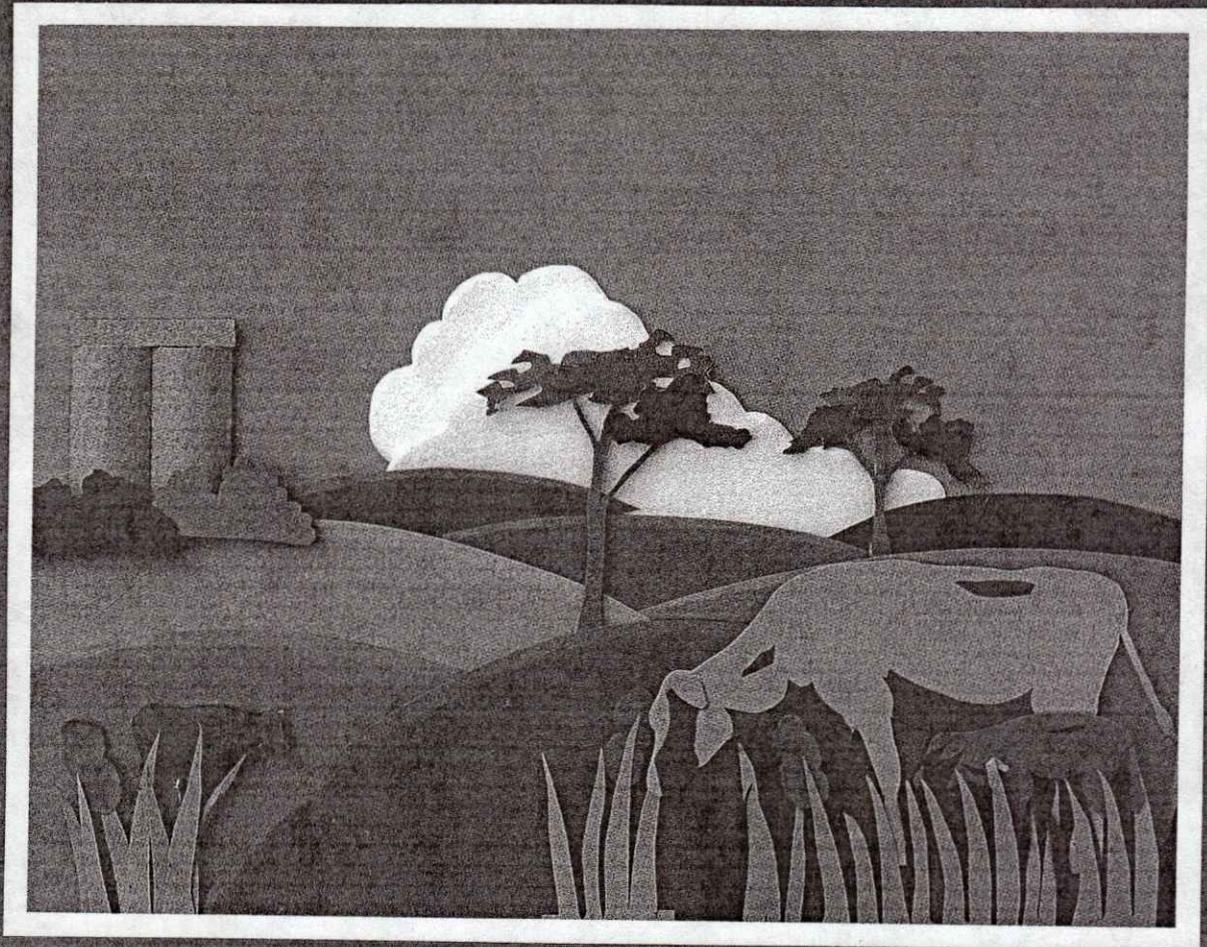


ISSN 0187 - 5779

TERRA

Latinoamericana

ENERO - MARZO DE 2005 • VOLUMEN 23 NÚMERO 1



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

TERRA

Latinoamericana

COMITE EDITORIAL

EDITOR	Dr. Antonio Vázquez Alarcón
EDITOR ADJUNTO	Dra. Carmen Gutiérrez Castorena
EDITORES TÉCNICOS	Dr. David Cristóbal Acevedo Dr. David Espinosa Victoria Dr. Manuel Sandoval Villa Dr. Mateo Vargas Hernández Dra. Carmen Gutiérrez Castorena Dra. Edna Álvarez Sánchez Dra. Ma. del Carmen González Chávez
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
Ma. de Lourdes Sánchez Arellano
Angelina Ponce Soriano
Ricarda Torres Estrada

Diseño de Portada	Gardenia Chávez Peña
Administrador de página web	Moisés Gómez Díaz

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

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

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

Dr. Alberto Hernández	Cuba
Dr. Anthony Fischer	Australia
Dr. Bernardo Van Raij	Brasil
Dr. Christian Prat	Francia
Dr. Daniel Buschiazzo E.	Argentina
Dr. Donald L. Suarez	E.U.A.
Dr. Elemer Bornemisza	Costa Rica
Dr. Eric S. Jensen	Dinamarca
Dr. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. Hari Eswaran	E.U.A.
Dr. Héctor J. M. Morrás	Argentina
Dr. John T. Moraghan	E.U.A.
Dr. Jorge A. Delgado	E.U.A.
Dr. José Aguilar Ruíz	España
Dr. José M. Hernández Moreno	España
Dr. José Rodríguez	Chile
Dr. Juan F. Gallardo Lancho	España
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Rafael Villegas Delgado	Cuba
Dr. Renato Grez Z.	Chile
Dr. Walter Luzio Leighton	Chile
Dr. Winfried E. H. Blum	Austria

TERRA

Latinoamericana

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 2005-2007

Presidente	Dr. José Antonio Cueto Wong
Vicepresidente	Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Secretario General	Dr. Ranferi Maldonado Torres
Tesorera	M.C. Langen Corlay Chee
Secretaria Técnica	M.C. Laura Bertha Reyes Sánchez
Secretario de Relaciones Internacionales	Dr. Enrique Salazar Sosa
Vocales	Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza Dra. Christina Siebe Grabach Dr. Ignacio Sánchez Cohen Dr. Rubén López Cervantes Dr. Rogelio Aldaco Nuncio

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.
Enero - Marzo de 2005 Volumen 23 Número 1
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

EDITORIAL COMMITTEE

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

EDITORIAL STAFF	Ina Aalmers de Aguilar Ma. de Lourdes Sánchez Arellano Angelina Ponce Soriano Ricarda Torres Estrada
Cover design	Gardenia Chávez Peña
Website administrator	Moisés Gómez Díaz

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Alberto Hernández	Cuba
Dr. Anthony Fischer	Australia
Dr. Bernardo Van Raij	Brasil
Dr. Christian Prat	Francia
Dr. Daniel Buschiazzo E.	Argentina
Dr. Donald L. Suarez	E.U.A.
Dr. Elemer Bornemisza	Costa Rica
Dr. Eric S. Jensen	Dinamarca
Dr. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. Hari Eswaran	E.U.A.
Dr. Héctor J. M. Morrás	Argentina
Dr. John T. Moraghan	E.U.A.
Dr. Jorge A. Delgado	E.U.A.
Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. José M. Hernández Moreno	España
Dr. José Rodríguez	Chile
Dr. Juan F. Gallardo Lancho	España
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Rafael Villegas Delgado	Cuba
Dr. Renato Grez Z.	Chile
Dr. Walter Luzzio Leighton	Chile
Dr. Winfried E. H. Blum	Austria

TERRA

Latinoamericana

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

President
Vicepresident
Secretary
Treasurer
Technical Adviser
International Relations
Voters

Dr. José Antonio Cueto Wong
Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Dr. Ranferi Maldonado Torres
M.C. Langen Corlay Chee
M.C. Laura Bertha Reyes Sánchez
Dr. Enrique Salazar Sosa
Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza
Dra. Christina Siebe Grabach
Dr. Ignacio Sánchez Cohen
Dr. Rubén López Cervantes
Dr. Rogelio Aldaco Nuncio

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
January - March, 2005 Volume 23 Num. 1

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

ENERO - MARZO DE 2005 • VOLUMEN 23 • NUMERO 1
JANUARY - MARCH, 2005 • VOLUME 23 • NUMBER 1

DIVISION I

- 1 Contribuciones de la Ciencia del Suelo a la investigación arqueológica: el caso de Teotihuacan.
Soil Science contributions to the archaeological research: Teotihuacan, the case study.
J. E. Gama-Castro, E. Solleiro-Rebolledo, E. McClung, J. L. Villalpando, S. Sedov, C. Jasso-Castañeda, S. Palacios-Mayorga y Daniel Hernández
- 13 Régimen de humedad y clasificación de suelos pomáceos del Valle Puebla-Tlaxcala.
Moisture regime and classification of pumiceous soils of Puebla-Tlaxcala Valley.
Miguel A. Segura-Castruita, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena, Carlos A. Ortiz-Solorio y Patricio Sánchez-Guzmán
- 21 Carbono orgánico de los suelos de México.
Organic carbon of Mexican soils.
Miguel A. Segura-Castruita, Patricio Sánchez-Guzmán, Carlos A. Ortiz-Solorio y Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena

ENSAYO / Essay

- 29 Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos.
Remediation of soils polluted with heavy metal using plants and rhizospheric microorganisms.
Ma. del Carmen Ángeles González-Chávez

DIVISION II

- 39 Concentración nutrimental en hojas de naranjo Valencia injertado en portainjertos de cítricos.
Nutrient concentration in leaves of Valencia orange grafted on citrus rootstocks.
Octavio Pérez-Zamora

TERRA

Latinoamericana

- 49 Crecimiento y estado nutrimental de plántulas de tomate en soluciones nutritivas con diferente concentración de calcio y potencial osmótico.
Growth and nutrient status of tomato seedlings in nutrient solutions with different calcium concentrations and osmotic potential.
O. G. Villegas-Torres, P. Sánchez-García, G. A. Baca-Castillo, M. N. Rodríguez-Mendoza, C. Trejo, M. Sandoval-Villa y E. Cárdenas-Soriano
- 57 Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca.
Carbon concentration in different vegetation types in the Northern Oaxaca Sierra.
C. Figueroa-Navarro, J. D. Etchevers-Barra, A. Velázquez-Martínez y M. Acosta-Mireles
- 65 Inoculación del trigo var. Pavón con *Azospirillum* spp. y *Azotobacter beijerinckii*.
Inoculation of wheat var. Pavon with *Azospirillum* spp. and *Azotobacter beijerinckii*.
M. M. García-González, R. Farías-Rodríguez, J. J. Peña-Cabriales y J. M. Sánchez-Yáñez
- 73 Fijación biológica de nitrógeno en una pradera de trébol hubba/ballico de corte o de pastoreo.
Biological nitrogen fixation in a cut or grazed hubba clover/ryegrass sward:
J. Delgadillo-Martínez, R. Ferrera-Cerrato, A. Galvis-Spínola, A. Hernández-Garay y M. A. Cobos-Peralta
- 81 Inhibición de *Fusarium oxysporum* por cepas mutantes de *Pseudomonas fluorescens* Zum80 incapaces de producir sideróforos.
Fusarium oxysporum inhibition by Zum80 *Pseudomonas fluorescens* mutant strains unable to produce siderophores.
Eduardo Valencia-Cantero, Javier Villegas-Moreno, Juan Manuel Sánchez-Yáñez, Juan José Peña-Cabriales y Rodolfo Farías-Rodríguez

TERRA

Latinoamericana

- 89 Influencia del aile (*Alnus firmifolia*) en el crecimiento de plantas de *Pinus patula*.

