre las especies y los principales grupos funcionales de microorganismos del suelo, aunque aún hace falta establecer cuáles son los grupos de microorganismos clave para el sostenimiento de la productividad del sistema edáfico.

## CONCLUSIÓN

El bromuro de metilo afecta diferencialmente a las poblaciones de los tipos morfológicos de amebas desnudas. El mayor efecto lo tiene en las amebas del Tipo 1 y 4 (*Acanthamoeba* y *Vannella* - *Mayorella*), mientras que las de los Tipos 2 y 3 (*Vahlkampfiidae* y *Hartmannella*) tienen un mayor grado de resistencia, pero la respuesta global sobre la cantidad total de amebas enmascara el efecto producido en cada tipo morfológico. La pérdida de grupos morfológicos puede impactar negativamente la retención biológica de los nutrimentos y exponer al sistema edáfico a la pérdida de los mismos. Para entender mejor el proceso de recuperación de la productividad del sistema agrícola, es necesario abordar el estudio de los grupos funcionales y de la riqueza de especies en los suelos que se recuperan de una fumigación, la sensibilidad de las especies clave a los biocidas, el efecto residual de éstos, así como su impacto en las vías del ciclo de los nutrimentos.

## LITERATURA CITADA

- Anderson, O.R. y A. Rogerson. 1995. Annual abundance and growth potential of gymnamoebae in the Hudson estuary with comparative data from the firth of Clyde. *Eur. J. Protistol.* 31: 223-233.
- Bamforth, S.S. 1995. Interpreting soil ciliate biodiversity. *Plant Soil* 170: 159-164.
- Bjornlund, L., F. Ekelund, S. Chistensen, C. Suhr Jacobsen y K. Johnsen. 2000. Interactions between saprotrophic fungi, bacteria and protozoa on decomposing wheat roots in soil influenced by the fungicide fenpropimorph (Corbel®): A field study. *Soil Biol. Biochem.* 32: 967-975.
- Brown, G.G. 1995. How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity? *Plant Soil* 170: 209-231.
- Clarholm, M. y T. Rossward. 1980. Biomass and turnover of bacteria in a forest soil and peat. *Soil Biol. Biochem.* 12: 49-57.
- Coleman, D.C. 1994. The microbial loop concept as used in terrestrial soil ecology studies. *Microb. Ecol.* 28: 245-250.
- Coleman, D.C., C.V. Cole, R.V. Anderson, M. Blaha, M.K. Campion, M. Clarholm, E.T. Elliot, H.W. Hunt, B. Shaefer y J. Sinclair. 1997. An analysis of rhizosphere-saprophage interactions in terrestrial ecosystems. *Soil organisms as components of ecosystems. Ecol. Bull. (Stockholm)* 25: 299-309.
- Ekelund, F. 1999. The impact of the fungicide fenpropimorph (Corbel®) on bacterivorous and fungivorous protozoa. *J. Appl. Ecol.* 36: 233-243.
- Ekelund, F., K. Westergaard y D. Soe. 2000. The toxicity of the fungicide propiconazole to soil flagellates. *Biol. Fert. Soil* 31: 70-77.
- Foissner, W. 1997. Protozoa as bioindicators in agroecosystems, with emphasis on farming practices, biocides, and biodiversity. *Agric. Ecosyst. Environ.* 62: 93-103.
- Foissner, W. 1999. Soil protozoa as bioindicators: Pros and cons, methods, diversity, representative examples. *Agric. Ecosyst. Environ.* 74: 95-112.
- Gevao, B., K.T. Semple y K.C. Jones. 2000. Bound pesticide residues in soils: A review. *Environ. Pollut.* 108: 3-14.
- Ingham, E.R., R. Parmelee, D.C. Coleman y D.A. Crossler Jr. 1991. Reduction of microbial and faunal groups following applications of streptomycin and captan in Georgia no-tillage agroecosystems. *Pedobiol.* 35: 297-304.
- Martínez, J.A. 1985. Free-living Amoebae: Natural history, prevention, diagnosis, pathology, and treatment of disease. CRC Press. Boca Ratón, FL.
- Martínez-Toledo, M.V., V. Salmerón, B. Rodelas, C. Pozo y J. González-López. 1998. Effects of the fungicide Captan on some functional groups of soil microflora. *Appl. Soil Ecol.* 7: 245-255.
- Page, F.C. 1988. A new key to freshwater and soil gymnamoebae. Freshwater Biological Association & Natural Environmental Research Council. London, U.K.
- Petz, W. y W. Foissner. 1989. The effects of Mancozeb and Lindane on the soil microfauna of a spruce forest: A field study using a completely randomized block design. *Biol. Fert. Soil* 7: 25-231.
- Raulud-Rasmussen, K. y H. Vejre. 1995. Effect of tree species and soil properties on nutrient immobilisation in the forest floor. *Plant Soil* 168-169: 345-352.
- Rodríguez-Zaragoza, S. 1994. Ecology of free-living amoebae. *Crit. Rev. Microbiol.* 20: 225-241.
- Rodríguez-Zaragoza, S. 2000. Variación de la comunidad de amebas desnudas en respuesta a la perturbación de un suelo forestal de encino - pino en Villa del Carbón, Estado de México. Tesis de doctorado. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.
- Singh, B.N., 1975. Pathogenic and Non-pathogenic amoebae. McMillan Press. London, U.K.
- SYSTAT for Windows. 1996. Student version 6.0.1. SPSC Inc. and Prentice Hall. Chicago, IL.
- Velasco, J. y R. Ferrera-Cerrato. 1998. Impacto del bromuro de metilo sobre las poblaciones microbianas del suelo. In: Ordaz Chaparro, V y P. Sánchez García (eds.). La Investigación Edafológica en México 1997-1998. Memoria del 29º Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Tapachula de Córdova y Ordóñez, Chiapas, México.
- Vetterlein, D., C. Bergmann y R.F. Hüttel. 1999. Phosphorous availability in different types of open cast-mine export and the potential impact of organic matter application. *Plant Soil* 213: 189-194.
- Weekers, P.H.H. y C. van der Drift. 1993. Nitrogen metabolizing enzyme activities in free-living amoebae *Acanthamoeba castellanii*, *Acanthamoeba polyphaga* and *Hartmannella vermiformis*. *J. Euk. Microbiol.* 40: 251-254.
- Wood, M. 1995. Environmental soil biology. 2<sup>nd</sup> edition. Chapman & Hall. London, U.K.
- Yeates G.W., S.S. Bamforth, D.J. Ross, K.R. Tate y G.P. Sparling. 1991. Recolonization of methyl bromide sterilized soils under four different field conditions. *Biol. Fert. Soil* 11: 181-189.
- Zheng, S.W., J. Bengston y G.I. Ågren. 1997. Soil food webs and ecosystem processes: Decomposition in donor-control and Lotka-Volterra systems. *Am. Nat.* 149: 125-148.

# PROMOCIÓN DEL CRECIMIENTO EN VIVERO DE *Casuarina equisetifolia* (L.) POR MICROORGANISMOS SIMBIOTES

Promotion of *Casuarina equisetifolia* (L.) Growth in the Nursery by Symbiotic Microorganisms

María Valdés<sup>1†</sup>, Abel Cayetano Rodrigo<sup>2</sup>, Marco A. Leyva<sup>2</sup> y Alejandro D. Camacho<sup>1</sup>

## RESUMEN

*Casuarina equisetifolia* es un árbol de origen australiano bien adaptado en México; excelente candidato para la reforestación rural y urbana en los trópicos, porque fija nitrógeno atmosférico en simbiosis con la bacteria *Frankia* y porque es un árbol de crecimiento rápido. Además, la presencia de micorrizas en sus raíces puede incrementar el crecimiento de esta planta, así como su capacidad de fijación de nitrógeno, contribuyendo a su sobrevivencia en el trasplante en suelos marginales. Sin embargo, hay pocas experiencias en vivero en relación con la respuesta del árbol frente a los microorganismos con los que se asocia. El propósito de este trabajo fue evaluar el crecimiento de esta planta en simbiosis con la bacteria fijadora de nitrógeno *Frankia*, en co-inoculación con el hongo micorrízico arbuscular *Glomus intraradices* o con el hongo ectomicorrízico *Pisolithus tinctorius*. El efecto de estos microorganismos simbiotes en la promoción del crecimiento se comparó con el efecto de fitohormonas comerciales, práctica común de uso de este tipo de sustancias en la producción de las plantas. La inoculación individual de cada microorganismo mostró efectos significativos sobre el crecimiento de la planta. Los incrementos producidos por la co-inoculación de *Frankia* + *G. intraradices* fueron superiores a los otros tratamientos y sinérgicos; el volumen de las plantas inoculadas solo con el hongo mostró un incremento de 750% con respecto al testigo y cuando la inoculación fue doble, el incremento fue de 1093%. Este mismo tratamiento indujo una estimulación en el número y en la biomasa de los nódulos, en su actividad nitrogenasa (ARA) y

en el nitrógeno total de la planta. El efecto individual de cada microorganismo es significativamente superior al efecto producido por las fitohormonas comerciales.

**Palabras clave:** *Casuarina*, *simbiosis*, *Frankia*, *Glomus*, *Pisolithus*, *auxinas*.

## SUMMARY

*Casuarina equisetifolia* (L.) is an Australian tree that is well adapted to Mexican environmental conditions; it is an excellent candidate for afforestation and soil reclamation in urban and in field sites in subtropical and tropical areas, because it is fast-growing and a good nitrogen fixer. Symbiotic microorganisms such as arbuscular and ectomycorrhizal fungi can increase its growth and nitrogen fixation rates contributing to its survival when transplanted in marginal sites. However, there is little literature available on the interactions of microorganism with the plant in the nursery. The purpose of this work was to evaluate the efficiency of the nitrogen/fixing bacterium *Frankia* in promoting growth of the tree when inoculated alone or co-inoculated with a mycorrhizal fungus. We inoculated *Casuarina* seedlings with *Frankia*, alone or in dual inoculation with *Glomus intraradices* or *Pisolithus tinctorius*, and compared the effects with those of commercial hormone formulations used in several nurseries. Results indicate significant effects of all the microorganisms on plant growth. Volume of the plants inoculated with the *Frankia* + *G. intraradices* combination showed a significant growth and synergistic increase, single inoculation had a 750% increase compared with the uninoculated plants and a 1093% increase in co-inoculation. A significant increase in numbers, biomass and nitrogenase activity (ARA) of nodules resulted with the same treatment; total N content of the plants was also increased. Individual effects on plant growth for all the microorganisms tested were higher compared to those of commercial hormones.

<sup>1</sup> Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. Apartado Postal CON-264, 06400 México D.F.

<sup>†</sup> Autor responsable (mvaldes@enb.ipn.mx)

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Guerrero. Chilpancingo, Guerrero, México.

*Index words:* Symbiosis, Casuarina, growth promotion, Frankia, Glomus, Pisolithus, auxins.

## INTRODUCCIÓN

La reforestación es cada vez más importante como instrumento eficaz de reducción de los efectos nocivos, tanto de los suelos marginales, como de los contaminados. Muchos estudios han demostrado que la restauración de la vegetación de esos suelos por medio de procesos naturales es extremadamente lenta (Russell y La Roi, 1986). Con la reforestación se puede acelerar este proceso, sobre todo en los sitios más afectados. Aun si se llevan a cabo, durante los trabajos de reforestación, otras actividades que permitan el desarrollo de diferentes formas de vegetación, una buena ventaja es que los árboles seleccionados sean vigorosos (Strong, 2000).

*Casuarina equisetifolia* (L.) es un árbol excelente como candidato para la reforestación rural y urbana en los trópicos, porque se trata de un árbol fijador de nitrógeno atmosférico, de crecimiento rápido y que cuenta con características fisiológicas que le permiten sobrevivir y crecer en condiciones muy adversas. Esta especie, conocida en los países hispanoparlantes y en Estados Unidos, como casuarina y en los países francófonos como filao, es uno de los árboles más propagados en los viveros mexicanos (Valdés y Cayetano, 1998). Esto se explica por el hecho de que las instituciones de servicio forestal mexicanas se interesan en especies de árboles de crecimiento rápido para reducir los efectos nocivos resultantes de la deforestación y de la degradación de los suelos.

Casuarina desarrolla en sus raíces una asociación con la bacteria filamentosa fijadora de nitrógeno *Frankia*, además de otras asociaciones con hongos micorrízicos. La primera provee directamente al árbol de nitrógeno asimilable y los segundos exploran el suelo buscando nutrimentos que transportan a la planta, además de darle otras ventajas. La importancia de la interacción entre estas asociaciones para la promoción del crecimiento de casuarina en suelos deficientes ya se ha establecido, tanto en laboratorio, como en el campo en otros países (Diem y Domergues, 1990). También se ha puesto de manifiesto un alto grado de coordinación entre la formación de nódulos y el proceso de la micorrización, lo que conduce al desarrollo de la simbiosis tripartita (Sempavalan *et al.*, 1995).

La presencia de la bacteria en la raíz se manifiesta por la formación de nódulos radicales. Sin embargo,

de acuerdo con las observaciones en muchos viveros mexicanos, las plantas no tienen nódulos. Por otro lado, el desarrollo de nódulos en los árboles que crecen en el campo tampoco es constante (Valdés y Cruz-Cisneros, 1996). Las plantas, al salir de los viveros sin los nódulos fijadores de nitrógeno, carecen de una adecuada asociación microbiana y no se establecen en forma óptima en los sitios a reforestar. Es conocido el hecho de que la optimización de la simbiosis del árbol es muy importante para producir árboles sanos y vigorosos, capaces de sobrevivir y establecerse en suelos degradados.

Por otro lado, la aplicación de reguladores de crecimiento comerciales, como las auxinas, a los árboles para acelerar su crecimiento, sobre todo en su primer año, se ha vuelto una práctica común en muchos viveros.

Bajo este contexto, en este ensayo, se ha tenido como objetivo evaluar la magnitud del estímulo en el crecimiento del árbol por la bacteria filamentosa, fijadora de nitrógeno *Frankia*, en forma individual y en co-inoculación con un hongo micorrízico a fin de optimizar su crecimiento en vivero. Asimismo, se comparó este estímulo con el producido por la aplicación de hormonas comerciales. Con esto, la hipótesis en este trabajo fue: las plantas de casuarina se desarrollarán mejor si se asocian con microsimbiontes adecuados, en la etapa de vivero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Microorganismos Inoculados

*Frankia*. La cepa utilizada es conocida como BR y fue proporcionada por el Dr. J. Schwenke del IRD (Instituto de Investigación para el Desarrollo) de Francia. Su propagación se hizo en medio de cultivo BAP (Murry *et al.*, 1984) durante dos meses con subcultivos hechos cada semana. El inóculo utilizado para cada planta es equivalente a 10 µg de proteína (método Bradford).

*Glomus intraradices*. El inóculo con este hongo endomicorrízico se elaboró con secciones de aproximadamente 1 cm de raicillas de poro colonizadas, en un soporte de agrolita y éste fue donado por Mme S. Parent de Premier Tech, Canadá. La inoculación a cada planta fue con 6 g de inóculo (2 secciones g<sup>-1</sup>).

*Pisolithus tinctorius*. El hongo se propagó primero en cajas de Petri durante dos semanas en medio MMN (Brundrett *et al.*, 1996) y, posteriormente, en botellas

de 1 L llenas con una mezcla de turba+vermiculita+solución nutritiva MMN. La incubación fue de tres meses a 24 °C. El inóculo se elaboró con el contenido de las botellas bien lavado. Cada planta se inoculó con 15 g de inóculo en el vivero donde había alrededor de 1.5 mg de micelio.

### Plantas

Las semillas de *Casuarina equisetifolia* (L.) se colectaron de un solo árbol y se desinfectaron con una solución de cloruro mercúrico a 0.1% durante 10 min, después se calentaron a 60 °C durante 1 min antes de ponerlas a germinar por cuatro días a 28 °C en arena estéril humedecida con agua. Las plantas así obtenidas se mantuvieron en una cámara de crecimiento durante 12 semanas antes de pasarlas al vivero.

### Tratamientos

En el momento del trasplante a las bolsas de polietileno del vivero, las plantas se inocularon con la bacteria fijadora de nitrógeno *Frankia* o con un hongo micorrízico (*G. intraradices* o *P. tinctorius*), o bien, con los dos tipos de microorganismos, la bacteria más un hongo micorrízico.

Con el fin de comparar las auxinas con el efecto producido por los microorganismos, sobre todo el de *P. tinctorius*, cuya capacidad de producir auxinas es conocida (Green *et al.*, 1982; Frankenberger y Poth, 1987), se le dio tratamiento a un conjunto de plantas con una fórmula comercial de hormonas (Biogen, mezcla de auxinas, giberelinas y citocininas) a razón de 5 mL de agua conteniendo 50 µM del producto, por plántula. La adición de hormonas se realizó dos veces, en el trasplante y tres meses después. Se conservaron plantas testigo a las que se les adicionó el inóculo estéril.

En otras palabras, los tratamientos fueron:

1. Testigo
2. *Glomus intraradices*
3. *Pisolithus tinctorius*
4. *Frankia*
5. Fitohormonas
6. *Frankia* + *G. intraradices*
7. *Frankia* + *P. tinctorius*
8. *Frankia* + fitohormonas

Las plantas se regaron en el mismo tiempo y en forma similar como se hace en el vivero para todas las plantas. Los envases con las plantas se distribuyeron

en la parte del vivero destinada al ensayo de acuerdo con un diseño de bloques completos al azar (por tratamiento) con cuatro repeticiones y 96 unidades experimentales por tratamiento. Las malezas se eliminaron a mano. La Figura 1 muestra una vista de los bloques de las plantas en el vivero.

### Suelo

El suelo con el que se trabaja usualmente en el vivero proviene de bosques de pino-encino que se mezcla con limo de río (suelo:limo de río, v:v 1:1) y, antes del llenado de las bolsas, se fumigó con bromuro de metilo (0.5 k/2 m<sup>3</sup>) para eliminar el riesgo de contaminación con otros microorganismos.

La textura del suelo corresponde a un migajón arenoso, con 5% de materia orgánica (método Walkley y Black), un pH de 5.4, 0.14% de N total (método Kjeldahl) y 36 mg kg<sup>-1</sup> de P (método Bray y Kurtz).

### Variables

Después de ocho meses de crecimiento en el vivero, se cosecharon, al azar, 20 plantas de cada tratamiento que fueron el objeto de las medidas siguientes: biomasa de la parte aérea y de la raíz, volumen aéreo y de raíz, número y biomasa de los nódulos, actividad nitrogenasa, N total (método Kjeldahl) y P (método Bray y Kurtz) de plantas y de raíces. Para evaluar la micorrización arbuscular, se analizaron 60 campos al microscopio de 20 raicillas, tomadas de cada una de las plantas aclaradas con KOH más tinción con azul de tripano, según Phillips y Hayman (1970). La ectomicorrización por *P. tinctorius*, además de evaluarse por examen visual de la superficie radical total (número total de raicillas micorrizadas; las micorrizas de *P. tinctorius* son bifurcadas de color dorado y las del vivero son coraloides de color café oscuro), se hizo por corte transversal de 10 raíces, tomadas al azar, de 10 plantas tratadas con ese hongo.