Influence of *Alnus firmifolia* on the growth of *Pinus patula* seedlings.
Berta Gutiérrez-Guzmán, Jorge D. Etchevers-Barra, Alejandro Velázquez-Martínez y Juan Almaraz-Suárez

- 97 Dinámica y cuantificación de grupos microbianos en compost y vermicompost de bagazo de agave tequilero.
Dynamics and quantification of microbial groups in compost and vermicompost of tequila agave bagasse.

R. Rodríguez-Macías, R. Quintero-Lizaola, G. Alcántar-González, V. Ordaz-Chaparro y V. Volke-Haller

NOTA DE INVESTIGACION / Research Note

- 105 Crecimiento de jitomate y calidad de frutos con diferentes concentraciones de nitrato.

Tomato growth and fruit quality under various nitrate levels.
Edilberto González-Raya, Adalberto Benavides-Mendoza, Homero Ramírez, Valentín Robledo-Torres, Ratikanta Maiti, Alfonso Reyes-López, Antonio Francisco Aguilera-Carbo, Laura Olivia Fuentes-Lara y Rosa Elia Margarita Henández- Valencia

DIVISION III

- 113 Análisis de frecuencias de lluvias máximas con fines de drenaje superficial local, Tabasco, México.

Analysis of frequencies of maximum rainfalls for local surface drainage, Tabasco, Mexico.
P. M. Coras-Merino, R. Arteaga-Ramírez y M. Vázquez-Peña

- 121 Productividad del espárrago en condiciones de riego y fertilización nitrogenada.

Asparagus productivity under irrigation and nitrogen fertilization.
J. A. Cristóbal Navarro-Ainza, Adán Fiambres-Fontes y Arturo López-Carvajal

TERRA

Latinoamericana

- 129 Respuesta de híbridos de maíz normales y de alta calidad de proteína a la fertilización química.
Response of common and high quality protein corn hybrids to chemical fertilization.

Artemio Palafox-Caballero, Oscar Hugo Tosquy-Valle, Mauro Sierra-Macías, Antonio Turrent-Fernández y Alejandro Espinosa-Calderón

- 137 Respuesta del papayo al riego y a la fertilización N-P-K en un Vertisol.
Response of papaya to irrigation and N-P-K fertilization in a Vertisol.
Adriana Mellado-Vázquez, Víctor Volke-Haller, Mario Tapia-Vargas, Prometeo Sánchez-García y Abel Quevedo-Nolasco

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

145

CONTRIBUCIONES DE LA CIENCIA DEL SUELO A LA INVESTIGACIÓN ARQUEOLÓGICA: EL CASO DE TEOTIHUACAN

Soil Science Contributions to the Archaeological Research: Teotihuacan, the Case Study

J.E. Gama-Castro^{1‡}, E. Solleiro-Rebolledo¹, E. McClung², J.L. Villalpando², S. Sedov¹,
C. Jasso-Castañeda¹, S. Palacios-Mayorga¹ y Daniel Hernández¹

RESUMEN

Con base en análisis selectos de las propiedades que conforman la memoria de los suelos de Teotihuacan, se pretende coadyuvar al conocimiento inherente a: (i) la dinámica ambiental ocurrida en el Valle de Teotihuacan desde el Pleistoceno Tardío al Reciente; (ii) el impacto humano generado sobre el área, durante el lapso de los primeros asentamientos teotihuacanos hasta los periodos Colonial y presente; y (iii) las causas probables que propiciaron, en 650 d.C., el abandono parcial de la ciudad. Los resultados obtenidos indican que la memoria de los suelos y paleosuelos estudiados registró lapsos de estabilidad-inestabilidad del paisaje que han ocurrido de modo eventual, desde hace aproximadamente 22 000 años a.P. (antes del presente). Dicha dinámica también se ha validado a través de estudios palinológicos en sedimentos lacustres y por el análisis de los fitolitos presentes en suelos. Durante el periodo teotihuacano, se estima que la creciente presión demográfica sobre la tierra, los cambios de uso del suelo, así como la destrucción sistemática de los recursos forestales del entorno para diferentes propósitos, provocaron una severa erosión acelerada y, probablemente, cambios en los regímenes de humedad y sequía. Cabe resaltar que los conocimientos multidisciplinarios hasta ahora generados, sólo facultan el establecimiento de hipótesis más sólidas sobre el ecosistema y rasgos socio-culturales que prevalecieron durante el estado teotihuacano, pero aún no solucionan la incógnita de su colapso. Empero, éstas proporcionan elementos

espaciales y multitemporales de relevancia considerable para comprender el problema.

Palabras clave: suelos y paleosuelos, memoria del suelo, abandono de Teotihuacan.

SUMMARY

Based on the analysis of selected soil properties considered indicators of soil memory in the Teotihuacan Valley, this research purports to contribute to the study of: i) environmental dynamics in the Teotihuacan Valley from the Late Pleistocene to the present; ii) human impact in the area during the period from the first settlements through the colonial period to the present; and iii) the probable causes of the partial abandonment of the prehispanic city around A.D. 650. Our results indicate that the memory of soils and paleosols record different periods of landscape stability/instability since approximately 22 000 years B.P. Regional dynamics are also reflected in palynological studies of lacustrine sediments and the analysis of phytoliths present in soils. During the period of Teotihuacan occupation, increased demographic pressure, subsequent changes in land-use and the systematic exploitation of forests may have stimulated severe erosion together with associated changes in humidity manifest in drier conditions. The evidence obtained thusfar through a multidisciplinary approach permits the development of hypotheses with respect to the ecosystem and sociocultural traits present during the period of dominance by the Teotihuacan state, but do not solve the mystery of its collapse. However, it provides spatial and multitemporal elements of considerable relevance to understanding the problem.

Index words: soils and paleosols, soil memory, Teotihuacan abandonment.

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México, D.F.

[‡]Autor responsable (jgama@geologia.unam.mx)

²Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México, D.F.

INTRODUCCION

Teotihuacan se localiza en el sector noroeste de la cuenca de México. Su desarrollo como área agrícola se inicia aproximadamente en 1100 a.C., con el establecimiento de las primeras comunidades en el valle. Su inicio como urbe se sitúa entre 1 y 650 d.C., siendo su máximo florecimiento entre 350 y 550 d.C. (Millon, 1970). En la actualidad, se estima que la declinación del estado teotihuacano debió iniciarse y culminar entre 600 y 650 d.C., tiempo en el cual su influencia política, religiosa y económica cesa y la ciudad es parcialmente destruida y abandonada. La razón de dicho colapso se ha atribuido a varias causas, entre ellas se incluyen cambio climático global, mega-sequías y degradación de los recursos ambientales. Sin embargo, hasta ahora existen muy escasas pruebas que soporten esas hipótesis.

En la actualidad, se considera que una opción viable, que puede aportar evidencias confiables al respecto, es el análisis y la interpretación de los suelos y paleosuelos (Macphail, 1986; Holliday, 1989; Solleiro *et al.*, 2002). Esto, debido a que en su memoria pedológica reflejan tanto el ambiente del paisaje natural y cultural que prevaleció en el sitio, como el paso del tiempo (Targulian y Sokoloba, 1996). Dicha memoria está representada por las propiedades más perdurables del suelo. Sin embargo, el World Reference Base for Soil Resources (FAO-ISRIC-ISSS, 1994) señala que el comportamiento dinámico de algunas características edáficas, consideradas como variables a través del tiempo (e.g., materia orgánica, estructura, límite entre horizontes) también permiten inferir datos importantes sobre los procesos que afectaron a los suelos en el pasado.

Para el caso de Teotihuacan, el análisis y la interpretación sobre la distribución, variabilidad espacial y memoria de los suelos y paleosuelos presentes resultan importantes, ya que ellos son marcadores estratigráficos, así como indicadores confiables de edad y paleoambiente (Macphail *et al.*, 1990; Bronger *et al.*, 1998).

A través del trabajo de campo y laboratorio, efectuados en el lapso de 1992 a 1999, se colectaron y se analizaron diversas muestras de 33 perfiles pedoestratigráficos típicos del área de estudio. Para la elaboración de este artículo, se seleccionaron tres perfiles pedoestratigráficos los cuales, con base en sus fechamientos realizados por ^{14}C , se consideran como ilustrativos de los ambientes y procesos ocurridos,

tanto durante el Pleistoceno tardío-Holoceno, como en los periodos teotihuacano (Inicial, Epiclásico y Clásico) y moderno (Periodo Post-Clásico y colonial moderno). Los resultados obtenidos potencialmente pueden contribuir a la reconstrucción de las condiciones y dinámica ambientales prehistóricas que caracterizaron el valle de Teotihuacan, así como a la evaluación del impacto antropogénico y sus consecuencias sobre el medio, durante los últimos 3100 años.