Plantas, raíces y nódulos se secaron a 80 °C durante dos días para determinar su peso seco. El volumen de las plantas se calculó de acuerdo con la fórmula D<sup>2</sup>H (diámetro<sup>2</sup> x altura) (Ruehle *et al.*, 1984); el volumen de las raíces se calculó por desplazamiento de agua en una probeta.

La determinación de los valores de la actividad nitrogenasa de los nódulos se efectuó indirectamente a



Figura 1. Conjunto de plantas de *Casuarina* creciendo en el vivero.

través de la reducción del acetileno en un cromatógrafo de gases Pye Unicam provisto de una columna llena con Porapak N 100 (Dart *et al.*, 1972).

#### Análisis Estadístico

Con los datos de cada serie experimental, se calculó la media ( $\bar{X}$ ) así como su error estándar. Se efectuó un análisis de varianza bifactorial (tratamiento, repetición) de acuerdo con un modelo general lineal, seguido de una prueba de rango múltiple de Q de Ryan-Einot-Gabriel-Welsch (Schlotzhaver y Littell, 1987) para comparación de medias. En todos los casos  $\alpha = 0.05$ . Los análisis se efectuaron con el sistema SAS, Versión 8 (SAS Institute, 1999).

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 1 muestra los análisis de varianza para las variables peso seco y volumen de la planta y volumen de la raíz, que son significativamente diferentes. En el Cuadro 2, se muestran los resultados de la prueba de comparación de medias, que conduce

a la siguiente interpretación: el grupo de plantas inoculadas con *Frankia*, ya sea la bacteria sola o en co-inoculación con un hongo micorrízico, o bien, en presencia de auxinas, forma un bloque de tratamientos diferentes estadísticamente a los otros en todas las variables de crecimiento (excepción hecha del volumen de las raíces).

La biomasa de las plantas muestra los valores más bajos en las plantas testigo, mientras que las plantas tratadas con *Frankia*, o bien en doble inoculación, tienen los valores más elevados. El tratamiento testigo es significativamente diferente de todos los otros tratamientos ( $P = 0.0001$ ) y, como en todas las variables, no hay diferencias significativas entre los tratamientos dobles y el tratamiento con *Frankia*.

Es bien conocido, a través de los trabajos hechos en regiones tropicales, que los hongos micorrízicos juegan un papel mayor en el crecimiento, por el aporte de fósforo y como elemento sinérgico en la fijación de nitrógeno en los árboles de la familia de las leguminosas (Ducouso, 1991); con la especie *Casuarina* hay pocos trabajos, sin embargo Sempavalan *et al.* (1995) han mostrado que no hay competencia, sino una buena coordinación entre los

Cuadro 1. Resumen del análisis de varianza.

Tratamientos: 8: Fra; Fra+Aux; Fra+Gi; Fra+Pt; Gi Pt; aux; testigo  
 Repeticiones: (4x5)= 20  
 Observaciones 160

## Variable dependiente: Peso seco planta

Fuente	GL	SC	CM	F	Prob
Modelo	26	822.350	31.617	10.82	<0.0001
Error	133	388.536	2.921		
Total corregido	159	1210.573			

Fuente	GL	SC Tipo I	CM	F	Prob
Tratamiento	7	780.817	111.896	38.46	<0.0001
Repetición	19	41.219	2.169	0.74	0.77

## Variable dependiente: Volumen planta

Fuente	GL	SC	CM	F	Prob
Modelo	26	3189.248	122.663	7.85	<0.0001
Error	133	2079.064	15.632		
Total corregido	159	5268.312			

Fuente	GL	SC Tipo I	CM	F	Prob
Tratamiento	7	2888.166	412.595	26.39	<0.0001
Repetición	19	301.082	15.846	1.01	0.45

## Variable dependiente: Volumen de la raíz

Fuente	GL	SC	CM	F	Prob
Modelo	26	334.191	12.853	5.73	<0.0001
Error	133	298.295	2.243		
Total corregido	159	632.486			

Fuente	GL	SC Tipo I	CM	F	Prob
Tratamiento	7	283.6734375	40.525	18.07	<0.0001
Repetición	19	50.5171875	2.659	1.19	0.28

GL: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; CM: cuadrado medio; Prob: probabilidad.

microsimbiontes que conduce a un buen establecimiento de la simbiosis. Los resultados del presente estudio revelaron el beneficio de los microorganismos asociados a la casuarina; todas las plantas tratadas con los diferentes microorganismos mostraron un mejor crecimiento. Las plantas tratadas con la formulación de auxinas mostraron también un mejor crecimiento que las plantas testigo, pero menor que el de las plantas con microorganismos.

En general, resaltan los mejores crecimientos de las plantas con inoculación doble *Frankia+Glomus intraradices*; incluso el contenido de N total es más elevado que en las otras plantas. Este hecho podría explicarse porque al haber una nutrición fosforada mejorada por parte del hongo MA, la actividad nitrogenasa llevada a cabo por *Frankia* pudo haberse

estimulado, ya que el gasto en P de la nitrogenasa para reducir el nitrógeno del aire es elevado por las grandes cantidades de ATP que requiere.

En cuanto al volumen de las plantas (Cuadro 2, Figuras 2 y 3), el tratamiento *Frankia+Glomus intraradices* muestra 14 782 cm<sup>3</sup> contra 1242 cm<sup>3</sup> de las plantas no tratadas, lo que coloca a estos dos tratamientos en los extremos de los grupos de rango múltiple.

Con este mismo tratamiento se podría hablar de un efecto sinérgico de los dos organismos, puesto que el efecto de la inoculación individual es menor que el efecto de la inoculación de los dos microorganismos juntos. La sola presencia de los nódulos fijadores de *Frankia* indujo en las plantas de casuarina un incremento en su volumen de 830% con respecto a

**Cuadro 2. Efecto de la inoculación simple y doble de microorganismos simbióticos comparado con el efecto de hormonas comerciales en el crecimiento, la nodulación, la micorrización, P y N, de plantas de *Casuarina equisetifolia*, en vivero.**

Tratamiento	Variables											
	Peso seco planta	Volumen planta	Volumen raíz	No. de nódulos	Peso seco nódulos	Activ. nitrogenasa	P planta	N planta	P raíz	N raíz	MA <sup>1</sup>	EM <sup>2</sup>
	g	cm <sup>3</sup>			g	μmoles de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>				%		
Testigo	1.156 d <sup>1</sup>	1.242 d	1.25 d	-	-	-	0.15	1.68	0.10	0.73	9.0	0
<i>Glomus intraradices</i>	5.896 b	10.541 b	4.17 bc	-	-	-	0.18	1.67	0.10	0.95	80.5	0
<i>Pisolithus tinctorius</i>	4.070 c	7.354 c	3.82 bc	-	-	-	0.11	1.42	0.09	0.93	9.0	0
Auxinas	3.768 c	4.512 c	3.25 c	-	-	-	0.20	1.18	0.13	0.82	9.4	0
<i>Frankia</i>	7.052 ab	11.542 ab	4.32 bc	6.60	0.20	17.21	0.23	1.48	0.15	1.04	9.4	0
<i>Frankia</i> + <i>G.intrarad.</i>	7.799 a	14.782 a	6.25 a	8.65	0.42	27.80	0.17	2.91	0.11	1.74	79.5	0
<i>Frankia</i> + <i>P.tinct.</i>	7.547 a	12.334 ab	4.80 b	7.55	0.22	18.28	0.12	1.44	0.10	1.08	9.6	0
<i>Frankia</i> +auxinas	7.268 ab	11.936 ab	4.45 bc	7.10	0.20	18.57	0.15	1.22	0.10	0.97	9.6	0

<sup>1</sup> Medias con la misma letra no son significativamente diferentes. <sup>1</sup> Proporción de la raíz total con estructuras de micorriza arbuscular. <sup>2</sup> Proporción de raicillas totales ectomicorrizadas.

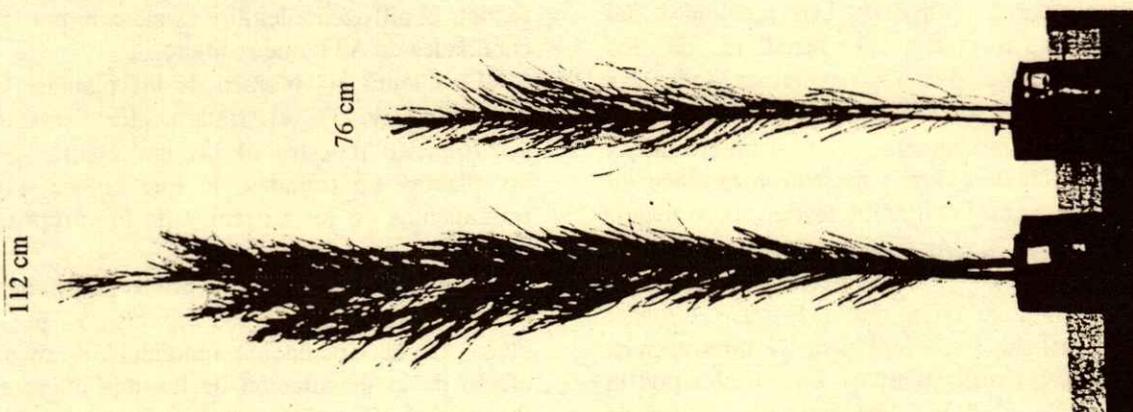
las plantas sin tratamiento; el aumento producido por la sola colonización endomicorrízica de *G. intraradices* fue de 750% y cuando los dos microorganismos fueron inoculados juntos, el incremento de su volumen fue de 1093%, también con respecto a las plantas testigo, lo que significa una ventaja para la planta en su futuro crecimiento debido a una mayor superficie fotosintética. En el caso del volumen de la raíz, el mejor tratamiento fue de manera consistente *Frankia* + *G. intraradices*, mientras que la respuesta disminuye significativamente en los otros tratamientos lo que refuerza el posible efecto sinérgico entre los dos microorganismos sobre el crecimiento de la planta.

Las plantas tratadas con las fitohormonas comerciales mostraron un efecto positivo en el

crecimiento, pero los valores son menores que los de las plantas inoculadas individualmente con los microorganismos estudiados. Por ejemplo, el volumen de las plantas inoculadas sólo con *Frankia* muestra un incremento de 193% respecto de las plantas tratadas sólo con fitohormonas y un incremento de 165% cuando se les trata con *Glomus intraradices*.

No se observó diferencia significativa para la variable volumen entre el tratamiento inoculado con *Frankia* + auxinas y el tratamiento inoculado sólo con *Frankia*.

En la variable volumen radical, las plantas testigo mostraron los valores más bajos con diferencia significativa respecto de los otros tratamiento; los valores más altos para esta variable se observaron en el tratamiento de la doble inoculación *Frankia* +



**Figura 2. Plantas de *Casuarina* de 10 meses de edad tratadas con los microorganismos simbióticos; a la izquierda, co-inoculación *Frankia* + *Glomus intraradices*; a la derecha, inoculación con *Frankia*.**

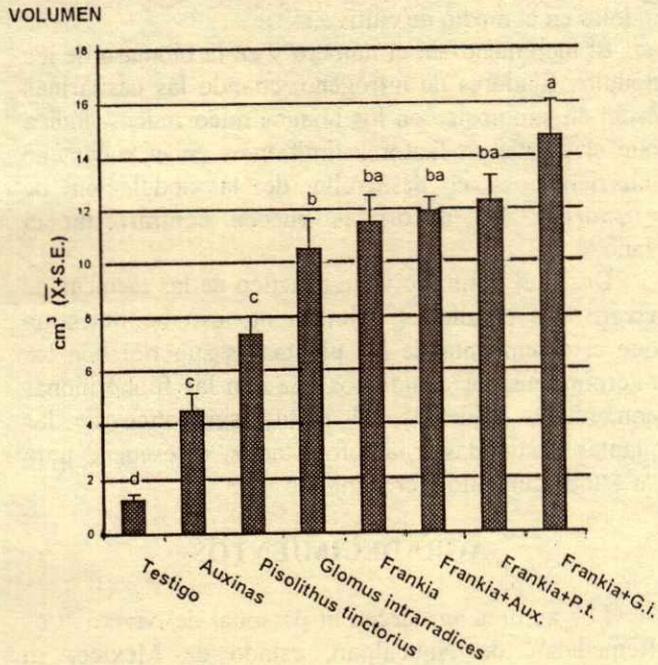


Figura 3. Incremento en el volumen de plantas de *Casuarina equisetifolia* por efecto de inoculación con microorganismos simbiotes.

*G. intraradices* y se mostró significativamente superior a todos los demás tratamientos.

El número de nódulos pasa de 6.60 a 8.65 y su biomasa de 0.2 a 0.42 g en doble inoculación *Frankia* + *G. intraradices* (Figura 4). En relación con la actividad nitrogenasa de los nódulos radicales, sus valores son similares en todas las plantas inoculadas con *Frankia*, ya sea en inoculación simple o en doble, excepción hecha del tratamiento *Frankia* + *G. intraradices*, cuya actividad aumenta de 17.21 a 27.80  $\mu\text{moles de C}_2\text{H}_4 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ; el porcentaje de N total de estas plantas es el más alto, 2.91% contra 1.48% en las plantas con inoculación sola de *Frankia* (Cuadro 1).

En la parte aérea de las plantas de los diferentes tratamientos, se observaron valores normales de P y de N. No se observaron los característicos síntomas de deficiencia en P. El suelo del vivero utilizado como sustrato es considerado como fértil. Las plantas con los valores más elevados en P fueron aquéllas inoculadas sólo con *Frankia*. Cabe mencionar que las plantas con fijación de nitrógeno activa requieren de grandes cantidades de P.

En el caso del N, las plantas con inoculación doble *Frankia* + *G. intraradices* mostraron las mayores

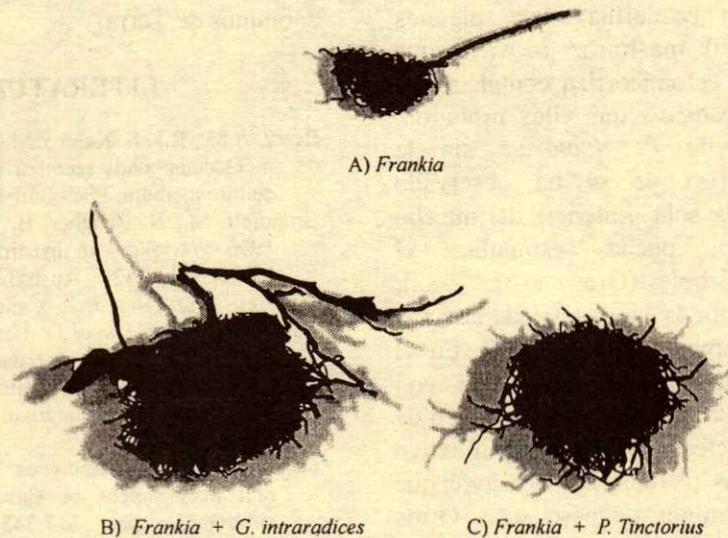


Figura 4. Nódulos formados por las plantas de casuarina inoculadas con *Frankia* o con *Frankia* más un hongo micorrizico.

concentraciones. Como se sabe, el mejor crecimiento de las plantas debido a la micorrización, por lo general es atribuido a una absorción más intensa de los elementos menos móviles como el P, lo que contribuiría a incrementar la fijación de nitrógeno.

El contenido de P en las plantas no mostró diferencias en los tratamientos inoculados con hongos micorrízicos *G. intraradices* o de *P. tinctorius*. Esto podría significar que la mejoría en el crecimiento de Casuarina inducida por los microorganismos es difícilmente explicable sólo con base en el mejoramiento de la absorción de nutrimentos por las plantas. Es posible que el efecto que se ha observado en el crecimiento de Casuarina posterior a la inoculación con los microorganismos simbióticos, sea debido a la producción de substancias, por los microorganismos probados, que estimulan el crecimiento de las raíces.

La colonización radical de las plantas por el hongo endomicorrízico es constante en todas las plantas tratadas con el mismo y oscila entre 79.5 y 80.5%. Las plantas que no se inocularon con *G. intraradices* mostraron micorrización (contaminación) con los hongos presentes en el suelo del vivero entre 9.0 y 9.4%; el tipo de colonización y la morfología de las hifas y vesículas de las micorrizas fueron muy diferentes a las del hongo inoculado.

Las plantas tratadas con *P. tinctorius* no mostraron colonización; el hongo no indujo la formación de ectomicorriza. No todas las cepas de *P. tinctorius* forman ectomicorriza en casuarina; hace algunos años, Thoen *et al* (1990) mostraron *in vitro* que *C. equisetifolia* no forma ectomicorriza completa con todas las cepas de *P. tinctorius* que ellos probaron. Asimismo, el estímulo de *P. tinctorius* sin la formación de ectomicorriza ya se ha observado previamente; parece que la sola presencia del micelio viviente ectomicorrízico puede estimular el crecimiento de diferentes árboles (Green *et al.*, 1982), lo que podría explicarse por la biosíntesis de auxinas por el hongo (Frankenberger y Poth, 1987). En el presente estudio, aun cuando la inoculación con *P. tinctorius* no indujo en la casuarina la formación de ectomicorrizas, tuvo un efecto positivo significativo sobre el crecimiento de las plantas, 228% mayor que las plantas testigo en términos de peso seco. Otros estudios han mostrado que el volumen radical y las raíces de otras plantas pueden ser estimulados por otros hongos ectomicorrízicos sin que formen ectomicorrizas (Linderman y Call, 1977). Por otra

parte, en el caso de *Frankia*, Berry *et al.* (1989) mostraron que la cepa HFPArI3 secreta diferentes indoles en el medio de cultivo.

El incremento en el número y en la biomasa de los nódulos fijadores de nitrógeno, cuando las casuarinas están en simbiosis con los hongos micorrízicos, indica que si existieran factores limitativos en el suelo que interfieren en el desarrollo de la nodulación de Casuarina, las micorrizas pueden contrarrestar el daño.