MATERIALES Y MÉTODOS

Delimitación y Caracterización del Área de Estudio

Con base en trabajos preliminares realizados en campo (CETENAL, 1975) se propuso y, posteriormente, se delimitó un área geográfica de 180 km² (Figura 1), la cual representa una importante zona para realizar diversas investigaciones antropológicas y ambientales relacionadas con la cultura Teotihuacana. El área se localiza aproximadamente a 50 km al NE de la ciudad de México, a una altitud que oscila entre 2250 y 3050 m.

Geomorfológicamente está conformada por una altiplanicie extensa, escalonada y desmembrada por volcanes aislados y cadenas montañosas. Las rocas volcánicas más antiguas son andesitas y dacitas del Plioceno temprano y basaltos del Plioceno Tardío. El clima actual varía con la altitud, de semiárido a subhúmedo en las toposformas más altas. En general, se presenta una temperatura promedio anual de 14.9 °C y una precipitación anual de 563.3 mm (García, 1988). La vegetación, según lo señala Rzedowski (1957), está muy alterada por la acción antrópica que se inició desde hace varios milenios de años. Esta gradual deforestación ha propiciado que, en la actualidad, sólo existan algunas comunidades vegetales relictos. Un ejemplo es el bosque de encino que aún subsiste en la cima del Cerro Gordo (Figura 1). De acuerdo con fotografías aéreas, la vegetación se distribuye en cuatro zonas principales: (1) zona forestal, localizada en las montañas que circundan al valle, en general situada a > 2600 m de altitud; (2) zona de matorral xerófilo, situada abajo de 2600 hasta 2300 m; (3) zona de pastizales de crecimiento secundario, localizada entre < 2300 y 2250 m; y (4) zona de vegetación halófila, situada abajo de 2250 m de altitud.

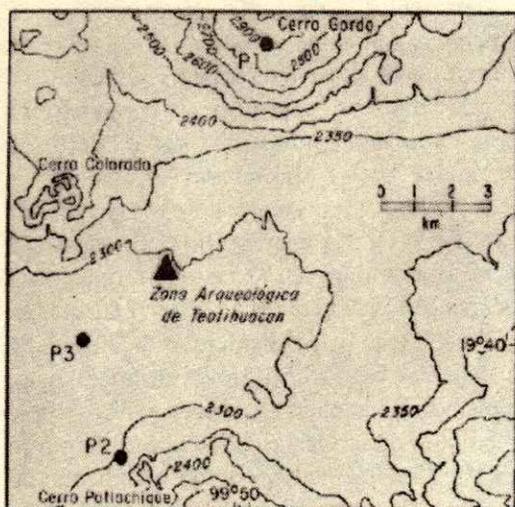


Figura 1. Localización del área de estudio y de los perfiles P-1, P-2 y P-3.

El uso actual del suelo está representado por el uso urbano y por la agricultura de temporal, donde el nopal, el maíz y cultivos asociados, como el frijol y la calabaza, son predominantes. De acuerdo con CETENAL (1975), los suelos más comunes en esta área son: Fluvisoles, Phaeozems, Cambisoles, Leptosoles y Vertisoles. Probablemente, la erosión hídrica es la forma más activa de degradación de los suelos presentes en el área de estudio.

Trabajo de Gabinete y Campo

La geomorfología del área y la distribución y variabilidad espacial de los suelos y paleosuelos en las

topoformas se registraron con base en la interpretación de fotografías aéreas, escala 1:25 000, y el análisis de imágenes Spot Hevi-1. Los datos obtenidos, a través de estas fuentes, se ratificaron o rectificaron en campo. La descripción y el muestreo de los suelos y paleosuelos incluidos en los perfiles pedoestratigráficos seleccionados, así como su clasificación, se hicieron con base en el Soil Survey Manual 18 (USDA, 1992) y la World Reference Base (FAO-ISRIC-ISSS, 1998), respectivamente. Algunas de las principales características de estación (sitio) que muestran los perfiles seleccionados (Figura 1) se presentan en Cuadro 1.

Cuadro 1. Perfiles seleccionados y propiedades de sitio.

Perfil	Sitio	Localización geográfica	Geoforma	Altitud	Pendiente	Orientación	Litología	Uso actual
				m	%			
P - 1	Cerro Gordo	19°44'47''N 98°49'15''O	Ladera inclinada	2900	7.0	203°SSO	Basalto - Andesita	Forestal (En-Pi) [†]
P - 2	Sierra Patlachique	19°39'30''N 98°50'26''O	Piedemonte	2304	14.5	180°S	Aluvión vulcanogénico [†]	Agricultura de temporal
P - 3	San Lorenzo	19°40'25''N 98°52'10''O	Plano aluvial	2267	< 1.0	260°OSO	Aluvión	Agricultura de riego y temporal

[†] Este término ha sido propuesto por FAO-ISRIC-ISSS(1994) para referirse a una mezcla de material aluvial, piroclásticos re trabajados por el agua, líticos, y detritos provenientes de varias fuentes. En esta mezcla, los piroclásticos son dominantes en su porcentaje.

[†] El término (En-Pi) se refiere a una asociación de encinos y pinos.

Análisis de Campo y Laboratorio

Las muestras colectadas se analizaron en campo, así como en laboratorio. Los análisis realizados incluyeron: (1) contraste y forma del límite entre horizontes; (2) estructura de agregados: forma, tamaño y desarrollo; (3) clase textural; (4) porcentaje de arcilla; (5) porcentaje de materia orgánica (MO); (6) capacidad de intercambio catiónica (CIC); y (7) rasgos micromorfológicos.

Los porcentajes de arcilla y MO, así como los valores de CIC se determinaron con base en los criterios establecidos por USDA (1990). Las láminas delgadas empleadas en este estudio se prepararon a partir de muestras no alteradas de suelo, cuyo tamaño aproximado fue de 15 x 8 x 8 cm. Estas muestras se impregnaron con resina Cristal MC-40, se cortaron y se pulieron en secciones de 76 x 52 mm y, posteriormente, se estudiaron en un microscopio petrográfico. Su descripción se hizo con base en Bullock *et al.* (1985). La designación de los horizontes del suelo se basó en sus características macro y micromorfológicas. Finalmente, las muestras se enviaron para su fechamiento por ^{14}C a los laboratorios BETA Analytic de Miami, Florida. Todos los datos de fechamiento se obtuvieron a partir de la MO presente en los suelos y paleosuelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución y Variabilidad Espacial de los Suelos

La integración de los datos pedológicos y ambientales permitió interpretar que la distribución y variabilidad de los suelos y paleosuelos están condicionadas significativamente por el relieve local y que, tanto los suelos, como los paleosuelos presentan una dinámica pedológica-geomorfológica similar a la del modelo propuesto por Conacher y Dalrymple (1977). Esto implica que su desarrollo y evolución estuvieron, y aún están, condicionados, en gran parte, por la posición que ocupan en el perfil de la pendiente. Este factor topográfico influye sobre los demás factores formadores del suelo, propiciando una zonación vertical del clima (García, 1988) y de la vegetación. También se observó y se interpretó que las variaciones en morfometría producen cambios en la dinámica del agua superficial y subsuperficial, en el movimiento de materiales, y en la distribución de ellos en la pendiente. Al respecto, la fotointerpretación realizada evidenció que el modelo

de la distribución y variabilidad de los suelos y paleosuelos presentes en el toposistema es aproximadamente el siguiente:

Las cimas, pendientes ligeramente convexas y piedemontes de algunas topoformas como Cerro Gordo y Cerro Patlachique muestran, pese a la erosión ocurrida en ellas, varios horizontes de suelos y paleosuelos decapitados y, en ocasiones, sepultados (Cuadro 1, Perfil P-1). La asociación de Luvisoles y Cambisoles resulta común en estas geoformas. Sin embargo, es posible visualizar que, a medida que se incrementa la pendiente y se disminuye la altitud, la distribución espacial de los Luvisoles decrece. Esto, de acuerdo con el modelo de Conacher y Dalrymple (1977), es resultado de la inestabilidad generada por la interacción entre los elementos de la pendiente, la pedogénesis y los procesos de modelación del paisaje (c.g., erosión-aluvionamiento-coluvionamiento). En general, la profundidad de los suelos presentes en los piedemontes casi siempre está limitada por tepetates (Cuadro 1, P-2). Al respecto, los análisis micromorfológicos, realizados por McClung *et al.* (2003), sugieren que varios de esos tepetates se han formado a partir de la hidroconsolidación de tobas. Algunos tepetates se han secundariamente recarbonatado, probablemente por efecto del agua de escorrentía y de la colización.

En pendientes pronunciadas (laderas con pendientes de 25 a < 45%), donde la erosión, el escurrimiento y el movimiento de masa son intensos, los suelos que se formaron *in situ* están total o severamente erosionados. En general, en esta posición topográfica sólo se presentan algunos coluviones y aluviones modernos [< 400 años a.P. (antes del presente)] con un desarrollo pedológico casi nulo o incipiente. En estos materiales, se llegan a formar algunos horizontes de tipo A mólico o A ócrico (Leptosoles esqueléticos, mólicos y eútricos-Regosoles eútricos, téfricos y antrópicos (FAO-ISRIC-ISSS, 1998).

En la base de estas laderas y próximo a la llanura aluvial, es posible observar, en campo y en las fotografías aéreas, la presencia de suelos antrópicos que constituyeron terrazas y chinampas de edad Precolombina. Algunas de esas estructuras aún muestran uso agrícola, pero en su mayoría han sido destruidas o sepultadas por materiales coluvio-aluviales generados por la erosión. Un fechamiento, recientemente reportado por McClung *et al.* (2003) con respecto al horizonte A de un suelo de chinampa, reveló una edad de 2360 años \pm 100 a.P., lo que lo

situó dentro del periodo teotihuacano, antes de su apogeo como urbe.

El plano aluvial (2250 a 2350 m de altitud) se caracteriza por presentar un número significativo de suelos modernos, cuyas fechamientos oscilan entre 300 a 950 años a.P. (antes del presente) (McClung *et al.*, 2003). Los suelos más jóvenes muestran propiedades flúvicas y, en varios casos, aún manifiestan la presencia de procesos recientes de erosión y de acumulación que les confiere su característica estratificación. En general, su desarrollo pedológico varía de casi nulo a moderado, este último evidenciado por la presencia de horizontes A ágricos o mólicos y horizontes B cámbicos con desarrollo incipiente.