Desde el punto de vista práctico de las técnicas de vivero, los resultados del presente estudio muestran que el crecimiento de las plantas es superior con los microorganismos estudiados que con las fitohormonas comerciales. Además, el status simbiótico de las plantas destinadas a la reforestación es esencial para su establecimiento y crecimiento.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal del vivero "Los Remedios", de Naucalpan, estado de México, su valiosa ayuda en el trabajo de vivero y en el mantenimiento de las plantas. Nuestro agradecimiento también va al Dr. J. Schwenke y a la Dra. S. Parent por habernos donado la cepa de *Frankia* y de *Glomus intraradices*, respectivamente. Agradecemos a la CGPI del IPN (Proyectos 951838 et 953230) por el financiamiento recibido. También agradecemos los valiosos comentarios y sugerencias de los evaluadores anónimos de Terra.

## LITERATURA CITADA

- Berry, A.M., R.K.S. Kahn y M.C. Booth. 1989. Identification of indol compounds secreted by *Frankia* HFPArI3 in defined culture medium. *Plant Soil* 118: 205-209.
- Brundrett, M., N. Bougher, B. Dell, T. Grove y N. Malajczuk. 1996. Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. Monograph 32. Australian Centre for International Agricultural Research. Canberra, Australia.
- Dart, P.N.J., J.M. Day y D. Harris. 1972. Assay of nitrogenase activity by acetylene reduction. pp. 85-100. *In: Use of isotopes for study of fertilizer utilization by legume crops.* Publication 149. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria.
- Diem, H.G. y Y.R. Domergues. 1990. Current and potential uses and management of Casuarinaceae in the tropics and subtropics. pp. 317-342. *In: Schwintzer, C.R. y J.D. Tjepkema (eds.). The biology of Frankia and actinorhizal plants.* Academic Press. San Diego, CA.
- Ducouso, M. 1991. Importance des symbioses racinaires pour l'utilisation des acacias d'Afrique de l'Ouest. CIRAD-Forêt/ISRA. Nogent-sur-Marne, Dakar, France, Sénégal.

- Frankenberger, W.T. y M. Poth. 1987. Biosynthesis of indole-3-acetic acid by the ectomycorrhizal fungus *Pisolithus tinctorius*. *Appl. Environ. Microbiol.* 53: 2908-2913.
- Green, D.W., W.J. Manning y D.R. Cooley. 1982. Effect of the ectomycorrhizal fungus *Pisolithus tinctorius* and auxin rooting formulations on the growth of "Cortland" apple trees. *HortScience* 17: 655-656.
- Linderman, R.G. y C.A. Call. 1977. Enhanced rooting of woody plant cuttings by mycorrhizal fungi. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 102: 629-632.
- Murry, M.A., M.S. Fontaine y J.C. Torrey. 1984. Growth kinetics and nitrogenase induction in *Frankia* sp. HFPArI3 grown in batch culture. *Plant Soil* 78: 61-78.
- 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. Br. Mycol. Soc.* 5: 158-161.
- Ruehle, J.L., D.H. Marx y H.D. Muse. 1984. Calculated nondestructive indices of growth response for young pine seedlings. *For. Sci.* 30: 469-474.
- Russell, W.B. y G.H. La Roi. 1986. Natural vegetation and ecology of abandoned coal-mined land, Rocky Mountain Foothills, Alberta, Canada. *Can. J. Bot.* 64: 1286-1298.
- SAS Institute. 1999. The SAS System for Windows, Release 8.0. Cary, NC.
- Schlotzhaver, S.N. y R.C. Littell. 1987. SAS system for elementary statistical analysis. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Sempavalan, J., C.T. Wheeler y J.E. Hooker. 1995. Lack of competition between *Frankia* and *Glomus* for infection and colonization of roots of *Casuarina equisetifolia* (L.). *New Phytol.* 130: 429-436.
- Strong, W.L. 2000. Vegetation development on reclaimed lands in the coal Valley Mine of Western Alberta, Canada. *Can. J. Bot.* 78: 110-118.
- Thoen, D., B. Sougoufara y Y. Dommergues. 1990. *In vitro* mycorrhization of *Casuarina* and *Allocasuarina* species by *Pisolithus isolates*. *Can. J. Bot.* 68: 2537-2542.
- Valdés, M. y A. Cayetano Rodrigo. 1998. L'utilisation du filao (*Casuarina equisetifolia*) au Mexique. *Le Flamboyant* 47: 31-33.
- Valdés, M. y R. Cruz-Cisneros. 1996. Root and stem nodulation of *Casuarina* in Mexico. *For., Farm Community Res. Rep.* 1: 61-65.

# CARACTERIZACIÓN DEL MERCADO DE LOS DERECHOS DE AGUA EN DISTRITOS DE RIEGO

## Characterization of the Water Rights Market in Irrigation Districts

Enrique Rubiños-Panta<sup>1†</sup>, Enrique Palacios-Vélez<sup>1</sup>, Miguel Ángel Martínez-Damián<sup>2</sup>,  
Ramón Valdivia-Alcalá<sup>3</sup> y Elizabeth Hernández-Acosta

### RESUMEN

Las políticas de manejo del agua son diversas, una de ellas, es la que permite la transmisión de derechos de agua a través de un mercado, buscando estimular su distribución volumétrica y mayor eficiencia en su uso. Se busca que en épocas de escasez, se pueda presentar una reasignación del uso del agua a través de un mercado hacia actividades más rentables y a productores más eficientes. La transmisión de derechos se presenta desde hace años, pero últimamente se ha incrementado, por la escasez del recurso y porque la Ley de Aguas Nacionales de 1992 contempla esta transmisión. El objetivo de este trabajo fue hacer una caracterización del mercado de derechos de agua en distritos de riego de México, mediante una metodología tabular de análisis sistemático y la comparación de las características reales con las características teóricas. Para cumplir con este objetivo, se revisó documentación existente y se realizó entrevistas con autoridades de la Comisión Nacional del Agua, directivos y usuarios. Los resultados del trabajo muestran que, en la mayoría de los casos, las transmisiones de derechos de agua no cumplen en 100% las características teóricas de un mercado del agua y presentan ciertas restricciones legales, técnico-administrativas, reglamentarias, socio-económicas y ecológicas; sin embargo, cumplen con algunas características o parte de ellas, lo que podría interpretarse como un mercado en proceso de consolidación. La mayoría de transmisiones son temporales y no fomentan las inversiones. En algunos casos, no existe un mercado, sino una administración de la transmisión del agua. Esta caracterización es

importante para el diagnóstico del funcionamiento del mercado de los derechos del agua y para hacer propuestas que mejoren su funcionamiento.

*Palabras clave:* Mercado del agua, reasignación del recurso, restricciones, eficiencia, transmisión de derechos.

### SUMMARY

There are many policies concerning water management. One of them permits the transferal of water rights through a market with the purpose of stimulating its distribution by volume and attaining better efficiency in the use of water. This alternative aims, in periods of shortage in an irrigation district, to reassign the use of water through a market towards more profitable activities and to more efficient producers. For several years, rights have been transferred, but lately this practice has increased because of the shortage of the resource and because the new Law of National Waters of 1992 contemplates the transferal of rights. The objective of this work was to characterize the market of water rights in irrigation districts of Mexico, using a tabular methodology of systematic analysis and comparison of real characteristics with theoretical characteristics. Existing documentation was reviewed, and authorities of the National Water Commission, leaders and users were interviewed. The results of the work show that in many cases the transferal of water rights does not completely satisfy the theoretical characteristics of a water market and they present certain legal, technical-administrative, regulatory, economic, and ecological restrictions; however, they fulfill some characteristics or a part of them. This could be interpreted as a market in process of consolidation. Most transferals are temporary and they do not promote investment. In some cases, a water market does not exist but rather a water transferal administration. This characterization is important for the diagnosis of the operation of the market of water rights and to propose improvements in its operation.

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, <sup>2</sup> Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

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

<sup>3</sup> Departamento de Economía Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.

*Index words: Water market, reallocation of the resources, restrictions, efficiency, transmission of rights.*

## INTRODUCCIÓN

La disminución de la disponibilidad de los recursos naturales y la creciente demanda de los mismos, hacen que se busquen continuamente soluciones al problema de cómo asignar cada vez mejor los escasos recursos. Una de las políticas que se trata de implementar en los últimos años es la que argumenta que las fuerzas del mercado asignan mejor los recursos escasos, lo cual permite utilizarlas en forma más eficiente en actividades más productivas, obteniendo mayor productividad y mejor conservación. Esta política se está planteando en diferentes países por considerar al agua como un bien económico. Lee y Juravlev (1998) manifestaron que el cuarto de los principios de Dublín postula que: "el agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina, y debería reconocérsele como un bien económico. Si el agua es un bien económico, entonces su asignación podría regirse por el mercado..., sin mercados es difícil, si no imposible, evaluar la demanda real de servicios vinculados con el agua, porque las funciones de demanda no pueden estimarse en tal situación". En el caso de México, se observa una transformación agraria que sigue las políticas de liberalización en el mundo, dirigida a descentralizar y comercializar los recursos y productos, para que las fuerzas económicas del mercado regulen su uso y asignen mejor los mismos.

Las particularidades de las transmisiones de derechos de agua implican aspectos legales, técnico-administrativos, socio-económicos y ecológicos en los módulos y distritos de riego. Por esta razón, los directivos de las asociaciones de usuarios deben estar informados y preparados, y conocer los factores o mecanismos que regulan y caracterizan al mercado del agua para ser capaces de administrar las transmisiones de derechos. La caracterización de las transmisiones es importante para cualquier evaluación del mercado (CNA, 1992).

Colby-Saliba (1989) señaló que las características que distinguen las transferencias de mercado de otros procesos de transferencia y de transferencias de otros derechos de propiedad son: a) el valor del agua es reconocido como distinto del valor de la tierra; b) compradores y vendedores acuerdan la transmisión

voluntariamente, creyendo que ésta es la más adecuada a sus intereses; y c) el precio y otros términos de transferencia son negociables por el comprador y el vendedor y no son restringidos. El término "mercado del agua", como lo usa Colby-Saliba (1989), se refiere a la transacción que satisface estas tres condiciones.

Simpson y Ringskog (1997) manifestaron que deben existir ciertos criterios para transferir el uso del agua, dentro de un esquema de mercado como: a) se tiene que definir el producto a comercializar en el mercado, b) la demanda de agua debe exceder al suministro, c) el suministro derivado de derechos usados debe transportarse al lugar y en el momento en que el agua se necesita, d) el sistema de derechos de agua también debe resolver conflictos, e) el sistema también debe distribuir suministro durante períodos de escasez y de exceso, y f) un esquema legal y regulatorio. Sobre este último punto señalaron que cuando los derechos de propiedad están bien definidos, los individuos tienen una idea clara de que acciones pueden llevar a cabo con respecto a los recursos.

Holden y Thobani (1996) citaron que para iniciar un efectivo mercado del agua debe considerarse: a) asegurar la participación del Estado en el diseño e implementación de la nueva legislación, b) decidir reglas para iniciar la asignación de derechos y de qué manera los nuevos derechos pueden asignarse, c) establecer un registro público y titulación en bloque, d) establecer o consolidar las asociaciones de usuarios, e) proteger a los usuarios del desarrollo de monopolios potenciales, f) asegurar que el comercio no viole los derechos de agua de los usuarios existentes, y g) establecer adecuadas leyes ambientales.

Roemer (1997) indicó que cuando los derechos de propiedad están bien definidos, los individuos tienen una idea clara de que acciones pueden llevar a cabo, con respecto a los recursos. Lo anterior es necesario para los intercambios de mercado, los cuales dependen de que las partes involucradas en la transacción conozcan lo que se está intercambiando. Entre los criterios económicos difundidos con respecto al establecimiento de derechos de propiedad eficientes sobre el agua, son necesarios cuatro cualidades básicas: a) el derecho sobre el agua debe definirse claramente, ser seguro y poder hacerse valer; b) el derecho debe ser transferible y flexible (capaz de desplazarse entre usos y usuarios competitivos); c) la asignación de derechos sobre la disponibilidad de

agua debe percibirse por el público como equitativa y justa; y d) la definición de asignación de derechos de propiedad sobre la disponibilidad de agua debe hacerse de una manera socialmente responsable.

La caracterización de las transmisiones de derechos de agua es importante porque sirve de base para cualquier diagnóstico del funcionamiento del mercado del agua en distritos de riego de México y por que no se cuenta con estudios de este tipo. Por tal razón, el objetivo del presente trabajo es saber cuáles son las características del mercado en algunos distritos de riego y cuáles son las restricciones que se presentan, partiendo de la hipótesis que las transmisiones en distritos de riego cumplen con las características teóricas de un mercado de agua.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Como materiales, en el presente trabajo, se utilizaron los documentos, las revistas y encuestas aplicadas en relación con la transmisión de derechos, como: la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento; informes de la Comisión Nacional del Agua (CNA) sobre transmisión de derechos; reglamentos de los distritos de riego; información general de los Distritos de Riego 011 Alto Río Lerma, 017 Región Lagunera y 038 Río Mayo; Actas de Comité Hidráulico; procedimientos de transmisión de derechos, así como entrevistas directas con funcionarios de la CNA; jefes de distritos de riego; responsables de unidades; directivos y usuarios de las asociaciones de los módulos de riego y de las Sociedades de Responsabilidad Limitada. La metodología implementada consistió en hacer un análisis tabular y sistematizado del marco jurídico y reglamentario, de los aspectos técnicos-administrativos, sociales-económicos y ecológicos, a escala nacional y en los distritos de riego estudiados. Se consultó y analizó la forma en que se realizan las transmisiones y si éstas cumplen con las características teóricas, anotadas por Colby-Saliba (1989), Holden y Thobani (1996), Roemer (1997) y Simpson y Ringskog (1997), necesarias para que un mercado de derechos funcione. Además, en una muestra seleccionada al azar, se aplicaron encuestas a los directivos de los módulos y a los usuarios. Toda esta información se sistematizó y se le aplicó un análisis tabular que permitiera caracterizar la transmisión de derechos.

### Características Generales de los Distritos de Riego Estudiados

Los distritos de riego (DR) estudiados presentan las siguientes características:

**Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.** Se localiza en el estado de Guanajuato, en la zona centro de la República Mexicana, el estado cuenta con 1 004 000 ha de uso agrícola, 415 000 ha con riego y 589 000 en condiciones de temporal, por lo que existe una gran demanda de agua. El DR 011, el cual inició su operación en 1939, está situado en la parte sur del estado de Guanajuato; comprende una extensión de 127 732 ha en manos de 22 611 usuarios. Los datos geográficos medios del distrito son 19°55' N, 99°39' O y una altitud de 1722 m. El clima que predomina en la región, según la metodología de Köppen, modificada por García, citado por Comisión Nacional del Agua (1991), es Cwah, templado sub-húmedo, con lluvias en verano, temperatura media mensual entre 18 y 20 °C y lluvia media anual mayor que 620 mm.

El distrito de riego está conformado por once módulos, los cuales cuentan con disponibilidad de agua superficial (821.15 millones de m<sup>3</sup>) y subterránea (75.1 millones de m<sup>3</sup>), y en ésta se presentan transmisiones de derechos de agua entre módulos de riego por la alta demanda y su escaso suministro.

Las obras que abastecen al DR 011 son cuatro vasos de almacenamiento: presa Tepuxtepec, presa Solís, laguna de Yuriria y presa La Purísima, las cuales mediante cinco presas derivadotas: Chamácuaro, Reforma, Loma de Toro, Santa Julia y Markazuza, alimentan una red de 475 km de canales principales y 1183 km de canales laterales. Además, el DR 011 cuenta con 1809 pozos profundos, los cuales se construyeron, en su mayoría, a finales de la década de los setenta e inicios de los ochenta, así como tres plantas de bombeo sobre el río Turbio que, en la actualidad, operan en forma parcial.

**Distrito de Riego 017 Región Lagunera.** Está ubicado en el norte de México, en los estados de Coahuila y Durango; comprende ocho municipios de la porción noreste del estado de Durango y cinco de la porción sur-oeste de Coahuila.

Los datos geográficos medios del distrito son: 25°32' N y 103°28' O, con una altitud de 1135.98 m. Presenta una clasificación climatológica, según Thornthwaite, citado por Comisión Nacional del Agua (1991), de: EdBá provincia de humedad E, árida; vegetación desértica, con humedad deficiente en todas

las estaciones; provincia de temperatura B', mesotérmica; la precipitación alcanza, en promedio, 378 mm al año.

El DR 017 agrupa 20 módulos de riego: 17 corresponden al río Nazas y tres al río Aguanaval. En el presente estudio, sólo se consideraron los módulos regados con aguas del río Nazas, los cuales tienen una superficie física dominada de 193 937.71 ha y una superficie de riego de 87 408.88 ha, con un volumen total concesionado de 976.65 millones de m<sup>3</sup> y 33 325 usuarios, de los cuales 30 964 son ejidatarios y 2361 pequeños propietarios. En el DR 017 se presenta una alta demanda de agua y deficiente suministro. También se presentan numerosas transmisiones de derechos de agua entre usuarios.

Las fuentes de agua aprovechables del distrito conforman dos sistemas: el sistema Lázaro Cárdenas-Francisco Zarco (que abastece los módulos del I al XVII) y el sistema del río Aguanaval (que abastece los módulos XVIII, XIX y XX). En el área del DR 017 se cuenta con un número considerable de pozos profundos, los cuales no pertenecen al distrito, sin embargo, se utilizan para abastecer a parcelas de ejidatarios y pequeños propietarios que no cuentan con derechos de agua a los cuales se les auxilia con cierto volumen.

**Distrito de Riego 038 Río Mayo.** Está ubicado en el estado de Sonora y comprende los municipios de Etchojoa, Navojoa y Huatabampo. Los datos geográficos medios del distrito son: 26°54' N, 109° 36' O, con una altitud de 31 m. Su clasificación climatológica, según Thornthwaite, citado por Comisión Nacional del Agua (1991), es: EdB'a, provincia de humedad E, árida, vegetación desértica, humedad deficiente en todas las estaciones. Provincia de temperatura B, mesotérmica; subprovincia de temperatura A, con concentración en verano. La precipitación media es de 289.4 mm año<sup>-1</sup>. El DR 038 tiene como fuente de abastecimiento las aguas superficiales concesionadas que escurren por el río Mayo y sus afluentes, las cuales se almacenan en la presa Presidente "Adolfo Ruiz Cortinez" y las aguas subterráneas concesionadas.

El DR 038, para fines operativos, está dividido en tres unidades que comprenden 16 módulos de riego, con 11 717 usuarios, de los cuales 7850 son ejidatarios y 3867 pequeños propietarios. En el DR 038 se presenta una alta demanda, dada la escasa precipitación y el deficiente suministro; así como por la implementación de cultivos hortícolas que presentan mayor rentabilidad. Por esta razón, en los últimos años se

han presentado un considerable número de transmisiones de derechos de agua.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Aspectos de la Transmisión de Derechos a Escala Nacional

En la actualidad, las transmisiones de derechos se presentan en casi todos los distritos de riego de México, con características diversas como: aspectos legales, técnicos-administrativos, reglamentarios, sociales-económicos y ecológicos, y características físicas propias de cada distrito. Sin embargo, no en todos los casos de transmisiones se tienen características de un mercado del agua. En general, se identificaron tres casos de transmisiones de derechos de agua: a) transmisiones entre autoridades de los módulos del distrito, con participación del Comité Hidráulico; b) transmisiones de derechos entre los mismos usuarios, bajo un contrato notarial aprobado por los directivos de módulos y autoridades del distrito de riego; y c) transmisiones a través de un banco de agua.