De acuerdo con las observaciones de campo, los suelos más comunes en esta área son: Fluvisoles (eútricos, mólicos, ándicos y vérticos), así como Cambisoles (flúvicos, eútricos, mólicos y vérticos), Phaeozems (háplicos, vérticos y stágnicos), Vertisoles (háplicos y sálicos) y Anthrosoles (cumúlicos e irrágricos). Subyaciendo a estos suelos modernos, es posible encontrar una serie de suelos de edad teotihuacana, así como paleosuelos. En varias ocasiones, también se detectó la presencia de tepetates en contacto discordante con los paleosuelos.

Finalmente, fue posible observar, en las áreas con relieve negativo, la presencia de suelos salinos y sódicos [Solonetz sálico, mólico y stágnico (FAO-ISRIC-ISSS, 1998)]. Algunos de esos suelos muestran, además, propiedades gleyicas, nátricas y fases inúndicas.

Propiedades y Procesos Distintivos de los Perfiles Estudiados

Los suelos y paleosuelos, presentes en la matriz de los perfiles seleccionados, se desarrollaron tanto por la alteración *in situ* de rocas ígneas, como por el intemperismo de materiales aluviales y coluvio-aluviales generados por la dinámica geomorfológica de la zona. Los análisis mineralógicos y micromorfológicos de estos perfiles, realizados por McClung *et al.* (2003), indican que los suelos y paleosuelos son ricos en minerales volcánicos de naturaleza básica e intermedia. En general, su fracción de arena fina y muy fina está constituida principalmente por piroxenos, anfíboles, plagioclasas cálcicas, vidrio, minerales opacos y cuarzo, mezclados con fragmentos líticos y materiales orgánicos en diferentes proporciones. Los minerales que

constituyen la fracción arcilla permiten establecer una clara diferenciación entre los suelos y los paleosuelos. Así, la haloisita es predominante en los suelos de edad teotihuacana y reciente, en tanto que la caolinita domina en todos los paleosuelos. Esta particularidad sugiere un cambio en las condiciones de humedad ambiental, donde la formación de caolinita representa la fase más húmeda.

El estudio de campo también reveló que los perfiles están constituidos por una compleja superposición de ciclos pedológicos (Cuadro 2). En general, los perfiles incluyen en su matriz: suelos modernos (SM); suelos de edad teotihuacana (ST); paleosuelos del Holoceno (PSh); así como paleosuelos formados en el Pleistoceno Tardío (PSP). Dicho arreglo es resultado de diversos y reiterados procesos geo-dinámicos de erosión-cumulización-estabilidad que se presentaron en el área. Con base en Jasso *et al.* (2002), es posible conceptuar que la intensidad y duración de estos procesos generaron diferencias muy contrastantes en el tipo y grado de horizontalización alcanzado en cada ciclo pedológico. Por ejemplo, en P-1 (Cuadro 2) es posible reconocer, dentro de los primeros 163 cm de profundidad del perfil, cuatro ciclos de formación de suelo. En este perfil, la capa superficial (Ah) es de edad reciente (SM) y sepulta a un horizonte 2Ah de color rojo (5YR 3/3), formado en el Holoceno (PSh). Dicho horizonte, a su vez, sobreyace a dos paleosuelos truncados, de coloración similar (3Bt y 4Bt/4BC/4C) y de edad pleistocénica (PSP) los cuales aún muestran vestigios de horizontes árgicos (Bt). De modo característico, en estos horizontes Bt se destaca en su matriz un moteado fino con cromas menores que 2, así como la presencia de películas y concreciones de manganeso. Estas características permiten inferir que esos paleosuelos estuvieron sujetos a condiciones de saturación de humedad estacional o bajo condiciones de sitio más húmedas.

Como puede observarse en el Cuadro 2, los perfiles P-2 y P-3 están constituidos cada uno por tres ciclos pedológicos que incluyen un SM, un ST, un PSh, así como un paleosuelo aún no fechado (P-3). En todos ellos, predominan los colores con brillo e intensidad menores que 10YR 3/3. Esto, probablemente, como resultado de una homogeneización de los perfiles, debida a la evidente bioturbación que muestran. Los paleosuelos presentes son similares a Luvisoles háplicos (FAO-ISRIC-ISSS, 1998) y se formaron, cada uno, a partir de aluviones vulcanogénicos.

Con respecto a estos perfiles, los análisis de campo y laboratorio realizados muestran que cada ciclo pedológico, que se presenta en P-1, P-2 y P-3, está evidenciado por discontinuidades de diferente naturaleza, las cuales, comúnmente, llegan a constituir pedocomplejos. Dichas discontinuidades se reflejan e identifican por: (i) grados evolutivos de los suelos y/o

de los horizontes; (ii) límites entre los suelos y/o horizontes caracterizados por una topografía plana u ondulada y un contraste abrupto; (iii) propiedades físicas contrastantes entre las que destacan las diversas formas, el tamaño y el desarrollo de los agregados estructurales formados en los diferentes ciclos, así como cambios claros, en ocasiones

Cuadro 2. Características morfológicas, físicas y químicas que aportan información a la memoria del suelo.

Perfil 1. Cerro Gordo

Profundidad	Horizonte [†]	Límite [‡]	Estructura [§]	Clase textura [¶]	Arcilla	Materia orgánica	CIC [#]	Edad ¹⁴ C Años a.P.	PR ^{††}
cm					----- % -----		cmol(+) kg ⁻¹		
0 a 30	Ah	V - S	L	Ma	25	1.40	33.0	390±70	SM
30 a 50	2Ah	V - W	Bsa, F - 2	Ma	19	0.82	26.5	5250±70	PS
50 a 90	3Bt	A - S	Ba, M - 2	Mra	32	0.57	25.0	18740±150	PS
90 a 143	4Bt	G - W1	Ba, G - 3	Mra	39	0.80	23.7	22670±290	PS
143 a 163	4BC	G - W1	Ba, M - 2	Mra	40	0.51	33.0	nd	PS
163	4C	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	PS

Perfil 2. Sierra Patlachique

Profundidad	Horizonte	Límite	Estructura	Clase textura	Arcilla	Materia orgánica	CIC	Edad ¹⁴ C	PR
cm					----- % -----		cmol(+) kg ⁻¹		
0 a 26	Ap	V - S	Bsa, F - 2	Ma	28	1.49	15.5	380±70	SM
26 a 36/48	2AB	D - W	Bsa, M - 2	Mra	34	1.07	18.5	2370±70	ST
36/48 a 66	2Bt	C - S	Ba, M - 3	Mra	42	1.20	24.0	nd	ST
66 a 125	3Bt	G - W1	Ba, G - 3	Mra	42	0.20	34.5	4790±130	PS
125	3C	nd	Ba, M - 1	nd	nd	nd	nd	nd	PS

Perfil 3. San Lorenzo

Profundidad	Horizonte	Límite	Estructura	Clase textura	Arcilla	Materia orgánica	CIC	Edad ¹⁴ C	PR
cm					----- % -----		cmol(+) kg ⁻¹		
0 a 34	Ap	D - W1	Bsa,	Mra	36	1.80	25.8	nd	SM
34 a 47	AB	C - W1	Bsa	Mra	34	1.00	19.0	670±70	SM
47 a 86	2AB	G - W1	Ba, M - 2	Mra	44	0.80	23.8	nd	ST
86 a 132	2Bt	D - W1	Ba, M - 3	Mra	40	0.60	22.0	2290±90	ST
132 a 154	2Ah	C - S	Ba, M - 2	Mra	38	1.07	27.0	2130±70	ST
154 a 212	3Bt1	G - W1	Ba, G - 2	Ra	44	1.37	28.5	nd	PS
212 a 266	3Bt21	G - W1	Ba, G - 3	Ra	50	1.20	29.0	nd	PS
266 a 291	3Bt22	G - W1	Ba, G - 3	Ra	50	1.20	31.0	nd	PS
291	3BC	nd	Ba, M - 2	Ra	42	0.20	24.0	nd	PS

Las características distintivas de los suelos se denominaron con base en USDA-SSDS (1992):

[†] Los prefijos numéricos que anteceden a los horizontes, son usados para denotar discontinuidades.

[‡] Límite entre horizontes. Transición: V = muy abrupto, A = abrupto, C = claro, G = gradual y D = difuso. Topografía: S = plano, W1 = ligeramente ondulado, W = ondulado.

[§] Forma: L = sin estructura, Ba = bloques angulares y Bsa = bloques subangulares. Tamaño: F = fino, M = medio y G = grueso. Desarrollo: 1 = Débil, 2 = moderado y 3 = fuerte.

[¶] Ma = migajón arenoso, Mra = migajón arcillo arenoso y Ra = arcilla arenosa.

[#] CIC = capacidad de intercambio catiónico.

^{††} PR = periodo. SM = suelo moderno, ST = suelo contemporáneo con la cultura teotihuacana y PS = palcosuelo (Pleistoceno Tardío-Holoceno Medio). nd = no determinado(a).

abruptos, de textura y porcentaje de arcilla; (iv) propiedades químicas que, de modo particular, resultan evidentes por la distribución irregular de los porcentajes de MO y valores de CIC en el perfil; y (v) diferencias significativas en la edad absoluta de los suelos y/o horizontes (Cuadro 2).

Esas discontinuidades, de acuerdo con Seymour y Balluff (1989), siempre resultan de procesos ambientales catastróficos. Dichos procesos son originados de forma natural (e.g., volcanismo, inundaciones y movimientos de masa) e inducidos por el hombre (e.g., erosión acelerada).

Dinámica Paleo y Neoambiental en el Valle de Teotihuacan

Con base en los resultados generados, así como los obtenidos de diversas fuentes de investigación relacionadas con la temática, fue posible interpretar y establecer, teóricamente, las siguientes consideraciones paleoambientales y ambientales:

Periodo Pleistoceno tardío-Holoceno. El Cuadro 2 muestra que los PSh y PSp, en el perfil P-1, se caracterizan por presentar horizontes Bt (árgico), cuya naturaleza mineralógica es predominantemente caolinítica. La presencia de horizontes Bt de tipo caolinítico en estos paleosuelos puede ser indicativa, según el criterio de USDA (1988) de un ciclo largo de estabilidad del paisaje, frecuentemente asociado con un ambiente forestal. En este caso, dicho periodo de estabilidad ocurrió aproximadamente durante el lapso de 22 000 a 18 000 años a.P. La presencia de un horizonte Bt también denota la existencia de un ambiente probablemente más húmedo que el actual. En el caso del horizonte 4Bt, éste está caracterizado por periodos alternantes de sequía y saturación estacional. Estas condiciones están evidenciadas en el horizonte por la intensa eluviación-iluviación de arcilla lixiviada que muestra, así como por la presencia de rasgos paleopedológicos, asociados con el hidromorfismo (e.g., moteado y concreciones de manganeso). Dichas condiciones permitieron el intemperismo y la transformación compleja de los minerales primarios en arcilla, además de su transporte y acumulación en el perfil.

Esta hipótesis sobre las condiciones ambientales es reforzada por las investigaciones realizadas por Lozano-García y Xelhuantzi-López (1997) en el ex Lago de Texcoco. Ambos investigadores encontraron en sedimentos del lago, fechados entre 25 000 y 15 000 años a.P., la dominancia de polen de

pino asociado con cantidades pequeñas de polen de encino y *Tsuga*. Dichos investigadores interpretaron esto como un exponente de un clima subhúmedo frío, con periodos alternantes de sequía.

Periodo Holoceno temprano-Holoceno medio. Con respecto a los PSh (Cuadro 2, P-2 y P-3), la existencia de horizontes Bt en ellos resulta de modo similar a lo señalado para los PSp (P-1), un probable indicativo de un clima húmedo. Al respecto, existen algunas otras evidencias que pretenden señalar diferencias claras entre los ambientes del Pleistoceno Tardío y el Holoceno. De acuerdo con McClung *et al.* (2003), la presencia en PSh de horizontes Bt, así como la ausencia total en esos horizontes árgicos de fitolitos, con excepción de los de la subfamilia Panicoideae, puede interpretarse como diagnóstica de condiciones húmedas y cálidas. La presencia de carbonatos, aún no fechados, sobre las películas arcillosas presentes en los horizontes Bt (Figura 2) sugiere la existencia, eventual, de fases secas durante el Holoceno Medio. Sin embargo, en la actualidad no se cuenta con ningún tipo de análisis que permita correlacionar y validar esta última hipótesis.

Periodo Holoceno tardío-Clásico Teotihuacano. Los ST sólo se detectaron en P-2 y P-3 (Cuadro 2). Algunos de ellos aún conservan sus horizontes Bt, los cuales, no obstante que muestran un desarrollo pedológico menor que el que caracteriza a los Bt formados en Periodos precedentes, también son indicativos de un clima húmedo. Su menor desarrollo indica una menor duración de la estabilidad del paisaje donde se formaron. Esta menor estabilidad del paisaje probablemente se debió tanto a eventos catastróficos naturales (Volcanismo), como inducidos por causas antrópicas. Al respecto, Caballero-Miranda *et al.* (1999) documentaron que el aumento que se suscitó hace menos de 3300 años a.P. en los niveles de los lagos de Texcoco, Chalco y Tecocomulco, así como la reducción de la vegetación arbórea en esas áreas tuvieron un origen antropogénico.

Por otra parte, de acuerdo con McClung *et al.* (2003), las tasas de intemperismo climático que probablemente se presentaron entre 3000 y 1950 años a.P. no fueron limitativas para el buen desarrollo de horizontes Bt. Estos autores consideran que la presencia en los ST de macrorestos vegetales asociados a condiciones de alta humedad (e.g., Equisitaceae, Cyperaceae, *Populus* y posiblemente *Alnus*), así como la alternancia de fitolitos de la subfamilia Pooideae (Poáceas), encontrada en los ST, reflejan la presencia de un clima cálido y

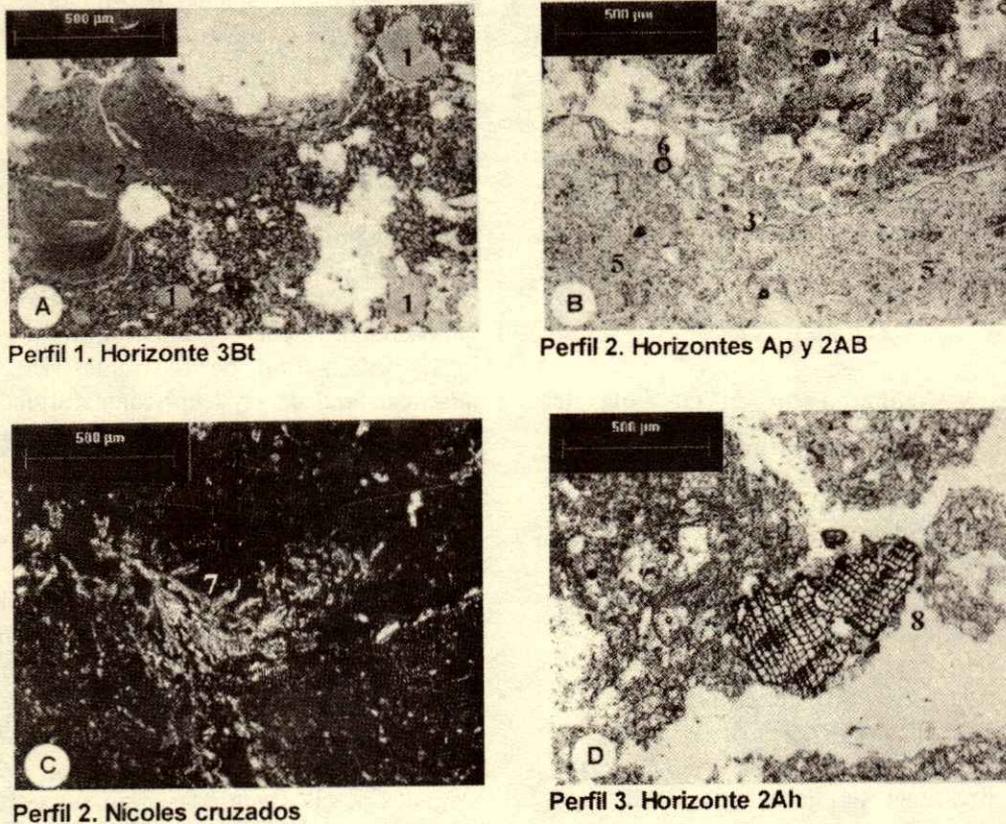


Figura 2. Rasgos micromorfológicos de los perfiles teotihuacanos.

húmedo, pero con fluctuaciones considerables en temperatura.

Periodo Moderno. Los trabajos realizados por O'Hara y Metcalfe (1995), acerca de la reconstrucción del clima que prevaleció en el centro de México durante los últimos 600 años, muestran que las condiciones ambientales dominantes eran muy similares a las actuales. Asimismo, dichos autores no encontraron evidencias de una megasequía que, según García (1974), debió presentarse alrededor de 700 a 750 d.C. y que se consideró como una causa de la declinación de la cultura teotihuacana.

Geoturbación y Antropopedoturbación en el Valle de Teotihuacan

Todos los perfiles colectados muestran síntomas claros de erosión hídrica, tanto de origen geológico, como inducida. Los datos disponibles al respecto indican que la erosión geológica resultó en particular intensa durante el Pleistoceno Tardío-Holoceno Medio (± 5000 años a.P.) y que disminuyó su

magnitud durante el periodo teotihuacano (McClung *et al.*, 2003). Al respecto, Heine (2003) consideró que la erosión acelerada en el centro de México se inicia desde hace 3500 años, incrementándose a partir del Siglo 16, en especial en 1900 d.C. Este autor también consideró que, en los últimos 3500 años, las condiciones climáticas en el centro de México no tuvieron un efecto directo en la erosión acelerada de los suelos. Dicha erosión fue resultado de cambios en el uso del suelo.

Aunque es un tema muy controvertido, las evidencias, hasta ahora obtenidas en el área de estudio, parecen favorecer la hipótesis de Heine (2003). Basta considerar que durante casi 1000 años que subsistió el imperio teotihuacano debieron efectuarse, periódicamente, cambios en el uso del suelo, así como en el manejo de los recursos asociados a él. Es evidente que estos cambios y manejo, algunos favorables y otros desfavorables para el ambiente, siempre estuvieron relacionados con procesos políticos cíclicos. Por ejemplo, se han encontrado, en el interior de las pirámides de la Luna y del Sol,

enormes volúmenes de suelo agrícola que se emplearon en la construcción de taludes y rellenos para sepultar antiguas estructuras y edificar otras sobre ellas. Esto, con la finalidad de mostrar la supremacía del nuevo gobierno con relación al anterior. Asimismo, la práctica de la tala, efectuada en diversos periodos teotihuacanos, queda demostrada por la gran cantidad de madera de encino y pino utilizada, respectivamente, como carbón para preparar la cal o como vigas de soporte en las construcciones. El estudio realizado por Barba (1995) indica que en las primeras fases de la ocupación teotihuacana se utilizaron entre 30 000 a 65 000 t año⁻¹ madera para esos fines. Estos valores se incrementaron a 70 000 y 80 000 t año⁻¹ en las dos últimas fases de ocupación. También resulta obvia, la intensa transformación antropogénica a que se sometió el paisaje teotihuacano debido, principalmente, a diversas obras de ingeniería hidráulica y minería (bancos de préstamo de materiales) que se realizaron de modo multitemporal.

La agricultura fue otro factor importante que influyó en el equilibrio ambiental de Teotihuacan. La presencia de rasgos relictos macro y micromorfológicos en los epipedones de los suelos teotihuacanos, como son: crotovinas, biocanales, coprolitos, fitolitos y restos de exoesqueletos, así como el transporte de materiales finos del suelo a cortas distancias, la destrucción parcial de la estratificación, y la presencia de restos materiales vegetales con diferentes grados de descomposición son indicativas de una dinámica significativa de biopedoturbación.