Los dos primeros casos se acercan más a un mercado de derechos de agua, en cambio, los llamados bancos de agua, implementados en algunos distritos de riego del norte de México, los cuales, en algunos casos, están constituidos como asociaciones civiles, tienen como objetivo brindar apoyo a los usuarios y servicio de riego sin fines de lucro, en épocas de escasez a los usuarios. Estos bancos ofrecen servicio de riego, al precio de costo de operación, lo que constituye más que un mercado de derechos, una transmisión administrativa de volúmenes de agua, donde hay sólo un vendedor y muchos compradores. Ejemplo de este caso son los bancos de agua implementados en el DR 010 Culiacán-Humaya y DR 074 Mocolito.

El marco legal de la transmisión de derechos está basado en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su reglamento que, a su vez, son reglamentarios del artículo 27 constitucional. La LAN establece el procedimiento para otorgar concesiones, asignaciones y permisos de uso de agua (el derecho de uso) a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y el Registro Público de los Derechos del Agua (REPGA); asimismo, los procedimientos para la transmisión de derechos fomentan un mercado de derechos de agua, sin embargo, ni la LAN ni su reglamento definen el

derecho de agua. La CNA está facultada para restringir las concesiones, asignaciones o permisos en casos de escasez, dando prioridad al uso doméstico o en caso de no usar el recurso en tres años consecutivos. Por consiguiente, el marco legal, establecido por la LAN y aplicado por la CNA, permite comprender que el derecho no es de propiedad, sino que es sólo un derecho de uso con ciertas condiciones y por un tiempo determinado, situación que da cierto grado de inseguridad a los usuarios y limita, en parte, las transmisiones.

Según la CNA, existe la normatividad vigente y los procedimientos para que las transmisiones de derechos de uso de agua se autoricen y se den sin mayor trámite. Sin embargo, las transmisiones inscritas en el REPDA, hasta el 2000, son 688, de las cuales 618 son de volumen total y 70 de volumen parcial; 21 de ellas de aguas superficiales y 667 de aguas subterráneas. De estas transmisiones, 95% se dan internamente en el sector agrícola, 3% pasan del sector agrícola al industrial y sólo 2% del sector agrícola al urbano y otros usos. Esta información permite conocer que el mayor número de transmisiones se presenta en el sector agrícola, sin embargo, el número de transmisiones es mayor que las registradas en el REPDA, debido a que en los distritos de riego, la mayoría de ellas son internas y temporales. Para estas transmisiones, es necesario tener actualizado el padrón de usuarios y un sistema de control y estadística que permita hacer el seguimiento de las transmisiones, aspectos que en muchos distritos de riego están poco implementados.

En las transmisiones de derechos encontradas, algunos aspectos técnicos administrativos son: el agua se puede transportar aceptablemente de un lugar a otro, sin embargo, no se mide, lo que da un grado de inseguridad en los volúmenes de agua transmitidos; no se tiene un padrón volumétrico; la operación de las presas y del sistema de riego se realiza como hace muchos años; no hay incentivos para ahorrar agua; las estadísticas de los distritos de riego a nivel módulo son poco confiables; en muchos casos, en las transmisiones intervienen los directivos de los distritos de riego; la transmisión está sujeta a la disponibilidad técnica de los canales y a la aprobación de los directivos sin una normatividad clara. Los usuarios o módulos que ahorran agua por uso eficiente no pueden reservarla para el próximo año, debido a que, por reglamentación, no está permitido, aunque las

presas están a la mitad de su capacidad. Por tal razón, el usuario está casi obligado a utilizar el agua desperdiciándola o a venderla a un bajo precio antes de perderla.

Los reglamentos de los distritos no se conocen por la mayoría de usuarios y, en algunos casos, no se han aprobado, los reglamentos de los módulos aún no se elaboran y la transmisión de derechos, en opinión de los usuarios, no está claramente normada. Los padrones de usuarios no están actualizados, siendo que éstos son la forma de controlar y registrar las transferencias de derechos. La ley indica que las personas morales (módulos) pueden inscribir el padrón de usuarios en el REPDA; sin embargo, esto no es considerado en los reglamentos. Estas características permiten inferir que no existe un esquema de control y regulación de las transmisiones que brinde seguridad y confianza.

Algunos aspectos socio-económicos encontrados son: existen asociaciones de usuarios formadas, pero poco consolidadas, con poca información sobre los objetivos y procedimientos de las transmisiones de derechos; el valor del agua se reconoce como distinto del valor de la tierra, sin embargo, la existencia del minifundio, la escasez de agua, la falta de financiamiento y crédito, la falta de información y alternativas de producción dejan a los usuarios en condiciones para transferir sus derechos a bajos precios y, en muchos casos, el precio está restringido por los directivos. Por otro lado, existen líderes que implementan medidas populistas con tal de llegar o mantenerse en los puestos directivos, una de ellas es no subir las cuotas de riego porque es una medida impopular. La constitución de los módulos en asociaciones civiles sin fines de lucro, ha dejado la idea de que las transmisiones de agua se den a precios de costos, impidiendo, en muchos casos, la valoración del recurso. Todos estos aspectos socio-económicos limitan las transmisiones de derechos dentro de un esquema amplio de mercado, impiden la mayor valoración del agua y no estimulan al ahorro del agua ni las inversiones hidroagrícolas.

Los aspectos ecológicos se toman poco en cuenta. En los distritos no hay un gasto ecológico en los ríos. Las cuencas y acuíferos, en muchos casos, están sobreexplotados y la calidad del agua no se controla. Todos estos aspectos no se toman en cuenta y pueden afectar a terceros en los procesos de transmisión de derechos.

### Características de la Transmisión de Derechos en los Distritos de Riego Estudiados

En este punto, se muestran los resultados de algunas características propias de los distritos y las características de las transmisiones de derechos que se llevan a cabo en los distritos de riego estudiados.

**Características propias de los distritos de riego en estudio.** Algunas de las características propias de los distritos de riego en estudio, que influyen y dan ciertas condiciones favorables a la transmisión de derechos, se presentan en Cuadro 1.

Los resultados del Cuadro 1 muestran que el DR 011 tiene mayor disponibilidad relativa de agua, pero tiene gran demanda para cultivos en diferentes ciclos agrícolas, lo que favorece las transmisiones de agua. El contar con un sistema de almacenamiento superficial con mayor número de presas, con agua subterránea, que, en algunos años, abastece a usuarios de riego por gravedad, y una precipitación considerable, lo que se aprovecha en los ciclos de primavera-verano (P-V) y segundos cultivos, da cierto grado de disponibilidad y diversidad de opciones para la transmisión de derechos. El porcentaje de usuarios ejidatarios es alto, los cuales, en general, son los que transfieren sus derechos por falta de recursos económicos, favoreciendo las transmisiones; el porcentaje de los cultivos perennes no es significativo, lo que no favorece el número de transmisiones, dado que en escasez, son los cultivos perennes los que más requieren de transmisiones de derechos de agua. Con respecto al DR 017, se observa que tiene menor disponibilidad relativa de agua, por no contar con agua subterránea; el porcentaje de superficie de riego, con respecto a la dominada, es bajo; la precipitación es escasa y casi no se aprovecha, ya que es insuficiente, esto refleja la gran escasez de agua, lo que favorece el número de transmisiones. La mayor área del distrito está en manos de ejidatarios (con 2 ha

de riego, cuando las condiciones de disponibilidad son normales, y con dotaciones por usuario de 0.4 ha en épocas de escasez), esto incentiva las transmisiones debido a las bajas condiciones económicas de los usuarios. También se observa que un alto porcentaje del área regada se destina a cultivos perennes (altamente demandantes de agua, como la alfalfa), lo cual propicia las transmisiones en épocas de escasez. El DR 038 tiene una disponibilidad relativamente media, con respecto a los demás distritos, ya que cuenta con agua superficial y subterránea, aunque la precipitación es escasa; la relación entre superficie regada y dominada es alta. Por otro lado, presenta un porcentaje medio de usuarios ejidatarios, la parcela media es alta, con respecto a los otros distritos, y el área de cultivos perennes es baja. Estas características proporcionan un ambiente medianamente propicio para las transmisiones de derechos.

**Características de las transmisiones en los distritos de riego estudiados.** Las principales características de las transmisiones de derechos se presentan en el Cuadro 2.

En este cuadro se observa que en estos distritos de riego se presenta la transmisión de derechos con ciertas restricciones en sus características, para funcionar teóricamente en forma consolidada como un mercado de los derechos de agua; el DR 017 es el que más se acerca a este mercado, pero con algunas restricciones; el DR 011 tiene una restricción fuerte en la regulación del precio, por parte del Comité Hidráulico, lo que no permite la valoración del recurso y no incentiva el ahorro del mismo; por su parte, el DR 038 presenta características favorables para establecer un mercado del agua, pero es necesario consolidarlas y reforzarlas para salvar algunas restricciones. En general, se observa que en los tres distritos puede implementarse un mercado del agua, salvando algunas restricciones que se presentan.

**Cuadro 1. Algunas características físicas y organizativas de los distritos de riego.**

Característica	DR 011	DR 017	DR 38
Fuentes de abastecimiento	Superficial (cuatro presas) y subterránea	Superficial (dos presas)	Superficial (una presa) y subterránea
Superficie riego/dominada (%)	98.6	45.07	98.2
Tenencia de la tierra	77% ejidatarios	92.55% ejidatarios	67% ejidatarios
Parcela media de riego	3.76 ha ejid, 6.4 ha pp	2.12 ha ejid, 4.22 ha pp	6.5 ha ejid 11.9 ha pp
Ciclos agrícolas	O-I, PV, SC y perennes	PV y perennes	O-I ó PV y perennes
Precipitación media anual (mm)	620	378	289
Cultivos perennes (%)	3.72	13.5	1.57

Nota: DR = distrito de riego; ejid = ejidatarios, pp = pequeños propietarios, O-I = ciclo otoño invierno, PV = ciclo primavera verano, SC = segundos cultivos.

**Cuadro 2. Principales características de las transmisiones de derechos de agua superficial en los distritos de riego estudiados.**

Características	DR 011	DR 017	DR 038
Sujeto que hace la transacción	Directivos de módulos	Usuarios	Usuarios y directivos
Sujeto que fija el precio	Comité Hidráulico	Compradores y vendedores	Compradores y vendedores y directivos
Estimación del precio	Bajo	Medio	Medio
Transacciones de agua de gravedad, sin incluir de la tierra (%)	75	80	60
Actualización del padrón de usuarios (%)	90	70	75
Relación estimada y apreciada de oferta/demanda (%)	80	40	70
Factibilidad de transportar el agua	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Reglamento de distrito	Aprobado	Aprobado	No aprobado
Reglamento de los módulos	No existe	No existe	No existe
Confianza en la seguridad de las transmisiones (%)	85	50	70
Tipo de transmisiones	Mayoría temporales	Temporales y permanentes	Mayoría temporales
Metodología para estimar precio	Con base en costos de operación	Según oferta y demanda, sin metodología	Según oferta y demanda y a precios de costo
Consideración del ambiente	Poca	Poca	Poca
Acaparamiento de derechos	No se presenta	Se presenta	No se presenta
Control y estadísticas de transmisiones	Buen	Mediano	Mediano

DR = distrito de riego.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En general, la transmisión de derechos de agua se presenta en forma temporal y puede ser de tres tipos: entre directivos de módulos, de usuario a usuario y a través de un banco de agua a usuarios.

- El mercado del agua es restringido, por no existir derechos de propiedad sino sólo derechos de uso, los cuales tienen cierta inseguridad y riesgo.

- El mercado de los derechos de agua no está completamente desarrollado por restricciones técnico-administrativas, principalmente por la no-actualización de los padrones de usuarios, la falta de medición del agua, la existencia de reglas de operación obsoletas y la intervención de los directivos en la aprobación de transmisiones, sin una normatividad clara.

- Otros aspectos socio-económicos que afectan las transmisiones son: la falta de información y conciencia de los directivos, desconocimiento de los objetivos del mercado, falta de metodologías para estimar precios de las transacciones, la idea de transmisiones sin fines de lucro evita la mayor valoración del agua y el ahorro de la misma, y los posibles problemas sociales y políticos.

- Existen dos criterios de cómo se debe hacer la transmisión de derechos: el primero, es a través de las autoridades de los módulos y, el segundo, a través de los usuarios. El primero sostiene que son los módulos que tienen la concesión; el segundo sustenta que son los usuarios los propietarios del derecho, lo cual crea desconcierto e inseguridad.

- En los distritos de riego estudiados, las transmisiones presentan las características teóricas de un mercado del agua, pero con ciertas restricciones.

- Es necesario hacer, en posteriores trabajos, un diagnóstico del funcionamiento del mercado de los derechos de agua y evaluar aspectos de eficiencia de uso, productividad del agua y beneficios logrados con las transferencias de volúmenes de agua.

- Es necesario establecer un sistema de información de las transmisiones de derechos de agua y actualizar la base de datos del REPDA.

- Es necesario realizar eventos de difusión de los objetivos y alcances del mercado de los derechos de agua con autoridades de la CNA, directivos y usuarios.

- Es necesario concienciar a los directivos de los módulos y los distritos de riego a fomentar una cultura del agua que permita valorarla mejor y a salvar las

restricciones de las transmisiones para hacer un mejor uso del agua.

### LITERATURA CITADA

- Comisión Nacional del Agua. 1991. Características de los distritos de riego, Año Agrícola 1990. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, Gerencia de Distritos de Riego. México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua. 1992. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. México, D.F.
- Colby-Saliba B. 1989. Do water markets work? Market transfers and trade-offs in the Southwestern States. *Water Resour. Res.* 23: 1113-1122.
- Holden, P. y M. Thobani. 1996. Tradable water rights: A property rights approach to resolving water shortages and promoting investment. Working Paper 1627. Policy Research Dissemination Center. Washington, DC.
- Lee, T. y A. Juravlev. 1998. Los precios, la propiedad y los mercados en la asignación del agua. Comisión Económica para América Latina. Serie Medio Ambiente y Desarrollo. Naciones Unidas. Santiago de Chile, Chile.
- Roemer, A. 1997. Derecho y economía: Políticas públicas del agua. Centro de Investigación y Docencia Económica. México, D.F.
- Simpson, L. y K. Ringskog. 1997. Water markets in the Americas. The World Bank. Washington, D.C.

# BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO VEGETAL ASOCIADAS CON GRAMÍNEAS: UNA REVISIÓN

## Plant Growth-Promoting Bacteria in Association with Gramineous Species: A Review

C. Loredó-Ostí<sup>1</sup>\*, L. López-Reyes<sup>2</sup> y D. Espinosa-Victoria<sup>3</sup>

### RESUMEN

Las bacterias de vida libre o asociativas que habitan la rizosfera pueden estimular el crecimiento de las gramíneas a través de mecanismos, como: síntesis de sustancias reguladoras del crecimiento vegetal, fijación de nitrógeno, solubilización de nutrientes, producción de sideróforos y control de fitopatógenos del suelo. Los microorganismos más estudiados pertenecen a los géneros *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Beijerinckia*, *Pseudomonas* y *Bacillus*; algunos de los cuales sobreviven en condiciones de estrés. La mayoría de los estudios sobre la interacción de estas bacterias con las plantas se ha realizado en condiciones de laboratorio e invernadero; sin embargo, aun cuando sus efectos benéficos están documentados, la información sobre su efecto directo en campo es escasa. En esta revisión se presenta el papel de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el establecimiento y en la producción de gramíneas.

**Palabras clave:** Promoción del crecimiento, bacterización, colonización de la raíz.

### SUMMARY

Free-living or associative rhizosphere bacteria may trigger the gramineous plant growth, through mechanisms such as nitrogen fixation, synthesis of plant growth regulators (PGRs), production of nutrient solubilizers, production of siderophore compounds and control of plant pathogens. Beneficial rhizosphere bacteria include species like *Azospirillum*,

*Azotobacter*, *Klebsiella*, *Beijerinckia*, *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, and *Bacillus*, some of which survive under conditions of stress. A number of the studies carried out under laboratory and greenhouse conditions exhibit the beneficial effect of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant growth; however, information on their direct effect in the field is limited. This paper is a review of the role of plant growth-promoting bacteria on the establishment and production of gramineous species.

**Index words:** Growth promotion, bacteria inoculation, root colonization.

### INTRODUCCIÓN

La siembra de pastos nativos e introducidos representa una opción productiva para mejorar la condición de los agostaderos en las zonas áridas y semiáridas, en especial en aquellas áreas donde los mejores zacates nativos han desaparecido, debido a sequías prolongadas y al sobrepastoreo (Alcalá, 1995). Los factores limitativos para el establecimiento de estas gramíneas en las zonas áridas y semiáridas son la precipitación escasa y la baja fertilidad del suelo (INIFAP, 1997).

Uno de los mecanismos inmediatos para contrarrestar la baja fertilidad es el uso de fertilizantes químicos; sin embargo, la aplicación de dosis altas de fertilizante es poco recomendable, debido a las condiciones de escasa precipitación y a las restricciones de capital que enfrentan los productores en esas regiones. Además, en las zonas árida y semiárida no es conveniente fertilizar en el momento de la siembra, ya que esto favorece el desarrollo de maleza, que interfiere en el establecimiento de los pastos (Loredó *et al.*, 1998).

En las últimas décadas, se ha investigado el papel de las bacterias de la rizosfera o rizobacterias de diversas gramíneas como caña de azúcar (Boddey *et al.*, 1995; Arteaga, 1997), maíz (Seldin *et al.*, 1998), trigo, sorgo (Baldani *et al.*, 1986), cebada y pastos tropicales (Döbereiner *et al.*, 1995). Cuando las bacterias se localizan en estructuras especializadas,

<sup>1</sup> Campo Experimental San Luis Potosí, CIRNE-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. San Luis Potosí, México.

\* Autor responsable (loredo.catarina@inifap.gob.mx)

<sup>2</sup> Microbiología de Suelos, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.

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

como los nódulos en las leguminosas, se establece una simbiosis mutualista estricta. En contraste, cuando las rizobacterias aprovechan el microambiente favorable de la planta, sin formar estructuras *de novo* sobre la raíz, se habla entonces de una simbiosis asociativa (Echegaray-Alemán, 1995).