La antropopedoturbación, ocurrida en estos suelos, está representada a escala micromorfológica, por la migración de suspensiones heterogéneas que, según Jongerius (1970), Macphail (1986), Macphail *et al.* (1990) y Usai (2001), son distintivos de un suelo agrícola bien agregado como resultado de un buen manejo. En la Figura 2, se muestran algunos rasgos micromorfológicos que caracterizan los procesos ocurridos en los suelos estudiados.

La fotomicrografía A ilustra la presencia de dos tipos de generaciones de películas arcillosas presentes en el horizonte 3Bt del Perfil 1 (Cerro Gordo). La película fragmentada (1) e incorporada a la matriz del paleosuelo es la más antigua. Se trata de una película pura de arcilla, con alto grado de orientación, y formada por un proceso de iluviación lento, típico de zonas forestales húmedas. Su fragmentación y posterior distribución en distintas áreas del horizonte

árgico resultan indicativas de una perturbación ocurrida en el horizonte Bt. También se observa la presencia de películas arcillosas *in situ*, próximas a poros (2). Estas películas representan una fase de iluviación más joven y, de modo contrario a las películas fragmentadas, éstas están constituidas por materiales heterogéneos. Entre ellos destacan arcilla, humus y limo fino. Su presencia es diagnóstica de una iluviación rápida de partículas, lo que ocurre frecuentemente como resultado de la perturbación del horizonte superior. De acuerdo con Macphail (1986), este tipo de película, denominada por Bullock *et al.* (1985) como agrocután, resulta por efecto de la deforestación del suelo y su cultivo posterior. La presencia de estas películas es diagnóstica de los horizontes árgicos (Soil Survey Staff, 1998).

La fotomicrografía B (Perfil 2, Sierra Patlachique) muestra el límite entre los horizontes Ap de un suelo moderno (3) y el horizonte 2AB de un suelo del periodo teotihuacano (4). Según se observa, se trata de un límite abrupto y ligeramente ondulado (5) evidenciado por un cambio notable en las estructuras de los horizontes (Cuadro 2) lo cual, en general, indica una discontinuidad. También es evidente la presencia de películas arcillosas delgadas sobre la cara superior de los pedos (6) que constituyen el horizonte 2AB. Estas películas están recubiertas por carbonatos recristalizados (7) los cuales son muy evidentes en la fotomicrografía C, obtenida con nicoles cruzados. No obstante que aún se desconocen el origen y la edad de estos carbonatos, potencialmente podrían ser asociados con un periodo de sequía. Una situación análoga se ha encontrado en un suelo de edad similar, pero localizado en el estado de Tlaxcala. En este caso, el fechamiento de los carbonatos, depositados sobre las películas arcillosas, registró una edad de 1310 ± 35 a.P., correspondiente con la fecha probable en que se abandonó la ciudad de Teotihuacan. La imagen D (Perfil 3, San Lorenzo) hace evidente la presencia de fragmentos carbonizados (8) en un horizonte 2Ah, de edad teotihuacana (2130 años a.C.). Estos fragmentos, aún reconocibles por su naturaleza vegetal, se localizan próximos a los poros. Su presencia y frecuencia alta sugieren la práctica de quema de vegetación.

CONCLUSIONES

- La distribución y variabilidad espacial de los suelos y paleosuelos estudiados están, y estuvieron, condicionadas por la dinámica del relieve local y sus

procesos. Este factor influyó, y aún influye, significativamente en la tipología de los diversos factores bioclimáticos y de estación que han ocurrido en el área desde el Pleistoceno al Reciente.

- Los perfiles pedostratigráficos se consideran policíclicos y su memoria es multitemporal, ya que incluyen, en su matriz, suelos de diferentes edades. En consecuencia, la estratificación es su principal característica macromorfológica. Dicha estratificación se generó tanto a partir de procesos antrópicos, como a partir de los diversos y reiterados procesos catastróficos de erosión-cumulización-estabilidad que se presentaron en el área. Este conjunto de procesos, incluyendo los de carácter antrópico, resulta evidente debido a las discontinuidades de carácter morfológico, físico, químico y cronológico que los perfiles presentan. Cada discontinuidad representa un evento dinámico de inestabilidad ambiental, precedido por un periodo de estabilidad, el cual está evidenciado por el desarrollo pedológico.

- El grado de desarrollo pedológico alcanzado en cada ciclo, coadyuva a la reconstrucción paleoambiental, debido a que estuvo condicionado por la duración de un determinado periodo de estabilidad y por las condiciones ambientales que prevalecieron en él. Los ciclos cortos están caracterizados en los perfiles por pedocomplejos, en tanto que la presencia de horizontes Bt se considera indicativa de ciclos largos de estabilidad del paisaje.

- La tipogénesis, que caracteriza a la formación de horizontes Bt, permite inferir que su ocurrencia también denota periodos más húmedos que los actuales, ya que en ningún suelo moderno se presenta este horizonte. Esta hipótesis está en parte reforzada por diferentes estudios multidisciplinarios, realizados sobre sedimentos lacustres, polen, fitolitos y macrorestos vegetales, presentes en zonas aledañas al área de estudio.

- Con respecto al impacto antrópico teotihuacano sobre el medio, las evidencias resultantes de los estudios realizados favorecen la teoría de la existencia de periodos de conservación y buen manejo de la tierra, interrumpidos, en diversas épocas, por acciones antrópicas negativas al medio. Dichas acciones, probablemente, estuvieron relacionadas con procesos políticos cíclicos. Durante esos procesos, la degradación ambiental fue debida, principalmente, a la erosión acelerada del suelo. Este fenómeno se generó debido a cambios en el uso del suelo y al manejo inadecuado de los recursos, en particular los forestales.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto DGAPA-UNAM IN1108798. A la Dra. Ernestina Vallejo y al Dr. Eduardo Andrade por su indispensable apoyo para la realización de algunos análisis de laboratorio. A los señores Luis Burgos y Fernando Vega-López por su valioso apoyo en la realización de los dibujos. A la memoria de la M en C. Irma Domínguez Rubio, infatigable colaboradora del proyecto.

LITERATURA CITADA

- Barba-Pingón, L.A. 1995. El impacto humano en la paleogeografía de Teotihuacan. Tesis Doctoral. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Bronger, A., P. Winter y S. Sedov. 1998. Weathering and clay mineral formation in two Holocene soils and buried paleosols in Tadjikistan: Towards a Quaternary palaeoclimatic record in Central Asia. *Catena* 34: 19-34.
- Bullock, P., N. Federoff, A. Jongerijs, G. Stoops, T. Tursina y U. Babel. 1985. Handbook for Soil Thin Section Description. Waine Research Publications. Wolverhampton, UK.
- Caballero-Miranda, M., S. Lozano-García, B. Ortega-Guerrero, J. Urrutia-Fucugauchi y J.L. Macías. 1999. Environmental characteristics of Lake Tecocomulco, northern Basin of Mexico, for the last 50,000 years. *J. Paleolimnology* 22: 399-411.
- CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional). 1975. Carta Edafológica Texcoco (E14B21), escala 1:50 000. Secretaría de la Presidencia. México, D.F.
- Conacher, A.J. y J.B. Dalrymple. 1977. The nine-unit land surface model: An approach to pedogeomorphic research. *Geoderma* 18: 1-154.
- FAO-ISRIC-ISSS (Food and Agriculture Organization-International Soil Reference and Information Centre-International Soil Science Society). 1994. World Reference Base for soil Resources. Rome, Italy.
- FAO-ISRIC-ISSS (Food and Agriculture Organization-International Soil Reference and Information Centre-International Soil Science Society). 1998. World Reference Base for soil Resources. Report 84. Rome, Italy.
- García, E. 1974. Situaciones climáticas durante el auge y la caída de la cultura teotihuacana. pp. 35-70. *In*: Boletín 5. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Heine, K. 2003. Paleopedological evidence of human-induced environmental change in the Puebla-Tlaxcala area (Mexico) during the last 3500 years. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 20: 235-244.
- Holliday, V.T. 1989. Paleopedology and archeology. pp. 187-206. *In*: Bronger, A. y J.A. Catt (eds.). Paleopedology: Nature and application of paleosols. Supplement 16. Catena. Cremlingen-Destedt, W. Germany.

- Jasso-Castañeda, C., S. Sedov, E. Solleiro-Rebolledo y J.E. Gama-Castro. 2002. El desarrollo de los paleosuelos como índice de la estabilidad del paisaje. Un ejemplo del centro de México. pp. 20-35. *In*: Boletín 47. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Jongerijs, A. 1970. Some morphological aspects of regrouping phenomena of Dutch soils. *Geoderma* 4: 311-331.
- Lozano-García, S. y M.S. Xelhuantzi-López. 1997. Some problems in Late Quaternary pollen records of Central Mexico: Basins of Mexico and Zacapu. *Quaternary Int.* 43/44: 117-123.
- Macphail, R.I. 1986. Paleosols in archeology, their role in understanding Flandrian pedogenesis. pp. 263-290. *In*: Wright, P.V. (ed.). *Paleosols: Their recognition and interpretation*. Blackwell. London, UK.
- Macphail, R.I., M.A. Courty y A. Gebhardt. 1990. Soil micromorphological evidence of colluvium on arable land in northern Luxembourg. *Geoderma* 22: 173-192.
- McClung, E., E. Solleiro-Rebolledo, J.E. Gama-Castro, J.L. Villalpando y S. Sedov. 2003. Paleosols in the Teotihuacan valley, Mexico: Evidence for paleoenvironment and human impact. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 20: 270-282.
- Millon, R. 1970. Completion of map of great ancient city in the Valley of Mexico. *Science* 170: 1077-1082.
- O'Hara, S.L. y S.E. Metcalfe. 1995. Reconstructing the climate of Mexico from historical records. *The Holocene* 5: 485-490.
- Rzedowski, J. 1957. Algunas asociaciones vegetales de los terrenos del lago de Texcoco. *Bol. Soc. Bot. de México* 21: 1-15.
- Seymour-Fanning, D. y M.C. Balluff-Fanning. 1989. *Soil: Morphology, genesis and classification*. John Wiley. New York.
- Soil Survey Staff. 1998. *Keys to Soil Taxonomy*. 8th ed. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Solleiro-Rebolledo, E., S. Sedov, J.E. Gama-Castro, D. Flores-Román y G. Escamilla-Sarabia. 2003. Paleosol-sedimentary sequences of the Glacis de Buenavista, central Mexico: Interaction of late quaternary pedogenesis and volcanic sedimentation. *Quaternary International* 106-107: 185-202.
- Targulian, V.O. y T.A. Sokoloba. 1996. Soil as a biotic/abiotic natural system: A reactor, memory and regulator of biospheric interactions. *Eurasian Soil Sci.* 29: 30-38.
- Usai, R.M., 2001. Textural pedofeatures and Pre-hadrian's wall ploughed paleosols at Stanwix, Carlisle, Cumbria, U.K. *J. Archaeological Sci.* 28: 541-553.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1988. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Soil Conservation Service. Washington, DC.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1990. *Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report 42*. National Resources Conservation Services, National Soil Survey Center. Washington, DC.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1992. *Soil Survey Manual. Agriculture Handbook 18. Soil Survey Division Staff*. Washington, DC.