Muchas bacterias asociativas son consideradas bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV), debido a su capacidad para estimular directamente el crecimiento de las plantas, a través de diversos mecanismos, como el aporte de nitrógeno por el proceso de fijación biológica de nitrógeno atmosférico (Boonjawat *et al.*, 1991; Elmerich *et al.*, 1992; Döbereiner *et al.*, 1995), producción de sustancias reguladoras del crecimiento (Arshad y Frankenberger, 1998), solubilización de minerales y nutrimentos (Crowley *et al.*, 1991), incremento en el volumen de la raíz (Bowen y Rovira, 1999), inducción de resistencia sistémica a patógenos (Van Peer *et al.*, 1991), inhibición del crecimiento de organismos antagónicos (Utkhede *et al.*, 1999) e interacción sinérgica con otros microorganismos del suelo (Bashan *et al.*, 1996b).

La información sobre el efecto de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en el establecimiento de gramíneas en zonas áridas y semiáridas es limitada. También son escasas las investigaciones sobre las especies bacterianas que se asocian en forma natural con las plantas en condiciones de humedad deficiente. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación es hacer una revisión del estado del arte, acerca de las rizobacterias asociativas promotoras del crecimiento de las plantas y su relación con el establecimiento y con la producción de gramíneas en zonas áridas y semiáridas.

### Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal

Las BPCV pueden ser de vida libre o asociativas, aerobias, anaerobias o anaerobias facultativas (Rodríguez, 1995). Las BPCV se han aislado en suelos donde predomina la vegetación de gramíneas, como pastos tropicales (Döbereiner y Day, 1975), pastos de zonas templadas (Kole *et al.*, 1988), pastos de suelos salinos (Quesada *et al.*, 1982; Bagwell *et al.*, 1998) y pastizales de zonas áridas (Herman *et al.*, 1993, 1994), así como de gramíneas cultivadas. Las principales especies bacterianas asociadas con gramíneas son *Azospirillum lipoferum*, *A. brasilense* y *A. amazonense* (Döbereiner *et al.*, 1995);

*Herbaspirillum seropedicae* y *Acetobacter diazotrophicus* (Döbereiner y Day, 1975); *Enterobacter agglomerans*, *E. cloacae*, *Bacillus azotofixans*, *B. polymyxa* y *Alcaligenes faecalis* (Boonjawat *et al.*, 1991), *Klebsiella* sp. (Boonjawat *et al.*, 1991; Palus *et al.*, 1996) y bacterias de los géneros *Azotobacter* y *Pseudomonas* (Bagwell *et al.*, 1998).

### Biología de las Bacterias BPCV Asociadas a Gramíneas

La precipitación pluvial y la temperatura son los principales factores que regulan el crecimiento de las plantas del pastizal (Sala *et al.*, 1988), en especial en las zonas templadas y áridas, donde ambos factores marcan en los pastos un período de crecimiento bien definido durante el año. La variación de las poblaciones de microorganismos asociadas con estos pastos responde predominantemente a los cambios de humedad del suelo, más que a las fluctuaciones de temperatura (Herman *et al.*, 1994).

El ciclo de vida de los pastos comprende la germinación, emergencia, rebrote, crecimiento, floración, madurez y latencia. En las zonas árida y semiárida, cuando se considera el desarrollo del pasto durante un año, el ciclo productivo abarca desde el rebrote hasta la madurez (Figura 1), en función de la humedad del suelo proveniente de la lluvia (Martín e Ibarra, 1995).

En relación con el desarrollo de la raíz, el éxito en la introducción de BPCV depende de su establecimiento y persistencia a lo largo de la estación de crecimiento de la raíz. La persistencia es difícil cuando la estación de crecimiento es larga, por la dificultad que representa distribuir las BPCV uniformemente a través del suelo (Schippers *et al.*, 1987). El crecimiento y desarrollo del sistema radical afecta significativamente a las poblaciones bacterianas del suelo por la disponibilidad de una fuente de carbono, derivada de compuestos orgánicos liberados por la raíz (Bowen y Rovira, 1999).

Además de la fuente de carbono, las bacterias aerobias de vida libre requieren de oxígeno o de una baja disponibilidad de este elemento en el caso de bacterias microaerobias. Demandan también nutrimentos minerales, como: molibdeno, hierro, calcio, potasio y magnesio. Las bacterias asociativas requieren nitrógeno combinado, en particular  $\text{NH}_4$ , cuando no están asociadas. Algunas bacterias de vida libre, como *Clostridium* y *Azotobacter*, requieren vanadio debido a que poseen nitrogenasas alternas a la

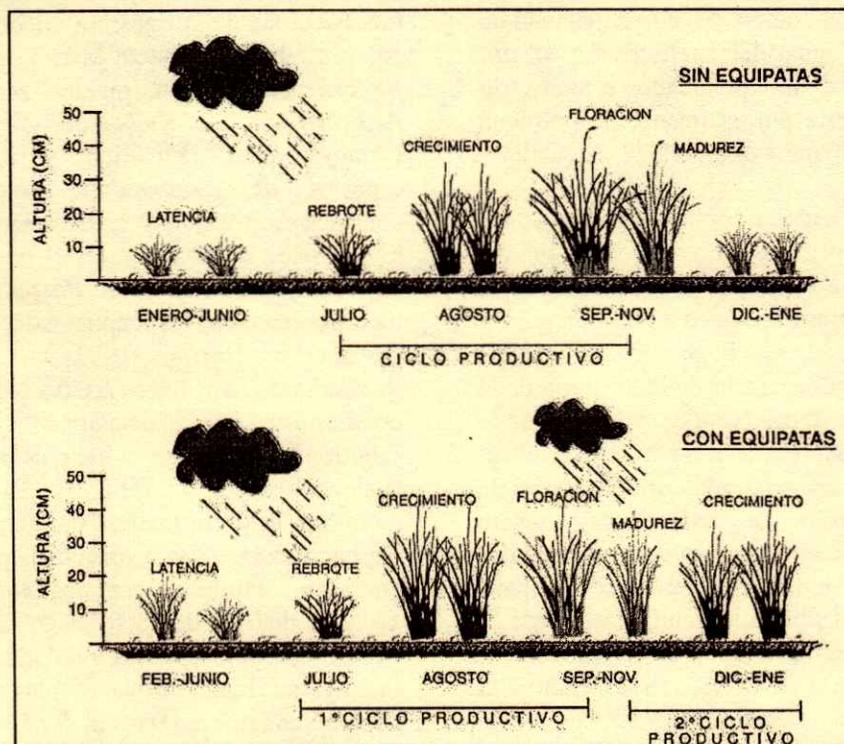


Figura 1. Ciclo anual de producción de forraje, del pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) en el noroeste de México, con y sin lluvias de invierno (Fuente: Martín e Ibarra, 1995).

nitrogenasa que contiene molibdeno y hierro (Robson *et al.*, 1986). Además, las bacterias requieren de un pH óptimo para su crecimiento (Mulder, 1975) y condiciones favorables de humedad (Herman *et al.*, 1994).

**BPCV en la rizosfera de las gramíneas.** La rizosfera es el ambiente que está bajo la influencia de las raíces de las plantas, donde existe un flujo de compuestos orgánicos producto de la fotosíntesis que son exudados por la raíz (Barea y Azcón-Aguilar, 1982). Desde que Hiltner la definió en 1904, se han realizado grandes avances en la investigación, que reconocen el papel que tienen los microorganismos rizosféricos en el crecimiento de las plantas (Bowen y Rovira, 1999). La rizosfera es el hábitat ecológico en el cual los microorganismos están en contacto directo con la raíz de las plantas (Arshad y Frankenberger, 1998) y es el sitio donde se dan diversas interacciones, como: competencia, mutualismo, comensalismo, amensalismo, predación y parasitismo (Barea y Azcón-Aguilar, 1982). Dependiendo del tipo de relación con la planta, los microorganismos pueden

ser benéficos o nocivos (Schippers *et al.*, 1987). Muchos aspectos importantes de las interacciones suelo-planta son mediados por los procesos de la rizosfera, incluyendo la adquisición de nutrientes por la planta, la colonización de las raíces por los microorganismos y la descomposición de la materia orgánica (Cheng, 1999).

En las gramíneas, la composición cuantitativa y cualitativa de los microorganismos en la rizosfera varía entre especies e incluso entre genotipos de la misma especie, lo cual se atribuye principalmente a las variaciones intrínsecas de cada planta en particular, en términos de la cantidad y calidad de los exudados radicales (Rengel, 1997). Además de las características de la planta, la disponibilidad de nutrientes en la rizosfera está controlada por los efectos que ejercen las propiedades del suelo sobre las interacciones de las raíces con los microorganismos.

**Papel del mucilago.** La transferencia de nutrientes del suelo hacia las células de la raíz está mediada por una interfase mucilagínosa, compuesta predominantemente de polisacáridos, caracterizados

por una estructura fibrosa (Gessa y Deiana, 1992). El mucilago está involucrado en el mantenimiento del contacto entre la raíz y el suelo y tiene la capacidad de absorber y retener el agua del suelo (Read *et al.*, 1999), aun cuando se ha planteado también la posibilidad de que la raíz por sí misma proporciona agua para hidratar y expandir el mucilago (McCully y Boyer, 1997).

El mucilago es producido por las plantas y los microorganismos; su capacidad para absorber agua del suelo permite prevenir, a corto plazo, la desecación de la raíz y de los organismos asociados a ella (Gregory y Hinsinger, 1999). En el mucilago existen células vivas, programadas para separarse de la periferia de la raíz hacia el ambiente externo (células del borde de la raíz, células desprendidas de la cofia o células libres del mucilago). Si éstas son retiradas por filtración, la viscosidad del mucilago se reduce de manera considerable. En condiciones naturales, estas células permanecen adheridas a la raíz cuando el ambiente está seco (Read *et al.*, 1999). Las células del borde de la raíz estimulan la esporulación y el crecimiento de las bacterias de la rizosfera, así como la quimioatracción y la expresión de los genes bacterianos involucrados en la asociación (Hawes *et al.*, 1998).

El intervalo de hidratación del mucilago colectado de raíces de plántulas de maíz es muy amplio, lo cual indica la presencia de fuertes surfactantes. La viscosidad del mucilago se incrementa a medida que se incrementa la concentración de solutos. La presencia de un delicado gel viscoso y elástico indica que la raíz crece en una capa de agua inmovilizada, la cual seguramente afecta la entrada de agua, la difusión de los nutrientes y el movimiento de las bacterias en la rizosfera (Read *et al.*, 1999).

Aun cuando las tasas de deformación en la rizosfera son pequeñas, cualquier movimiento de la raíz a través del suelo fija las partículas del suelo en contacto con el mucilago hacia la superficie de la raíz. El incremento de la viscosidad, tanto del suelo seco, como del mucilago deshidratado, mantiene las partículas del suelo en su lugar y facilita la formación de la envoltura de la raíz (Read y Gregory, 1997).

**Colonización de la raíz y distribución de las BPCV en la rizosfera.** La colonización de la raíz es el proceso por el cual las bacterias que sobreviven a la inoculación en las semillas se multiplican en la espermósfera en respuesta a los exudados de la semilla, se transfieren al sistema radical en vías de desarrollo y logran multiplicarse en las raíces

(Beauchamp *et al.*, 1991). La información sobre este proceso es escasa.

Las bacterias de la rizosfera pueden ser de vida libre y colonizar temporalmente la raíz, como *Azotobacter* y *Beijerinckia*, o bien, pueden ser asociativas, como *Azospirillum*, *Klebsiella*, *Alcaligenes* y *Campylobacter* (Elmerich *et al.*, 1992). De las especies de *Azotobacter*, sólo *A. paspali* es considerada bacteria estrictamente asociativa. Sus poblaciones se localizan en el mucilago que envuelve la superficie de la raíz de *Paspalum notatum* y están incorporadas en las capas exteriores de la corteza (Evans y Burris, 1992). *A. chroococcum* y *A. vinelandii* son bacterias de vida libre, que pueden comportarse como asociativas cuando colonizan la raíz de las gramíneas, o bien, se pueden desarrollar en suelo libre de raíces (Hill, 1992). *Azospirillum* puede colonizar la parte interna y externa de la raíz, donde las bacterias tienden a formar pequeños agregados; sin embargo, también es posible encontrar células aisladas distribuidas a lo largo de la superficie de la raíz. Cuando *Azospirillum* coloniza la parte externa de la raíz, las bacterias se encuentran embebidas en la capa mucilaginosa (Bashan *et al.*, 1996a).

El proceso por el cual las bacterias se mueven hacia la raíz y la colonizan, no es muy claro. No obstante, se han propuesto algunos factores que favorecen este proceso, como: mayor disponibilidad de carbono (Sprent y D'Faria, 1988), condiciones favorables de humedad (Herman *et al.*, 1994), tiempo de generación y quimiotaxis (Mandinba *et al.*, 1986; Bowen y Rovira, 1999), aerotaxis (Zhulin *et al.*, 1996), adhesión (Boonjawat *et al.*, 1991; Paul y Clark, 1996) y la capacidad de movimiento (Beauchamp *et al.*, 1991).

La quimiotaxis, se refiere al movimiento de los microorganismos hacia la raíz, en respuesta a un gradiente de concentración de nutrientes o de otros estímulos producidos por las plantas. La quimiotaxis puede ser una respuesta a sustratos específicos y no específicos de la raíz, así como a gradientes de dióxido de carbono. *Azospirillum*, por ejemplo, se mueve hacia zonas con bajo oxígeno disuelto y diversas sustancias químicas (Elmerich *et al.*, 1992). Si la cantidad de sustrato producido por los exudados de la raíz de la planta es significativamente grande, los organismos capaces de usar este sustrato obtendrán una ventaja competitiva. Una vez que el crecimiento microbiano activo comienza alrededor de la raíz, es común que las sustancias que ellos requieren se

metabolizan. En ese momento, la importancia de la quimiotaxis puede ser baja (Bowen y Rovira, 1999).

El movimiento de las bacterias aerobias, como *Azospirillum* y *E. coli*, es una respuesta a un gradiente de oxígeno. *Azospirillum* forma una banda nítida en un gradiente de oxígeno (de 3 a 5  $\mu\text{M}$ ); las bacterias se mueven hacia donde existen esos niveles y son repelidas por concentraciones más bajas o más altas. La concentración de oxígeno preferida para la aerotaxis de *Azospirillum* y *E. coli* es similar a la concentración que favorece la fijación biológica de nitrógeno. En ese sentido, la aerotaxis representa una respuesta ambiental adaptativa importante, que puede guiar a las bacterias diazotróficas de vida libre, a las condiciones óptimas para la fijación de nitrógeno en la rizosfera (Zhulin et al., 1996).

Boonjawat et al. (1991) demostraron por microscopía fluorescente, la adhesión de los aislamientos R15 y R17 de *Klebsiella* sp. a la raíz de arroz el cual se encontraba en agua estéril. La adhesión de la bacteria en los pelos radicales y en las células de la epidermis se observó 2 h después de la inoculación. Después de 36 h, fue posible observar una densa capa alrededor de la bacteria, similar a una estructura envolvente, que puede estar compuesta de exopolisacáridos y glicoproteínas en la unión bacteria-bacteria y en la asociación bacteria-planta.

Un factor importante para la movilidad de las bacterias es la presencia o ausencia de flagelos. En ese sentido, las bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Herbaspirillum* y *Campylobacter* poseen flagelos polares, mientras que *Azotobacter* tiene flagelos periféricos. *Azospirillum* puede presentar flagelos polares o flagelos laterales (Elmerich et al., 1992) y *Klebsiella pneumoniae* está rodeada de fimbrias (Korhonen et al., 1986).

La capacidad de las bacterias para afectar el crecimiento de las plantas no sólo depende de su abundancia, sino de su capacidad para proliferar a través de la raíz (Loper et al., 1985). En general, las bacterias inoculadas en la semilla colonizan sólo el primer tercio del sistema radical (Hatzinger y Alexander, 1994), aunque algunas, como *Azospirillum*, pueden moverse de la semilla inoculada y distribuirse en todo el sistema radical, en respuesta al propio crecimiento de la raíz (Bashan y Levanony, 1991).

En las gramíneas, la colonización con *Azospirillum* ocurre principalmente en la superficie radical y muy pocas bacterias se adhieren a los pelos radicales. En la mayoría de las plantas inoculadas con *Azospirillum*,

no se ha detectado penetración en los pelos radicales, por lo cual se asume que no penetra a los espacios intercelulares a través de los pelos radicales. No obstante, *A. brasilense* Sp-245 se encontró en altas densidades colonizando el interior de células de trigo (Assmus et al., 1995).

Otro mecanismo que se ha asociado con el movimiento de las bacterias inoculadas y su distribución en las partes de la rizosfera, es la competencia con otros microorganismos. Cuando las bacterias se inoculan en condiciones asépticas, no tienen competencia, por lo cual la densidad de su población en la rizosfera probablemente está determinada sólo por la disponibilidad de carbono de los exudados. Sin embargo, en condiciones naturales, la competencia por los exudados entre los microorganismos es intensa. Si una determinada población bacteriana es alta, las bacterias estarán presentes en un mayor número de raíces vecinas y tendrán mayor disponibilidad de exudados que aquéllas con baja densidad (Hatzinger y Alexander, 1994).

El contenido de humedad del suelo también afecta el movimiento de las bacterias hacia la raíz. Por ejemplo, *Azospirillum* puede recorrer una distancia de 40 a 60 mm hacia la raíz de trigo en 96 h, en un suelo arenoso con 16% de humedad; no obstante, cuando la humedad es de sólo 10%, su desplazamiento se reduce a 20 mm (Bashan et al., 1996a). Además del contenido, el movimiento del agua en el suelo afecta también la movilidad de las bacterias. Si el proceso que domina es la evaporación, las bacterias colonizan el primer tercio de la raíz y, si es la percolación, las bacterias tendrán oportunidad de colonizar lugares más profundos. No obstante, se requieren más estudios para determinar las razones que limitan el transporte e identificar cepas de bacterias con mayor capacidad para colonizar porciones distantes del sistema radical (Hatzinger y Alexander, 1994).

La incapacidad de diversos inoculantes para mejorar el rendimiento de los cultivos, con frecuencia, se atribuye a la ineficiencia de estas bacterias para colonizar consistentemente la rizosfera. Cuando las bacterias se aplican en condiciones no asépticas, su abundancia y distribución a través de la rizosfera está relacionada con la densidad de inóculo aplicado; 16 de 19 bacterias inoculadas a semillas de alfalfa con una concentración de  $10^7$  ó  $10^8$  células  $\text{g}^{-1}$  colonizaron la rizosfera de plántulas de quince días. Si el inóculo es aplicado a la semilla, las poblaciones bacterianas se desarrollan más en la porción superior del sistema

radical, sin colonizar abundantemente las porciones media y baja (Hatzinger y Alexander, 1994). Finalmente, el éxito en la promoción del crecimiento de las plantas, cuando se introducen bacterias benéficas depende, en gran medida, de un establecimiento oportuno y de su persistencia a lo largo de la estación de crecimiento de la raíz (Schippers *et al.*, 1987).