RÉGIMEN DE HUMEDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS POMÁCEOS DEL VALLE PUEBLA-TLAXCALA

Moisture Regime and Classification of Pumiceous Soils of Puebla-Tlaxcala Valley

Miguel A. Segura-Castruita^{1†}, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena², Carlos A. Ortiz-Solorio² y Patricio Sánchez-Guzmán²

RESUMEN

Los suelos pomáceos de humedad residual tienen la capacidad de retener humedad por las partículas porosas de tamaño *lapilli* que presentan (pómez); capacidad que puede influir en el régimen de humedad y, por lo tanto, en su clasificación técnica. Los objetivos del presente trabajo fueron estimar el régimen de humedad de los suelos pomáceos, utilizando el modelo Newhall y clasificar a los suelos en forma local y técnica. Cuatro perfiles modales de suelos pomáceos se estudiaron en el Valle Puebla-Tlaxcala, sus muestras de suelo se analizaron física y químicamente para la clasificación de suelos y se entrevistaron los campesinos para su clasificación local. Se estimó el Rh con el modelo Newhall, cuyo calendario de humedad se comparó con las fechas de siembra. Los resultados indican que el balance de humedad que desarrolla el modelo Newhall aparentemente se acerca a la realidad vista en campo. Los suelos se clasificaron dentro del orden Entisols o en el grupo de los Fluvisoles y en el orden Inceptisols o el grupo Cambisoles; nombres que denotan su formación reciente, pero no su característica principal: la capacidad de retener humedad.

Palabras clave: suelos volcánicos, pómez, retención de humedad, modelo Newhall.

SUMMARY

Pumiceous soils have high holding capacity because of the presence of porous particles of *lapilli* size (pumice); this capacity may influence the

¹ Subdirección de Investigación y Graduados Agropecuarios, Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10, 27170 Torreón, Coahuila, México.

[†] Autor responsable (dmlvs@hotmail.com)

² Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, estado de México.

moisture regime (Mr) and, therefore, in their technical classification. The objectives were to estimate Mr of pumiceous soils using the Newhall model and to classify the soils by local and technical procedures. Four typical profiles of pumiceous soils were studied in the Puebla-Tlaxcala Valley, their soil samples were analyzed physically and chemically for classification and the farmers were interviewed to obtain local class names. The moisture calendar was compared with sowing date. The results show that moisture balance of the Newhall model is close to reality in the field. The soils were classified in the Entisols Order or Fluvisols Group and in the Inceptisols Order or Cambisols Group, names that show their recent formation but not the main characteristic: the holding capacity.

Index words: volcanic soils, pumice, holding capacity, Newhall model.

INTRODUCCIÓN

Los suelos de origen pomáceo del Valle Puebla-Tlaxcala, conocidos como suelos de humedad residual (SHR), son arenosos y tienen la capacidad de almacenar agua, situación que los campesinos de la zona aprovechan para el adelanto de las fechas de siembra con un sistema agrícola de secano. La capacidad de retención de agua de estos suelos se debe a la porosidad del material pomáceo de tamaño *lapilli* que presentan (Segura *et al.*, 2003). Esta característica, de importancia agrícola y económica en la región, condujo a distintas instituciones a nombrar y agrupar a estos suelos como: suelos de humedad y suelos arenosos (CIMMYT, 1969), o suelos profundos y pomáceos del Popocatepetl (CIMMYT, 1974); posteriormente se clasificaron como Fluvisoles, Regosoles éutricos y Cambisoles (Werner, 1978), nombres técnicos que no indican nada sobre la capacidad de retención de humedad que estos suelos presentan, información que sería útil para su uso y manejo.

Uno de los sistemas de clasificación más ampliamente utilizados a nivel internacional es la Taxonomía de Suelos, que se basa más en propiedades observables de los suelos que en los procesos de formación, permite la clasificación de suelos de origen desconocido y es flexible y abierta a modificaciones a medida que el conocimiento del suelo se incrementa (Soil Survey Staff, 1999). La constante evolución de la Ciencia del Suelo y el desarrollo de la investigación dentro de este ámbito han provocado un mayor conocimiento, sobre todo en los procesos de formación, lo que generó que los sistemas de clasificación de suelos hayan sufrido grandes modificaciones y, en la actualidad, los usados en México resulten obsoletos (Alcala *et al.*, 2001). Esto significa que se requiere de la clasificación de los SHR con los nuevos criterios de la Taxonomía de Suelos, con el fin de establecer si el nombre que se otorgue refleja sus características intrínsecas.

A diferencia de la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo, cuyas siglas en inglés son WRB (ISSS-ISRIC-FAO, 1998), la humedad del suelo constituye una característica de diagnóstico de importancia para la Taxonomía de Suelos, y se conoce como régimen de humedad (Rh) (Soil Survey Staff, 1999). Este régimen se refiere a la presencia o ausencia, ya sea de un manto freático o de agua retenida a una tensión menor que 1500 kPa en una zona específica del suelo en periodos del año (Soil Survey Staff, 1994). No obstante, el Soil Survey Staff (1999) indicó que la humedad en el campo (HC), la temperatura del suelo (Ts) y, en consecuencia, los días que un suelo permanece húmedo o seco, pueden ser diferentes de un año a otro por las variaciones del clima. Al respecto, Porta *et al.* (1999) mencionaron que la falta de este tipo de información ha obligado a desarrollar modelos de simulación para estimar el Rh a partir de datos climáticos. Existen modelos de balances de humedad para la estimación del Rh; uno de los más empleados es el Newhall (Newhall, 1972).

Dunne (1978) mencionó que cuando sólo se utilizan datos climáticos puede subestimarse o sobreestimarse el Rh, debido a que no se consideran propiedades o características edáficas que influyen en la capacidad de retención de humedad del suelo, como son: el contenido de materia orgánica (Hamblin, 1991), las esmectitas (Yerima *et al.*, 1987), los amorfos de sílice, aluminio y hierro (Wada, 1989; Gutiérrez-Castorena y Ortiz-Solorio, 1999; Gama-Castro *et al.*, 2000), y la estructura (Dexter, 1997).

El comportamiento del agua dentro del perfil se ha interpretado sólo con la estimación del contenido de humedad del suelo a través de la determinación de las constantes de humedad [capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)] (Fuentes-Yagüe y García-Legaspi, 1999), parámetros que dependen de la textura y estructura del suelo (Porta *et al.*, 1999).

Una alternativa para establecer la existencia o ausencia de humedad en los suelos de origen pomáceo es el conocimiento tradicional sobre el recurso suelo, ya que los campesinos nombran a los suelos de acuerdo con características comunes que han identificado a través de los años y que toman en cuenta para el uso y manejo de sus tierras (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2001). En el caso de los suelos de humedad residual, mencionaron que estos suelos son capaces de guardar humedad antes y después del periodo de lluvias y tener dos ciclos de cultivos en el año (Segura-Castruita *et al.*, 2003).

Por otra parte, se ha reportado que la incorporación de material volcánico (pómez) en el suelo es capaz de modificar el régimen de humedad de arídico a údico (Tejedor *et al.*, 2002), por lo que, al existir suelos de origen pomáceo que son capaces de almacenar humedad y que los campesinos aprovechan para el adelanto de fechas de siembra, es factible que el régimen de humedad sea diferente al que se estima con modelos de simulación como el Newhall; en este contexto, resulta de interés analizar cómo se comporta el régimen de humedad que se obtiene con datos climáticos con el adelanto de las fechas de siembra.

Por lo anterior, los objetivos del presente trabajo son: estimar el régimen de humedad (Rh) de los SHR sin considerar sus características edáficas con el modelo Newhall y evaluar cómo se altera este régimen al adelantar las fechas de siembra y denominar a estos suelos con base en la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1999) y la WRB (ISSS-ISRIC-FAO, 1998) y relacionarlos con el nombre local de los mismos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se localiza en las laderas de los volcanes Popocatepetl y Pico de Orizaba, en la parte sur-este del estado de México, oeste y este del estado de Puebla, entre 18° 52' 05.4" y 19° 24' 51.6" N y

97° 15' y 99° 08' 12.6" O, a una altitud de 2240 a 2350 m. Esta área corresponde a la que estudió Segura-Castruita *et al.* (2003).

Estimación del Régimen de Humedad

El régimen de humedad (Rh) de los suelos de humedad residual se estimó a través del modelo Newhall; se utilizaron los datos de precipitación (P) y temperatura (T) de cuatro estaciones meteorológicas (García, 1988) que se encuentran en el área de estudio (Cuadro 1).

Trabajo de Campo

Se seleccionaron cuatro zonas dentro del área con base en el levantamiento de clases de tierras campesinas, realizado por Segura-Castruita *et al.* (2003). En cada uno, se describieron el sitio y el perfil de acuerdo con el manual para la descripción de suelos en campo de Cuanalo-de la Cerda (1990) y se realizó un muestreo de aproximadamente 2 kg de suelo en cada uno de los horizontes. A través de entrevistas con productores, se obtuvieron las fechas de siembra para el cultivo de maíz, el cual se considera como el más importante en la región, y los nombres locales de los SHR.

Trabajo de Laboratorio

A las muestras de suelo secas, molidas y tamizadas, se les determinaron textura, densidad aparente, contenido de materia orgánica, pH, capacidad de intercambio catiónico y extracciones de Fe, Si y Al libre (ditiocito citrato bicarbonato) y activo (oxalato ácido), tomando como base el Manual para Análisis de Laboratorio de Van Reeuwijk (1995).