**Supervivencia y estructuras de resistencia.** Los principales factores abióticos que influyen sobre la supervivencia de los microorganismos en el suelo, cuando éstos son inoculados, son: la humedad del suelo, el régimen de temperatura, el pH, la textura, el O<sub>2</sub> y la disponibilidad de nutrientes (Davies y Whitbread, 1989). Dentro de los factores bióticos se encuentran: la predación por protozoarios, el antagonismo microbiano y la competencia, así como el estado fisiológico en el que se introduce la bacteria (Vandenhove *et al.*, 1993). Cuando se presentan condiciones de estrés, como sequía o ausencia de nutrientes, algunas bacterias de vida libre forman estructuras de resistencia. Por ejemplo: *Bacillus* forma esporas, *Azotobacter*, *Derxia* y *Azomonas* tienen la capacidad de enquistarse, y en *Azospirillum* se ha encontrado la formación de una estructura similar a un quiste, que permite que esta bacteria se encapsule y sobreviva en condiciones de desecamiento y de altas temperaturas (Elmerich *et al.*, 1992).

En *Azotobacter vinelandii*, la forma enquistada no presenta actividad de reducción de acetileno. El quiste tiene forma ovoide, es más grande que las células vegetativas y no tiene movimiento, ya que está desprovisto de flagelo. La formación del quiste se inicia cuando las condiciones de oxígeno o de humedad son limitantes y existe un exceso de carbono (Senior y Dawes, 1973). En el proceso de formación del quiste, *A. vinelandii* produce dos polímeros: el polisacárido extracelular alginato y el poliéster intracelular poli-β-hidroxibutirato (PHB) (Núñez *et al.*, 1999; Castañeda *et al.*, 2000). Este último se encuentra en forma de gránulos en los quistes de la bacteria (Mulder, 1975), puede representar alrededor de 57% de su peso seco (Elmerich *et al.*, 1992) y es producido por la bacteria como una reserva de carbono y energía en condiciones de estrés (Senior y Dawes, 1973). La composición lipídica de las membranas de los quistes contribuye a la resistencia a la desecación (Reusch y Sadoff, 1983).

Cuando las bacterias son inoculadas en el suelo, en la primera semana tienen una fase de crecimiento

exponencial; a partir de ahí, el número de colonias por gramo de suelo se reduce, hasta alcanzar la fase estacionaria, con una población de 33 a 50 unidades formadoras de colonias por gramo de suelo seco. Esta fase estacionaria se inicia en la quinta semana y se prolonga mientras no haya condiciones adversas que mermen las poblaciones. El estado fisiológico de las cepas también influye en la supervivencia. Cuando el inóculo se produce con bacterias obtenidas en aislamientos que se encuentren en la primera semana de crecimiento, éstas tienen mayor oportunidad de establecerse y sobrevivir en la rizosfera, comparadas con aquéllas que se obtienen de aislamientos que tienen más de cinco semanas (Vandenhove *et al.*, 1993).

### Especificidad Bacteria-Hospedero

El genotipo de los organismos involucrados puede jugar un papel importante en la conformación de la asociación entre microorganismos y plantas, y determinar el resultado biológico de dicha asociación (Smith y Goodman, 1999). Al respecto, en un estudio realizado con cuatro genotipos de maíz, se observó que dos de ellos respondieron favorablemente a la inoculación con *Azospirillum* y también mostraron respuesta favorable a la aplicación de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N; los otros dos presentaron una respuesta mínima a la inoculación y a la fertilización nitrogenada (García de Salamone *et al.*, 1996).

Sin embargo, no todos los estudios apuntan hacia la especificidad de las bacterias de vida libre y las gramíneas (Bashan *et al.*, 1996b). La información acerca de la existencia de especificidad entre el hospedero y la bacteria es aún incipiente, existiendo aún muchas preguntas por responder, como: ¿Cuál es el tamaño de las poblaciones en la rizosfera? ¿Cómo influyen los componentes de los exudados radicales en la quimiotaxis y en el crecimiento de las poblaciones de microorganismos específicos? ¿Qué papel juega el hospedero para promover la actividad de los microorganismos? (Smith y Goodman, 1999). Dentro de las bacterias promotoras del crecimiento, en la actualidad la única que es considerada como una bacteria estrictamente asociativa con un hospedero específico (*Paspalum notatum*) es *Azotobacter paspali* (Evans y Burris, 1992).

### Mecanismos de las BPCV para la Promoción del Crecimiento Vegetal

Los mecanismos de las BPCV para promover el crecimiento de las plantas son diversos. Los que se mencionan con más frecuencia en la literatura son: fijación de nitrógeno (Boonjawat *et al.*, 1991; Elmerich *et al.*, 1992; Döbereiner *et al.*, 1995), producción de sustancias reguladoras del crecimiento (Arshad y Frankenberger, 1998), incremento en el desarrollo de la raíz (Bowen y Rovira, 1999), producción de compuestos sideróforos que incrementan la disponibilidad del Fe en la rizosfera (Crowley *et al.*, 1991), alteraciones en el potencial de la membrana de la raíz (Bashan y Levanony, 1991), inducción de resistencia sistémica a patógenos (Van Peer *et al.*, 1991), inhibición del crecimiento de organismos antagonistas (Utkhede *et al.*, 1999) e interacción sinérgica con otros microorganismos del suelo (Bashan *et al.*, 1996b).

Algunas de las bacterias son versátiles y pueden presentar varios mecanismos para promover el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, *Azospirillum* fija  $N_2$ , produce sustancias reguladoras del crecimiento, puede alterar el funcionamiento de la membrana de la raíz de la planta por medio de moléculas de comunicación celular y se ha propuesto la hipótesis aditiva, que señala la intervención conjunta de todos estos mecanismos (Bashan *et al.*, 1996a).

Algunas especies de *Bacillus*, como *B. subtilis*, producen antibióticos y son consideradas rizobacterias promotoras del crecimiento, debido a que ejercen control biológico sobre algunos patógenos del suelo. Otras especies, como *B. megaterium*, *B. polymyxa* y *B. circulans*, tienen mecanismos para promover el crecimiento de las plantas, diferentes al control de patógenos, como fijación de nitrógeno y solubilización de fosfatos, haciendo más disponibles los nutrientes en la rizosfera, en beneficio de las plantas (Bashan *et al.*, 1996b).

**Fijación biológica de nitrógeno.** La fijación biológica de nitrógeno (FBN) es la reducción enzimática de nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) a amonio ( $NH_4$ ). Este proceso es exclusivo de algunas bacterias (Evans y Burris, 1992), denominadas bacterias diazotróficas. La FBN es una opción importante para la recuperación de la fertilidad del suelo, en especial ahora cuando la aplicación de fertilizantes es un procedimiento caro que, además, puede incrementar la contaminación (Zahran, 1999). La mayor parte de la

investigación sobre FBN se ha realizado en la simbiosis entre rizobios y leguminosas; sin embargo, desde el aislamiento de *Clostridium pasteurianum* por Winogradsky en 1893 y *Azotobacter chroococcum* por Beijerinck en 1901, se despertó el interés por el estudio de los microorganismos diazotróficos de vida libre (Mulder, 1975) y es en las últimas décadas cuando se ha investigado la FBN en bacterias asociadas a diversas gramíneas.

La FBN en un suelo, ocupado por gramíneas, depende del estado en el cual se encuentra el nitrógeno en ese suelo y su relación con el estado y contenido de carbono. Esto puede variar, si la gramínea se encuentra como unicultivo, si se ha sembrado en rotación con una leguminosa (Fujita *et al.*, 1992), o bien, si es perenne y se encuentra asociada con leguminosas. Aun así, es muy difícil estimar en la práctica la cantidad de nitrógeno fijado (Elgersma y Hassink, 1997).

El proceso de reducción de  $N_2$  a  $NH_4$  está catalizado por el complejo enzimático nitrogenasa, que consta de dos proteínas distintas llamadas dinitrogenasa y dinitrogenasa reductasa, las cuales son metaloenzimas. Ambos componentes tienen hierro y la dinitrogenasa también contiene molibdeno. En la dinitrogenasa, el hierro y el molibdeno forman parte de un cofactor conocido como *FeMo-co*, el cual es el centro donde ocurre la reducción real del  $N_2$  (Madigan *et al.*, 1999).

Lo anterior explica el requerimiento de molibdeno (Mo) para la fijación biológica de nitrógeno. No obstante, la observación de diversas clases de mutantes de *A. vinelandii*, que tienen la capacidad de fijar  $N_2$  en un medio deficiente de Mo, indica que esta bacteria tiene un sistema nitrogenasa alternativo (nitrogenasa dos) para la fijación de  $N_2$ . En este sistema, la Mo-proteína de la nitrogenasa es sustituida por una vanadio-proteína (Robson *et al.*, 1986; Eady, *et al.*, 1987). *A. chroococcum* posee las nitrogenasas uno y dos (Pau *et al.*, 1993). Estudios más recientes indican que *A. vinelandii* contiene tres nitrogenasas genéticamente distintas. La nitrogenasa uno es sintetizada en condiciones de suficiencia de molibdeno; la nitrogenasa dos se expresa cuando el Mo ha sido reemplazado por el Va y la nitrogenasa tres se expresa cuando el Mo y el Va son deficientes (Joerger *et al.*, 1989).

La actividad de la nitrogenasa es afectada por: el contenido de humedad del suelo (Vlassak *et al.*, 1973; Herman *et al.*, 1993), la etapa fenológica de la planta y su actividad fotosintética (Döbereiner y Day, 1975)

y la osmotolerancia (Hartmann *et al.*, 1991), la cual no sólo varía en función del potencial de humedad originado por las concentraciones de los solutos, sino también por el tipo de compuestos. Por ejemplo, la actividad de la nitrogenasa de *Acetobacter diazotrophicus* alcanza su máximo valor a un potencial de humedad de 20 bares en presencia de sacarosa. Si el soluto es NaCl, la actividad máxima se alcanza a 2.5 bares y alrededor de 10 bares se inhibe. La nitrogenasa de *Azospirillum halopraeferens* presenta actividad hasta 30 bares originados por NaCl (Hartmann *et al.*, 1991).

La actividad de la nitrogenasa se inactiva rápidamente en presencia de O<sub>2</sub>. El mecanismo de *Azotobacter*, para fijar nitrógeno en condiciones aerobias, consiste en incrementar la tasa respiratoria para mantener baja la concentración de O<sub>2</sub> intracelular (Thorneley y Ashby, 1989). Un segundo mecanismo implica la formación de complejos entre los componentes de la nitrogenasa (Mo y Fe-proteínas) y una proteína que puede ser única para *Azotobacter* (Ramos y Robson, 1985).

En el proceso de fijación de nitrógeno, la planta demanda energía, ya que la reducción del N<sub>2</sub> por la nitrogenasa es acompañada por la reducción del H<sup>+</sup>. La eficiencia en la incorporación de N durante el crecimiento, así como la cantidad de carbono usado por cada grupo bacteriano en el proceso de fijación, varía de acuerdo con el tipo de organismo (Hill, 1992).

En el caso de bacterias que fijan nitrógeno en condiciones anaerobias, el proceso de degradación del piruvato provee el electrón reductante del ATP para la fijación del N<sub>2</sub>, donde la ferredoxina reducida sirve directamente como donadora de electrones a la nitrogenasa. En condiciones aerobias, la actividad de la nitrogenasa no es apoyada por la degradación del piruvato. En ese sentido, *A. vinelandii* contiene ferredoxinas y flavoproteínas que son capaces de transferir electrones del fotosistema I de las plantas a la nitrogenasa. También el dinucleótido de nicotinamida adenina en su forma reducida (NADH) tiene la capacidad de proporcionar electrones para mantener la actividad de la nitrogenasa de *Azotobacter*. Se han reconstruido cadenas de transporte de electrones de NADPH en la nitrogenasa de *A. vinelandii* (Evans y Phillips, 1975). Los electrones en estas cadenas incluyen flavodoxina (también conocida como azotoflavina) y ferredoxina (Wong y Maier, 1984).

En México, se han realizado aislamientos de bacterias diazotróficas en caña de azúcar. En un estudio realizado por Caballero y Martínez (1994), se aisló *Acetobacter diazotrophicus* a partir de tejidos internos de tallos y raíces de diversas variedades de caña, obtenidas en las regiones del país.

**Producción de sustancias reguladoras del crecimiento.** Cuando se reconoció el papel de las bacterias de la rizosfera en la promoción del crecimiento de las plantas, su efecto se atribuyó a su facultad para fijar nitrógeno. Sin embargo, en las últimas décadas se ha destacado su importancia como promotoras del desarrollo, debido a su capacidad para sintetizar metabolitos o sustancias reguladoras del crecimiento. Estas sustancias son compuestos naturales que afectan procesos de las plantas a concentraciones más bajas de las que presentan nutrimentos o vitaminas. Hay cinco clases de reguladores del crecimiento vegetal sintetizados por las plantas: auxinas, giberelinas, citocininas, etileno y ácido abscísico (Arshad y Frankenberger, 1998).

Cuando estos metabolitos son producidos en forma endógena por las plantas, se les denomina hormonas vegetales o fitohormonas. El término "reguladores del crecimiento de las plantas" es usado por la industria de agroquímicos para nombrar a los compuestos sintéticos que tienen propiedades para regular el crecimiento de las plantas; en general, este término se utiliza cuando las hormonas de las plantas son producidas por microorganismos de la rizosfera (Arshad y Frankenberger, 1998).

La producción de sustancias promotoras del crecimiento, aparentemente, es una respuesta de las bacterias a la producción de sustancias de la planta hacia la rizosfera. Por ejemplo, *A. chroococcum* produce ácido indol-3-acético (AIA) a partir del triptofano, el cual es exudado por la raíz de las plantas (Brown, 1972) y puede sintetizar auxinas, giberelinas y citocininas, cuando se cultiva en un medio libre de nitrógeno y se adicionan exudados de raíces de maíz (Martínez *et al.*, 1988). Cuando producen citocininas en forma abundante, los precursores más efectivos son la adenina (ADE) y el alcohol isopentílico (AI) (Arshad y Frankenberger, 1991; Nieto y Frankenberger, 1991).

Arshad y Frankenberger (1998) presentaron un modelo hipotético de las relaciones entre BPCV y las plantas. En este modelo, el ácido indolacético (AIA), sintetizado por una bacteria que está adherida a la superficie de la semilla, o bien, a la raíz de una planta

en vías de desarrollo, es tomado por la planta y junto con el AIA endógeno de la planta puede estimular la división y alargamiento de la célula, o bien, promover la síntesis de ácido 1-amino-ciclopropano-1-carboxílico (ACC) con la activación de la enzima ACC sintasa. Éste es un compuesto precursor inmediato de etileno en las plantas superiores. En el último caso, la síntesis de ACC dentro de la planta se aumenta. Una porción significativa del ACC puede ser exudado por las raíces de la planta o por las semillas (junto con otras moléculas normalmente presentes en semilla o exudados de la raíz) y, entonces, es tomado activamente por la bacteria e hidrolizado por la enzima ACC deaminasa, transformándolo en  $\alpha$ -cetobutirato y amonio. La bacteria induce a la planta a sintetizar más ACC que lo que necesita, para tener una fuente de nitrógeno para la bacteria (el ACC). Una consecuencia directa de bajar la cantidad de ACC dentro de la planta (tanto el endógeno, como el AIA-estimulado) es la reducción de etileno dentro de la planta, a tal grado, que se puede provocar la inhibición de la elongación de la radícula.

Uno de los efectos más importantes es la modificación de la morfología de la raíz, que incluye una fitoestimulación de este órgano y un incremento significativo en la formación de pelos radicales

(Dobbelaere *et al.*, 1999). La modificación de la morfología de los pelos radicales debida a las sustancias promotoras del crecimiento, favorece la permeabilidad de la raíz a ciertos iones (Chalk, 1991). Se ha observado que 93% de los aislamientos de *Azotobacter*, obtenidos de gramíneas, producen auxinas (Arshad y Frankenberger, 1998). También en el sobrenadante de un cultivo de *A. chroococcum* se detectó AIA y algunos derivados no identificados de auxinas y giberelinas (Bashan *et al.*, 1996b). Sin embargo, la producción de AIA también se ha considerado como un mecanismo de las bacterias fitopatógenas (Fett *et al.*, 1987; Schippers *et al.*, 1987; Gaudin *et al.*, 1994), por lo cual es conveniente una mayor investigación al respecto.

El Cuadro 1 presenta una relación de investigaciones realizadas en gramíneas de 1968 a 1995, sobre la producción de sustancias reguladoras del crecimiento por bacterias diazotróficas de vida libre (Arshad y Frankenberger, 1998). Estos autores señalaron también efectos favorables en alfalfa, tomate y otros cultivos.

**Solubilización de nutrientes y producción de sideróforos.** De acuerdo con lo revisado hasta ahora, las bacterias promotoras del crecimiento pueden favorecer el desarrollo de los cultivos debido a su

**Cuadro 1. Metabolitos secundarios producidos por bacterias diazotróficas de vida libre y su efecto en el crecimiento de algunas plantas gramíneas (Adaptado de Arshad y Frankenberger, 1998).**

Bacteria	Sustancia detectada <sup>†</sup>	Cultivo	Efecto	Fuente original
<i>Azotobacter</i> sp.	AIA, GLS	<i>Hordeum vulgare</i>	Los metabolitos mostraron efecto estimulante en la altura de planta y en el peso seco.	Mahmoud <i>et al.</i> (1984)
<i>A. chroococcum</i>	AIA, GLS	<i>Triticum aestivum</i>	Incremento en la longitud de raíces y yemas.	Pati <i>et al.</i> (1995)
<i>A. paspali</i>	AIA, GLS, CLS	<i>Paspalum notatum</i> , <i>Triticum aestivum</i> <i>Lolium perenne</i>	Efectos significativos sobre el crecimiento y rendimiento. No hubo fijación de nitrógeno, por lo cual el efecto se atribuyó a la producción de sustancias promotoras del crecimiento.	Barea y Brown (1974)
<i>Azospirillum brasilense</i>	AIA, ABA	<i>Triticum aestivum</i>	Elongación de la raíz. La aplicación exógena de AIA causó respuesta similar. Desde la inoculación se produjo AIA en cantidades altas y se especuló que la promoción del crecimiento se debía a su excreción.	Kolb y Martin (1985)
<i>A. brasilense</i>	AIA	<i>Triticum aestivum</i>	Se probaron dos cepas, una productora de AIA y una mutante sin esta capacidad. La primera incrementó el número y la longitud de raíces laterales. La cepa mutante no afectó el desarrollo de la raíz.	Barbieri <i>et al.</i> (1986)
<i>A. brasilense</i>	AIA	<i>Zea mays</i> L.	La inoculación incrementó la cantidad de AIA libre y confinado en la raíz, en forma superior al testigo.	Fallik <i>et al.</i> (1989)
<i>Azomonas macrocytogenes</i>	AIA, GLS	<i>Triticum aestivum</i>	Incremento en la longitud de raíces y brotes.	Pati <i>et al.</i> (1995)

<sup>†</sup> AIA = ácido indol-3-acético; GLS = giberelinas; ABA = ácido abscísico; CLS = citocininas.

capacidad para fijar  $N_2$ , o bien, por la producción de hormonas que ocasionan cambios en la morfología de la raíz que inducen a una mayor adquisición de nutrimentos. No obstante, los microorganismos de la rizosfera pueden afectar la nutrición mineral de las plantas en forma desfavorable cuando compiten por nutrimentos, cuando inmovilizan los nutrimentos minerales o cuando consumen los solutos orgánicos que las raíces liberan para movilizar nutrimentos solubles escasos en la solución del suelo (Wirén *et al.*, 1993). En relación con las bacterias promotoras del crecimiento, los efectos son favorables, debido a que algunas de ellas tienen la capacidad de producir compuestos quelatados que incrementan la solubilidad del Fe en la rizosfera (Crowley *et al.*, 1988).

Las plantas y los microorganismos incrementan la liberación de exudados en la rizosfera, en especial ácidos orgánicos, en condiciones de estrés. Un ejemplo de lo anterior es la liberación de ácidos orgánicos en respuesta a una deficiencia de hierro (Jones *et al.*, 1996). Este hecho afecta la distribución de bacterias en las zonas de la raíz en función del estado nutricional del hierro en las plantas (Yang y Crowley, 2000).

Los sideróforos son compuestos de bajo peso molecular secretados por las raíces de las plantas y las bacterias que actúan capturando elementos, como el hierro, en la rizosfera. La producción de sideróforos se ha asociado con diversas bacterias de vida libre, en especial del grupo de las *Pseudomonas* (Zdor y Anderson, 1992). En un estudio realizado con *Pseudomonas* 7NSK (aparentemente una línea de *P. aeruginosa*), se observó un incremento en el rendimiento de cebada, maíz y trigo; los mecanismos que explican este aumento en rendimiento se atribuyeron a su capacidad para producir pioverdina (sideróforo fluorescente que es producido por la bacteria en condiciones de deficiencia de hierro o de otros metales, en condiciones de pH bajo, o como agente inhibidor de varios hongos fitopatógenos). La producción de pioverdina puede ser estratégica en la rizosfera, no sólo para el abastecimiento de hierro, sino, también, como una defensa contra otros microorganismos (Höfte *et al.*, 1991).

Recientemente, el molibdeno de la nitrogenasa de *A. vinelandii* se ha asociado con la formación de compuestos sideróforos, los cuales interactúan con el molibdeno, de acuerdo con su estructura y ligando potencial. La afinidad de cada sideróforo hacia el molibdeno es alta cuando se forma el complejo molibdeno-sideróforo; sin embargo, dichos complejos

son desestabilizados rápidamente en presencia de  $Fe^{3+}$ . La competencia entre  $Fe^{3+}$  y el molibdeno aparentemente no es la causa principal de la acumulación de sideróforos, por lo que este aumento se debe a la presencia de vanadio, tungsteno, zinc y manganeso; posiblemente, cada uno de estos metales inhibe de manera parcial la actividad de la reductasa-férrica, la cual es una enzima importante en la liberación del hierro de los sideróforos férricos (Cornish y Page, 2000).

También en *Azospirillum lipoferum* se han encontrado sideróforos del tipo fenolato, además de la producción de ácido salicílico. La síntesis de sideróforos en *Azotobacter* y *Azospirillum* está relacionada con la síntesis de varias proteínas de la membrana, algunas de las cuales están involucradas probablemente en el transporte de hierro (Elmerich *et al.*, 1992).

**Alteraciones en el potencial de la membrana.** Otro efecto de las rizobacterias es la capacidad de inducir alteraciones en el potencial de la membrana en las células de las raíces de las plantas y promover la liberación de protones de éstas hacia la rizosfera. El estudio microscópico de la interacción entre *Azospirillum brasilense* y células de la raíz de trigo reveló que la pared celular previene el contacto físico directo entre la bacteria y la membrana plasmática causante del flujo de protones (Bashan y Levanony, 1991). Cuando las plantas no son inoculadas, normalmente presentan dos períodos de liberación de protones y dos períodos de liberación de componentes alcalinos, con una distribución bimodal. Después de inocular trigo con diversas bacterias de la rizosfera, se realizó un monitoreo durante 200 h; fue posible observar que *Azospirillum* eliminó los efectos de esta fluctuación, manteniendo sólo la liberación de protones. Una vez que la solución alcanzó un pH de  $3.1 \pm 0.1$ , se mantuvo en ese valor durante todo el período de observación. Bashan y Levanony (1991) propusieron que, para alterar la actividad de la membrana, las bacterias liberan una señal que tiene la capacidad de cruzar la pared celular de la planta y que es reconocida por la membrana, donde reduce el potencial de la misma en toda la raíz, siendo mayor el efecto en la zona de elongación. Sin embargo, esta señal todavía no se ha bien identificado.

### Interacción de las Rizobacterias con Otros Microorganismos

Desde los primeros aislamientos de bacterias de vida libre fijadoras de nitrógeno, se observó que

*A. chroococcum* fija más nitrógeno al asociarse con otras bacterias, como *Agrobacterium*, *Aerobacter* y *Clostridium* que cuando se cultiva sola. Este efecto se incrementa cuando las bacterias diazotróficas de vida libre se asocian con bacterias u hongos celulolíticos (Jensen y Holm, 1975). Otras bacterias que mantienen relaciones sinérgicas con otros microorganismos, son algunas especies de *Bacillus* (Chanway, 1997). En un estudio realizado en sorgo, al inocular *B. polymyxa* con *Azospirillum brasilense*, se observó un incremento significativo en el rendimiento de grano (46%) y en la absorción de fósforo (52%), al comparar los resultados obtenidos a partir de inoculaciones únicas de ambos organismos (Bashan et al., 1996b).

Un mecanismo de colonización propuesto para *Acetobacter diazotrophicus* y *Klebsiella* sp. lo constituyen las micorrizas vesículo arbusculares (VAM). Estas bacterias se han aislado de esporas de *Glomus clarum*. Se realizaron inoculaciones, utilizando la bacteria y el hongo juntos, en los cultivos de papa, sorgo x sudán y caña. Se encontró que el número de células diazotróficas sobre las raíces fue significativamente más alto en este tratamiento que en los tratamientos inoculados sólo con las bacterias diazotróficas o que el tratamiento sin inocular (Paula et al., 1991).

La entrada de las bacterias a las plantas a través de una infección con micorrizas también plantea las siguientes interrogantes: ¿Cuál es el mecanismo de la bacteria para entrar en la espora de *Glomus*?, ¿Tiene la bacteria la capacidad de multiplicarse en la hifa del hongo?, ¿Puede reducir el nitrógeno en la hifa?, ¿Qué tan común es encontrar bacterias diazotróficas en las VAM? y ¿Cuántas especies de plantas se benefician con las bacterias diazotróficas de las VAM? (Triplet, 1996).

### Efecto de las BPCV en el Establecimiento y Rendimiento de las Gramíneas

Diversas investigaciones indican incrementos en el rendimiento de los cultivos como resultado de la inoculación de las semillas con bacterias, sin embargo, los resultados no son consistentes, lo cual ha planteado incertidumbre sobre la validez e importancia del fenómeno (Kloepper et al., 1980). Los principales efectos de las bacterias promotoras del crecimiento sobre las gramíneas se han asociado con efectos en la emergencia, en el desarrollo de la raíz y efectos en el rendimiento. En *Azospirillum*, los cambios favorables en las plantas, en general, se han

atribuido a cambios en la absorción de  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4$ , K y Fe, lo cual incrementa la acumulación de minerales en hojas y tallos. Se ha sugerido que el incremento en la absorción de minerales se debe a un incremento general en el volumen de las raíces y no a un mecanismo más eficaz de absorción de iones (Bashan et al., 1996a).

Con relación al efecto de la inoculación de BPCV sobre pastos existen pocos trabajos y la mayoría se ha realizado en zonas tropicales (Hernández et al., 1994). Entre ellos, Pereira et al. (1993) publicaron resultados de la inoculación de *Panicum maximum* y *Chloris gayana*, con cinco cepas de *Azospirillum*. En esas condiciones, *Azospirillum* fue capaz de fijar entre 20 y 60 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de N e incrementar el rendimiento en más de 94% con tres de las cepas evaluadas en *Panicum maximum*, mientras que *Chloris gayana* no presentó diferencias estadísticas en rendimiento, pero sí incrementó su calidad, ya que el contenido de nitrógeno fue superior en 80% con relación al pasto no inoculado.

No obstante, el pasto *Panicum maximum* no presentó resultados favorables cuando se inoculó con *Azotobacter chroococcum* y tampoco se obtuvo efecto alguno sobre el crecimiento de *Cenchrus ciliaris*, cuando se inoculó con la misma bacteria (Tang, 1995). En el caso de *Azotobacter*, aun cuando se reconoce su beneficio potencial en la fijación de nitrógeno al asociarse con gramíneas, la literatura señala que, en general, este beneficio se debe a una asociación espontánea, que raramente puede ser manejada como una práctica agrícola más, en especial en las zonas áridas (Kennedy y Tchan, 1992).

En condiciones naturales, las bacterias asociativas pueden fijar de 30 a 40 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de N, cuando los suelos son deficientes en nitrógeno (Chalk, 1991). En suelos sin inocular, la FBN por *Azotobacter* puede representar de 8 a 13% del N del pasto "remolino" (*Paspalum notatum*) y hasta 40% en los pastos "chontalpo" (*Brachiaria decumbens*) y "guinea" (*Panicum maximum*). En un estudio realizado en pasto kallar (*Leptochloa fusca*), la fijación de N fue de 19 kg ha<sup>-1</sup> en condiciones naturales (sin inocular) y de 30 kg ha<sup>-1</sup> cuando el pasto se inoculó con *Azotobacter*, lo cual representó 36% de su N, en un período de ocho meses (Malik et al., 1988).

### CONCLUSIONES

- Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) de la rizosfera pueden estimular el

crecimiento de las gramíneas a través de mecanismos, como fijación de nitrógeno, producción de sustancias promotoras del crecimiento, solubilización de nutrientes y producción de sideróforos.

- Las bacterias asociadas con la producción de gramíneas que se han estudiado más, son las de los géneros: *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Beijerinckia*, *Pseudomonas* y *Bacillus*. Algunas de ellas forman estructuras de resistencia para favorecer su supervivencia en condiciones de estrés, en especial sequía, la cual es común en los pastizales de zonas áridas.

- La colonización de la raíz por BPCV está relacionada con una mayor disponibilidad de carbono y humedad en la rizosfera, la cual es afectada por el mucílago de las gramíneas. El movimiento microbiano se ha asociado con fenómenos, como quimiotaxis, aerotaxis, adhesión y movimiento debido a la percolación y/o evaporación del agua. No obstante, se requiere mayor conocimiento sobre los mecanismos de colonización y permanencia de las BPCV en la raíz.

- La información sobre la manipulación de las BPCV, a través de inóculos, para la promoción del crecimiento de las plantas en condiciones de campo es inconsistente y no siempre favorable, a diferencia de los experimentos realizados en condiciones de laboratorio e invernadero. Por esta razón, se requieren de mayores estudios sobre el comportamiento de las bacterias inoculadas en condiciones de campo, para conocer los factores ambientales, como tipo de suelo y clima que influyen en colonización satisfactoria de la raíz y que determina su efecto en el desarrollo del cultivo.

- Las mezclas o la combinación de microorganismos utilizados como inóculo de semillas dan mejores resultados en el rendimiento de las gramíneas, que cuando se inoculan los organismos en forma individual. Sin embargo, es necesario realizar investigación de campo sobre los tipos de microorganismos que producen efectos sinérgicos y su aplicación en gramíneas.

- El uso de microorganismos capaces de promover el crecimiento de los pastos puede representar una opción importante para el establecimiento y para la producción de pastos forrajeros, en especial en condiciones de estrés de humedad y temperatura.

## LITERATURA CITADA

- Alcalá G., C.H. 1995. Origen geográfico y características biológicas del pasto buffel. pp. 9-14. *In*: Guía para el establecimiento, manejo y utilización del zacate buffel. Patronato del Centro de Investigaciones Pecuarías del Estado de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Arshad, M. y W.T. Frankenberger Jr. 1991. Microbial production of plant hormones. *Plant Soil* 133: 1-8.
- Arshad, M. y W.T. Frankenberger Jr. 1998. Plant growth-regulating substances in the rhizosphere: Microbial production and functions. *Adv. Agron.* 62: 45-151.
- Assmus, B., P. Hutzler, G. Kirchhof, R. Amann, J.R. Lawrence y A. Hartmann. 1995. *In situ* localization of *Azospirillum brasilense* in the rhizosphere of wheat with fluorescently labeled, rRNA-targeted oligonucleotide probes and scanning confocal laser microscopy. *Applied Environ. Microbiol.* 61: 1013-1019.
- Bagwell, C.E., Y.M. Piceno, A. Ashburne-Lucas y C.R. Lovell. 1998. Physiological diversity of the rhizosphere diazotroph assemblages of selected salt Marsh grasses. *Applied Environ. Microbiol.* 64(11): 4276-4282.
- Baldani, V.L.D., M.A. Álvarez de B., J.I. Baldani y J. Döbereiner. 1986. Establishment of inoculated *Azospirillum* sp. in the rhizosphere and in roots of field grown wheat and sorghum. *Plant Soil* 90: 35-46.
- Barbieri, P., T. Zanelli, E. Galli y G. Zanetti. 1986. Wheat inoculation with *Azospirillum brasilense* Sp6 and some mutants altered in nitrogen fixation and indole-3-acetic acid production. *FEMS Microbiol. Lett.* 36: 87-90.
- Barea, J.M. y C. Azcón-Aguilar. 1982. La Rizosfera: Interacciones microbio-planta. *Anales de Edafología y Agrobiología XII* (7-8): 1517-1532.
- Barea, J.M. y M.E. Brown. 1974. Effects on plant growth produced by *Azotobacter paspali* related to synthesis of plant growth regulating substances. *J. Applied Bacteriology* 40: 129-134.
- Bashan, Y. y H. Levanony. 1991. Alterations in membrane potential and in proton efflux in plant roots induced by *Azospirillum brasilense*. *Plant Soil* 137: 99-103.
- Bashan, Y., G. Holguín y R. Ferrera-Cerrato. 1996a. Interacciones entre plantas y microorganismos benéficos. I. *Azospirillum*. *Terra* 14: 159-194.
- Bashan, Y., G. Holguín y R. Ferrera-Cerrato. 1996b. Interacciones entre plantas y microorganismos benéficos. II. Bacterias asociativas de la rizosfera. *Terra* 14: 195-210.
- Beauchamp, Ch.J., P. Dion, J.W. Kloepper y H. Antoun. 1991. Physiological characterization of opine-utilizing rhizobacteria for traits related to plant growth-promoting activity. *Plant Soil* 132: 273-279.
- Boddey, R.M., O.C. De Oliveira, S. Urquiaga, V.M. Reis, F.L. De Olivares, V.L.D. Baldani y J. Döbereiner. 1995. Biological nitrogen fixation associated with sugar cane and rice: Contributions and prospects for improvement. *Plant Soil* 174: 195-209.
- Boonjawat, J., P. Chaisiri, J. Limpananont, S. Soontaros, P. Pongsawasdi, S. Chaopongpang, S. Pornpatkul, B. Wongwaitayakul y L. Sangduan. 1991. Biology of nitrogen-fixing rhizobacteria. *Plant Soil* 137: 119-125.

- Bowen, G.D. y A.D. Rovira. 1999. The Rhizosphere and its management to improve plant growth. *Adv. Agron.* 66: 1-102.
- Brown, M.E. 1972. Plant growth substances produced by microorganisms in soil and rhizosphere. *J. Applied Bacteriology* 35: 443-451.
- Caballero-Mellado, J. y E. Martínez-Romero. 1994. Limited genetic diversity in the endophytic sugarcane bacterium *Acetobacter diazotrophicus*. *Applied Environ. Microbiol.* 60: 1532-1537.
- Castañeda, M., J. Guzmán, S. Moreno y G. Espin. 2000. The GacS sensor kinase regulates alginate and poly- $\beta$ -Hydroxybutyrate production in *Azotobacter vinelandii*. *J. Bacteriology* 182: 2624-2628.
- Cornish, A.S. y W.J. Page. 2000. Role of molybdate and other transition metals in the accumulation of protochelin by *Azotobacter vinelandii*. *Applied Environ. Microbiol.* 66: 1580-1586.
- Crowley, D.E., C.P.P. Reid y P.J. Szaniszlo. 1988. Utilization of microbial siderophores in iron acquisition by oat. *Plant Physiol.* 87: 680-685.
- Crowley, D.E., Y.C. Wang, C.P.P. Reid y P.J. Szaniszlo. 1991. Mechanisms of iron acquisition from siderophores by microorganisms and plants. *Plant Soil* 130: 179-198.
- Chalk, P.M. 1991. The contribution of associative and symbiotic nitrogen fixation to the nitrogen nutrition of non-legumes. *Plant Soil* 132: 29-39.
- Chanway, C.P. 1997. Inoculation of tree roots with plant growth promoting soil bacteria: An emerging technology for reforestation. *For. Sci.* 43: 99-111.
- Cheng, W. 1999. Rhizosphere feedback in elevated CO<sub>2</sub>. *Tree Physiol.* 19: 313-320.
- Davies, K.G. y R. Whitbread. 1989. Factors affecting the colonization of a root system by fluorescent pseudomonads: The effect of water, temperature and soil microflora. *Plant Soil* 116: 247-256.
- Dobbelaere, S., A. Croonenborghs, A. Thys, A. Vande Broek y J. Vanderleyden. 1999. Phytostimulatory effect of *Azospirillum brasilense* wild type and mutant strain altered in IAA production on wheat. *Plant Soil* 212: 155-164.
- Döbereiner, J. y J.M. Day. 1975. Nitrogen fixation in the rhizosphere of tropical grasses. pp. 39-56. *In: Stewart, W.D.P. (ed.). Nitrogen fixation by free-living microorganisms.* International Biological Prog. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Döbereiner, J., S. Urquiaga, R.M. Boddey y N. Ahmad. 1995. Alternatives for nitrogen of crops in tropical agriculture. Nitrogen economy in tropical soil. *Fertil. Res.* 42: 339-346.
- Eady, R.R., R.L. Robson, T.H. Richardson, R.W. Miller y M. Hawkins. 1987. The vanadium nitrogenase of *Azotobacter chroococcum*. Purification and properties of the VFe protein. *J. Biochem.* 244: 197-207.
- Echegaray-Alemán, A. 1995. El ciclo del nitrógeno y fases que lo constituyen. pp. 7-35. *In: Ferrera-Cerrato, R. y J. Pérez M. (eds.). Agromicrobiología, elemento útil en la agricultura sustentable.* Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Elgersma, A. y J. Hassink. 1997. Effects of clover (*Trifolium repens* L.) on plant and soil nitrogen and soil organic matter in mixtures with perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Plant Soil* 197: 177-186.
- Elmerich, C., W. Zimmer y C. Vieille. 1992. Associative nitrogen fixing bacteria. pp. 212-258. *In: Stacey, G., R.H. Burris y H.J. Evans (eds.). Biological nitrogen fixation.* Chapman and Hall. New York.
- Evans, H.J. y R.H. Burris. 1992. Highlights in biological nitrogen fixation during the last 50 years. pp. 1-42. *In: Stacey, G., R.H. Burris y H.J. Evans (eds.). Biological nitrogen fixation.* Chapman and Hall. New York.
- Evans, H.J. y D.A. Phillips. 1975. Reductants for nitrogenase and relationships to cellular electron transport. pp. 389-420. *In: Stewart, W.D.P. (ed.). Nitrogen fixation by free-living microorganisms.* International Biological Prog. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Fallik, E., Y. Okon, E. Epstein, A. Goldman y M. Fischer. 1989. Identification and quantification of IAA and IBA in *Azospirillum brasilense*-inoculated maize roots. *Soil Biol. Biochem.* 21: 147-153.
- Fett, W.F., S.F. Osman y M.F. Dunn. 1987. Auxin production by plant-pathogenic pseudomonads and xanthomonads. *Applied Environ. Microbiol.* 53: 1839-1845.
- Fujita, K., K.G. Ofosu-Budu y S. Ogata. 1992. Biological nitrogen fixation in mixed legume-cereal cropping systems. *Plant Soil* 141: 155-175.
- García de Salamone, I.E., J. Döbereiner, S. Urquiaga y R.M. Boddey. 1996. Biological nitrogen fixation in *Azospirillum* strain-maize genotype associations as evaluated by the <sup>15</sup>N isotope dilution technique. *Biol. Fert. Soil* 23: 249-256.
- Gaudin, V., T. Vrain y L. Jouanin. 1994. Bacterial genes modifying hormonal balances in plants. *Plant Physiol. Biochem.* 32: 11-29.
- Gessa, C. y S. Deiana. 1992. Ca-polygalacturonate as a model for a soil-root interface. II. Fibrillar structure and comparison with natural root mucilage. *Plant Soil* 140: 1-13.
- Gregory, P.J. y P. Hinsinger. 1999. New approaches to studying chemical and physical changes in the rhizosphere: An overview. *Plant Soil* 211: 1-9.
- Hartmann, A., S.R. Prabhu y E.A. Galinsky. 1991. Osmotolerance of diazotrophic rhizosphere bacteria. *Plant Soil* 137: 105-109.
- Hatzinger, P.B. y M. Alexander. 1994. Relationships between the number of bacteria added to soil or seeds and their abundance and distribution in the rhizosphere of alfalfa. *Plant Soil* 158: 211-222.
- Hawes, M.C., L.A. Brigham, F. Wen, H.H. Woo y Y. Zhu. 1998. Functions of root border cells in plant health: Pioneers in the Rhizosphere. *Annu. Rev. Phytopathol.* 36: 311-327.
- Herman, R.P., K.R. Provencio, R.J. Torrez y G.M. Seager. 1993. Effect of water and nitrogen additions on free-living nitrogen fixer populations in desert grass root zones. *Applied Environ. Microbiol.* 59: 3021-3026.
- Herman, R.P., K.R. Provencio, R.J. Torrez y G.M. Seager. 1994. Seasonal and spatial population dynamics of the nitrogen-efficient guild in a desert bajada grassland. *Applied Environ. Microbiol.* 60: 1160-1165.
- Hernández, M., M. Pereira y M. Tang. 1994. Utilización de los microorganismos biofertilizantes en los cultivos tropicales. *Pastos y Forrajes* 17: 183-192.
- Hill, S. 1992. Physiology of nitrogen fixation in free-living heterotrophs. pp. 87-134. *In: Stacey, G., R.H. Burris y H.J. Evans (eds.). Biological nitrogen fixation.* Chapman and Hall. New York.

- Höfte, M., K.Y. Seong, E. Jurkevitch y W. Verstraete. 1991. Pyoverdinin production by the plant growth beneficial *Pseudomonas* strain 7NSK<sub>2</sub>: Ecological significance in soil. *Plant Soil* 130: 249-257.
- INIFAP-SAGAR. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1997. Relación área siembra escurrecimiento en el establecimiento de pasto buffel. In: *Tecnologías Llave en Mano*. Tomo I. División Pecuaria. México. D.F.
- Jensen, V. y E. Holm. 1975. Associative growth of nitrogen-fixing bacteria with other micro-organisms. pp. 101-120. In: Stewart, W.D.P. (ed.). *Nitrogen fixation by free-living micro-organisms*. International Biological Prog. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Joerger, R.D., M.R. Jacobson y P.E. Bishop. 1989. Two nifA-Like genes required for expression of alternative nitrogenases by *Azotobacter vinelandii*. *J. Bacteriol.* 171: 3258-3267.
- Jones, D.L., P.R. Darrah y L.V. Kochian. 1996. Critical evaluation of organic acid mediated iron dissolution in the rhizosphere and its potential role in root iron uptake. *Plant Soil* 180: 57-66.
- Kennedy, I.R. y Y.T. Tchan. 1992. Biological nitrogen fixation in non-leguminous field crops: Recent advances. *Plant Soil* 141: 93-118.
- Kloepper, J.W., M.N. Schroth y T.D. Miller. 1980. Effects of rhizosphere colonization by plant growth-promoting rhizobacteria on potato plant development and yield. *Phytopathology* 70: 1078-1082.
- Kolb, W. y P. Martin. 1985. Response of plant roots to inoculation with *Azospirillum brasilense* and the application of indole acetic acid. pp. 215-221. In: Klingmüller, W. (ed.). *Azospirillum III*. Genetics, physiology, ecology. Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- Kole, M.M., W.J. Page e I. Altosaar. 1988. Distribution of *Azotobacter* in Eastern Canadian soils and in association with plant rhizospheres. *Can. J. Microbiol.* 34: 815-817.
- Korhonen, T.K., E. Nurmiaho-Lassila, T. Laakso y K. Haahtela. 1986. Adhesion of fimbriated nitrogen-fixing enteric bacteria to roots of grasses and cereals. *Plant Soil* 90: 59-69.
- Loper, J.E., C. Haack y M.N. Schoth. 1985. Population dynamics of soil pseudomonads in the rhizosphere of potato. *Appl. Environ. Microbiol.* 49: 416-422.
- Loredo, O.C., S. Beltrán L. y J.L. Barrón C. 1998. Reconversión de áreas agrícolas marginales a uso pecuario con módulos forrajeros. Pub. Téc. 10. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Palma de la Cruz. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Madigan, M.T., J.M. Martinko y J. Parker. 1999. *Brock*. Biología de los microorganismos. 8ª Edición revisada. Prentice Hall. Madrid, España.
- Mahmoud, S.A.Z., E.M. Ramadan y T. Khater. 1984. Production of plant growth promoting substances by rhizosphere microorganisms. *Zentralbl. Mikrobiol.* 139: 227-232.
- Malik, K.A., Y. Zafar, R. Bilal y F. Azam. 1988. Quantification of N<sub>2</sub>-fixation and survival of inoculated diazotroph associated with the roots of kallar grass. *Plant Soil* 108: 43-51.
- Mandinba, G., T. Heulin, R. Bally, A. Guckert y J. Balandreau. 1986. Chemotaxis of free-living nitrogen-fixing bacteria towards maize mucilage. *Plant Soil* 90: 129-139.
- Martín, R.M.H. y F. Ibarra F. 1995. Productividad y calidad forrajera. pp. 31-40. In: *Guía para el establecimiento, manejo y utilización del zacate buffel*. Patronato del Centro de Investigaciones Pecuarias del Estado de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Martínez-Toledo, M.V., T. de la Rubia, J. Moreno y J. González-López. 1988. Root exudates of *Zea mays* and production of auxins, gibberellins and cytokinins by *Azotobacter chroococcum*. *Plant Soil* 110: 149-152.
- McCully, M.E. y J.S. Boyer. 1997. The expansion of maize root-cap mucilage during hydration. 3: Changes in water potential and water content. *Physiol. Plant* 99: 169-177.
- Mulder, E.G. 1975. Physiology and ecology of free-living, nitrogen-fixing bacteria. pp. 3-28. In: Stewart, W.D.P. (ed.). *Nitrogen fixation by free-living micro-organisms*. International Biological Prog. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Nieto, K.F. y W.T. Frankenberger Jr. 1991. Influence of adenine, isopentyl alcohol and *Azotobacter chroococcum* on the vegetative growth of *Zea mays*. *Plant Soil* 135: 213-221.
- Núñez, C., S. Moreno, G. Soberón y G. Espín. 1999. The *Azotobacter vinelandii*: Response regulator AlgR is essential for cyst formation. *J. Bacteriol.* 181: 141-148.
- Palus, J.A., J. Borneman, P.W. Ludden y E.W. Triplett. 1996. A diazotrophic bacterial endophyte isolated from stems of *Zea mays* L. and *Zea luxurians* Iltis and Doebley. *Plant Soil* 186: 135-142.
- Pati, B.R., S. Sengupta y A.K. Chandra. 1995. Impact of selected phyllospheric diazotrophs on the growth of wheat seedlings and assay of the growth substances by the diazotrophs. *Microbiol. Res.* 150: 121-127.
- Pau, R.N., M.E. Eldridge, D.J. Lowe, L.A. Mitchenall y R.R. Eady. 1993. Molybdenum-independent nitrogenases of *Azotobacter vinelandii*: A functional species of alternative nitrogenase-3 isolated from a molybdenum-tolerant strain contains an iron-molybdenum cofactor. *J. Biochem.* 293: 101-107.
- Paul, E.A. y F.E. Clark. 1996. *Soil microbiology and biochemistry*. 2<sup>th</sup> ed. Academic Press. San Diego, CA.
- Paula, M.A., V.M. Reis y J. Döbereiner. 1991. Interactions of *Glomus clarum* with *Acetobacter diazotrophicus* in infection of sweet potato (*Ipomea batatas*), sugarcane (*Saccharum*), sweet sorghum (*Sorghum vulgare*). *Biol. Fertil. Soils* 11: 111-115.
- Pereira, M., R. Rolo, O. Rodríguez y V. Ávila. 1993. Selección de cepas de *Azospirillum* en gramíneas promisorias bajo condiciones de casa de cristal. *Pastos y Forrajes* 16: 251.
- Quesada, E., A. Ventosa, F. Rodríguez y A.C. Ramos. 1982. Types and properties of some bacteria isolated from hypersaline soils. *J. Appl. Bacteriol.* 53: 155-161.
- Ramos, J.L. y R.L. Robson. 1985. Lesions in citrate synthase that affect aerobic nitrogen fixation by *Azotobacter chroococcum*. *J. Bacteriol.* 162: 746-751.
- Read, D.B. y P.J. Gregory. 1997. Surface tension and viscosity of axenic maize and lupin mucilages. *New Phytologist* 137: 623-628.
- Read, D.B., P.J. Gregory y A.E. Bell. 1999. Physical properties of axenic maize root mucilage. *Plant Soil* 211: 87-91.
- Rengel, Z. 1997. Root exudation and microflora populations in rhizosphere of crop genotypes differing in tolerance to micronutrient deficiency. *Plant Soil* 196: 255-260.

- Reusch, R.N. y H.L. Sadoff. 1983. Novel lipid components of the *Azotobacter vinelandii* cyst membrane. *Nature* 302(17): 268-270.
- Robson, R.L., R.R. Eady, T.H. Richardson, R.W. Miller, M. Hawkins y J.R. Postgate. 1986. The alternative nitrogenase of *Azotobacter chroococcum* is a vanadium enzyme. *Nature* 322(24): 388-390.
- Rodríguez M., M.N. 1995. Microorganismos libres fijadores de nitrógeno. pp. 105-126. In: Ferrera-Cerrato R. y J. Pérez M. (eds.). *Agromicrobiología: Elemento útil en la agricultura sustentable*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Sala, O.E., W.J. Parton, L.A. Joyce y K. Lauenroth. 1988. Primary production of the central grassland regions of the United States. *Ecology* 69: 40-45.
- Schippers, B., A.W. Bakker y A.H.M. Bakker. 1987. Interactions of deleterious and beneficial rhizosphere microorganisms and the effect of cropping practices. *Ann. Rev. Phytopathol.* 25: 339-358.
- Seldin, L., R.A. Soares, D. Cruz, A. Nobrega, J.E. Dirk y E. Paiva. 1998. Comparison of *Paenibacillus azotofixans* strains isolated from rhizoplane, rhizosphere and non-root-associated soil from maize planted in two different Brazilian soils. *Appl. Environ. Microbiol.* 64(10): 3860-3868.
- Senior, P.J. y E.A. Dawes. 1973. The regulation of poly- $\beta$ -hydroxy butyrate metabolism in *Azotobacter beijerinckii*. *J. Biochem.* 134: 225-238.
- Smith, K.P. y R. Goodman. 1999. Host variation for interactions with beneficial plant-associated microbes. *Annu. Rev. Phytopathol.* 37: 473-491.
- Sprent, J.I. y S.M. D' Faria. 1988. Mechanisms of infection of plants by nitrogen fixing organisms. *Plant Soil* 110: 157-165.
- Tang, M. 1995. Efecto de la inoculación con *Azotobacter chroococcum* en la germinación y altura de las plántulas de dos leguminosas y dos gramíneas. *Pastos y Forrajes* 18: 145-150.
- Thorneley, R.N.F. y G.A. Ashby. 1989. Oxidation of nitrogenase iron protein by dioxygen without inactivation could contribute to high respiration rates of *Azotobacter* species and facilitate nitrogen fixation in other aerobic environments. *J. Biochem.* 261: 181-187.
- Triplett, E.W. 1996. Diazotrophic endophytes: Progress and prospects for nitrogen fixation in monocots. *Plant Soil* 186: 29-38.
- Utkhede, R.S., C.A. Koch y J.G. Menzies. 1999. Rhizobacterial growth and yield promotion of cucumber plants inoculated with *Pythium aphanidermatum*. *Can. J. Plant Pathol.* 21: 265-271.
- Vandenhove, H., R. Merckx, M. van Steenberghe y K. Vlassak. 1993. Microcalorimetric characterization, physiological stages and survival ability of *Azospirillum brasilense*. *Soil Biol. Biochem.* 25(4): 513-519.
- Van Peer, R., G.J. Niemann y B. Schippers. 1991. Induced resistance and phytoalexin accumulation in biological control of Fusarium wilt of carnation by *Pseudomonas* sp. strain WCS417r. *Phytopathology* 81: 728-734.
- Vlassak, K., E.A. Paul y R.E. Harris. 1973. Assessment of biological nitrogen fixation in grassland and associated sites. *Plant Soil* 38: 637-649.
- Wirén, N.V., V. Römheld, J.L. Morel, A. Guckert y H. Marschner. 1993. Influence of microorganisms on iron acquisition in maize. *Soil Biol. Biochem.* 25(3): 371-376.
- Wong, T.Y. y R.J. Maier. 1984. Hydrogen-oxidizing electron transport components in nitrogen-fixing *Azotobacter vinelandii*. *J. Bacteriology* 159: 348-352.
- Yang, Ch.H. y D.E. Crowley. 2000. Rhizosphere microbial community structure in relation to root location and plant iron nutritional status. *Applied Environ. Microbiol.* 66: 345-351.
- Zahran, H.H. 1999. Rhizobium-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. *Microbiol. Molecular Biol. Reviews* 63(4): 968-989.
- Zdor, R.E. y A.J. Anderson. 1992. Influence of root colonising bacteria on the defence responses of bean. *Plant Soil* 140: 99-107.
- Zhulin, I.B., V.A. Bespalov, M.S. Johnson y B.L. Taylor. 1996. Oxygen taxis and proton motive force in *Azospirillum brasilense*. *J. Bacteriology* 178 (17): 5199-5204.

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

Acevedo Sandoval, Otilio Arturo	Pachuca, Hidalgo, México
Adame Martínez, Salvador	Toluca, estado de México
Aguilar Ruiz, José	Granada, España
Castellanos Ramos, Javier Z.	Celaya, Guanajuato, México
Coras Merino, Pablo M.	Chapingo, estado de México
Chávez Aguilera, Noel	Chapingo, estado de México
Díaz Maldonado, Salvador	Ciudad Obregón, Sonora, México
Durán García, Héctor Martín	San Luis Potosí, San Luis Potosí, México
Exebio García, Adolfo A.	Montecillo, estado de México
Farías Larios, Javier	Tecomán, Colima, México
García Calderón, Norma E.	México, D.F.
García Mina Freire, Josemaría	Orcoyen Navarra, España
Gardezi, Abdul Khalil	Montecillo, estado de México
Hidalgo Moreno, Claudia	Montecillo, estado de México
Islas Gutiérrez, Fabián	Chapingo, estado de México
López Alcocer, Eduardo	Guadalajara, Jalisco, México
Martínez Ríos, Juan José	Ciudad Lerdo, Durango, México
Mesta Howard, Ana María	México, D.F.
Palacios Mayorga, Sergio	México, D.F.
Palacios Vélez, Oscar L.	Montecillo, estado de México
Robledo Santoyo, Edmundo	Chapingo, estado de México
Rodríguez Mendoza, Ma. Nieves	Montecillo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México
Soria Ruiz, Jesús	Zinacantepec, estado de México
Varcla Fregoso, Lucía	México, D.F.
Vázquez Alvarado, Rigoberto E.	San Nicolás de Hidalgo, Nuevo León, México

**Editores Técnicos de este número**  
**Technical Editors of this number**

Acevedo Sandoval, Otilio Arturo	Pachuca, Hidalgo, México
Adame Martínez, Salvador	Toluca, estado de México
Alvarado López, Jorge	Montecillo, estado de México
Corlay Chee, Langen	Chapingo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
López Alcocer, Eduardo	Guadalajara, Jalisco, México
Pineda Pineda, Joel	Chapingo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, 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)