Asimismo, se obtuvieron la humedad de campo y las constantes de humedad de estos suelos [capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)] en cada uno de sus horizontes, siguiendo el Manual de Laboratorio del Soil Survey Investigation (1992). El muestreo de los suelos (horizontes) se realizó en el periodo libre de lluvias entre enero y marzo.

Evaluación del Periodo Húmedo

Los lapsos de tiempo de las diferentes fechas de siembra de maíz, en suelos de humedad residual, se ubicaron en los calendarios de humedad del modelo Newhall correspondiente, y se determinaron las condiciones de humedad en las que se encontraban los suelos en el momento del muestreo y se compararon los resultados con la información obtenida durante las entrevistas con los campesinos.

Clasificación de Suelos

Los suelos de humedad residual se clasificaron siguiendo los criterios de la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2003) y la WRB (ISSS-ISRIC-FAO, 1998) y se relacionaron con los nombres locales de los mismos, obtenidos en las entrevistas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Régimen de Humedad de los Suelos de Humedad Residual

Después de correr el modelo Newhall con los datos de P y T, dos suelos resultaron con un Rh údico y el resto con un Rh ústico (Cuadro 2). De acuerdo con lo anterior, en los suelos con un Rh údico, la sección control de humedad (SCH) no está seca en

Cuadro 1. Datos promedio mensual de temperatura y precipitación de cuatro estaciones del área de estudio (García, 1988).

Estación meteorológica		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Atlixco	T [†]	15.2	16.1	17.9	19.0	19.9	19.5	19.1	19.0	18.8	18.2	17.0	15.6	17.9
	P [‡]	11.1	5.9	9.5	20.2	73.8	171.1	143.8	176.6	178.2	68.9	15.0	2.5	876.6
Ciudad Serdán	T	10.8	12.3	15.2	15.8	15.7	14.3	14.1	14.2	13.5	12.9	11.8	10.9	13.5
	P	8.3	6.5	14.5	48.7	108.4	147.8	127.6	110.9	158.0	47.6	13.9	8.8	801.0
Chalco	T	11.5	12.1	15.2	17.1	18.1	17.5	16.7	16.8	16.4	15.5	13.5	11.9	15.2
	P	13.3	5.5	13.1	28.1	55.5	108.0	137.6	129.1	100.2	50.2	7.4	6.9	656.9
Huejotzingo	T	12.1	13.4	16.0	17.3	18.5	18.2	17.1	17.2	16.6	15.7	13.6	12.3	15.7
	P	9.3	5.6	9.7	26.3	68.7	146.2	166.4	165.6	159.4	72.2	18.1	8.8	856.3

[†] T = temperatura media mensual (en °C); [‡] P = precipitación media mensual (en mm).

Cuadro 2. Regímenes de humedad de los suelos de humedad residual a partir del modelo Newhall.

Estación meteorológica	Perfil	Días			Régimen de humedad
		Secos	S/H	Húmedos	
		Número			
Cd. Serdán	1	0	64	296	Údico
Huejotzingo	2	0	86	274	Údico
Atlixco	3	22	99	239	Ústico
Chalco	4	0	94	266	Ústico

S/H = suelos entre seco y húmedo.

alguna parte por más de 90 días consecutivos, como es el caso de los suelos del área de influencia de las estaciones de Cd. Serdán y Huejotzingo; mientras que, en los suelos con Rh ústico, localizados en Atlixco y Chalco, la SCH está seca en alguna parte durante un tiempo más prolongado (de 94 a 99 d). Estos Rh se utilizaron para la clasificación taxonómica de los SHR.

Humedad de Campo y Constantes de Humedad

La capacidad de retención de humedad de los SHR es una de sus propiedades distintivas; en condiciones de campo, en el momento en que se realizó el muestreo (cuatro meses después de la última lluvia), la capa superficial presentó porcentajes de humedad de campo (HC) que variaron de 0.72 a 4.32, a una profundidad máxima de 23 cm; mientras que los estratos sub-superficiales mostraron un contenido de humedad de 3.58 a 36.26%. Un parámetro teórico que ayuda a entender el comportamiento de la humedad a través del perfil son las constantes de humedad (Cuadro 3).

Al comparar el contenido de HC con la CC y el PMP de estos suelos, puede verse que a partir de 20 cm de profundidad se presenta un porcentaje de agua mayor que el PMP y, en ocasiones, que la CC; es decir, después de haber transcurrido cuatro meses después de la última lluvia, el suelo no está seco.

El Soil Survey Staff (1999) estableció que un suelo se considera húmedo cuando presenta humedad a una tensión menor que 1500 kPa; con base en esto, puede mencionarse que los SHR se encontraban húmedos en el momento del muestreo.

Aun cuando el dato de HC es de un año solamente (momento del muestreo), el conocimiento tradicional se vuelve importante, debido a que, históricamente, los campesinos han aprovechado la humedad de los

Cuadro 3. Constantes de humedad de los suelos de humedad residual.

Perfil	Horizonte	Prof. [†] cm	HC	CC	PMP
			%		
1	Ap	0-22	0.9	13.7	7.2
	A	22-47	4.1	16.9	3.3
	C	47-86	4.7	14.3	3.3
	2C	86-122	6.0	11.1	5.2
	3C	122-141	5.4	11.1	4.5
2	3C ₂	> 141	6.1	6.3	1.9
	Ap	0-23	1.7	15.4	3.9
	A	23-41	9.8	17.5	3.7
	Bw	41-73	19.5	31.8	1.9
	Bw ₂	73-97	25.3	25.9	13.8
3	C	97-122	22.3	19.1	9.4
	C ₂	> 122	23.4	19.5	10.2
	Ap	0-20	2.6	13.2	6.0
	A	20-46	13.4	15.4	6.5
	Cr	46-62	28.7	24.7	6.0
4	2C	62-94	23.4	20.5	6.8
	3C	94-131	24.1	24.9	8.6
	4C	> 131	20.4	24.9	11.0
	Ap	0-16	1.8	16.0	4.7
	AC	16-47	4.1	15.3	4.8
	C	47-82	6.6	10.0	5.3
	2C	82-115	12.4	18.9	7.6
	3C	115-142	10.1	14.8	6.7
	4C	> 142	12.6	15.8	6.9

[†] Prof. = profundidad; HC = humedad de campo; CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente.

SHR para adelantar las fechas de siembra (Peña, 1974; Díaz *et al.*, 1999). Esto conduce a confirmar que en estos suelos, como lo indican los productores, existe suficiente humedad aprovechable para la germinación de semillas y el desarrollo de la plántula antes de que se establezca el periodo de lluvias.

Fechas de Siembra

Durante la entrevista, los campesinos de la región mencionaron que llevan a cabo la siembra de los cultivos de temporal dentro de un lapso de tiempo que varía quince días (Cuadro 4), el cual puede empezar a finales de febrero y concluir a inicios de marzo en el Valle de la Esperanza, Puebla (Cd. Serdán), o bien, iniciar a finales de marzo y terminar a principios de abril en el Valle Puebla-Tlaxcala y Valle de Chalco (Huejotzingo, Atlixco y Chalco). Asimismo, hicieron alusión de que, después de la siembra, tienen que esperar de cuatro a cinco semanas antes de que se presente una lluvia fuerte.

Cuadro 4. Fechas de siembra de maíz en los suelos de humedad residual.

Sitio	Fecha de siembra
1 Cd. Serdán	del 25 de febrero al 5 de marzo
2 Huejotzingo	del 20 de marzo al 3 de abril
3 Atlixco	del 21 de marzo al 5 de abril
4 Chalco	del 21 de marzo al 5 de abril

Comparación de los Periodos Húmedos

El periodo húmedo que se obtiene con el modelo Newhall se representa como un calendario de humedad de 360 días, integrado por una matriz de números arábigos (1, 2 y 3), cuyos encabezados son los meses del año y una numeración de los días del mes. Los números arábigos indican la magnitud de la presencia de agua en el suelo; por ejemplo, el 3 significa que la sección control de humedad (SCH) se encuentra húmeda por completo (presencia de humedad a una tensión menor que 1500 kPa). Cuando cambia de 3 a 2, se empieza a secar alguna parte de esta sección y, cuando cambia de 2 a 1, se asume que se encuentra seca en su totalidad (presencia de humedad a 1500 kPa); caso contrario ocurre, cuando se comienza a humedecer la SCH (de 1 a 2 y de 2 a 3). De acuerdo con Van Wambeke (2000), a través de este calendario puede obtenerse el tiempo de duración de cada periodo. En el Cuadro 2, se encuentra la duración de cada periodo para cada una de las estaciones del área de estudio.

En la Figura 1, se muestra como ejemplo el calendario de la estación meteorológica Atlixco, donde el sombreado indica los días que los productores ocupan para la realización de la siembra de maíz en esa región.

En el caso de Cd Serdán, Huejotzingo y Chalco, no existe limitante de humedad durante todo el año (ningún día seco), mientras que Atlixco presentó 22 días secos, que iniciaron a 18 días aproximadamente después de la conclusión de las fechas de siembra. Esto significa que transcurrieron de cinco a seis semanas antes de que, en el calendario, se registrara humedad en el suelo. Esta situación es parecida a lo reportado por los productores durante la entrevista, por lo que el balance de humedad que desarrolla el modelo Newhall se acerca a la realidad vista en campo.

Sin embargo, este balance puede ser cuestionable. De acuerdo con Dunne (1978), la ETP (método de Thornthwaite), que utiliza el modelo Newhall, es un

dato subestimado, por lo que los días que el suelo permanece seco o húmedo se ven minimizados. Asimismo, el hecho de considerar una capacidad de almacenamiento (CAP) constante de 200 mm (Van Wambeke, 2000), ya se está asumiendo que todos los suelos tienen el mismo comportamiento, sin importar que éste está en función de algunas características del suelo, como: textura, contenido de materia orgánica, estructura y materiales secundarios.

Esta situación no se aprecia en el comportamiento de la humedad de los SHR reconocida por los productores, porque la subestimación del modelo Newhall se compensa con la capacidad de retener humedad del material pomáceo, pero estos suelos no son la generalidad.

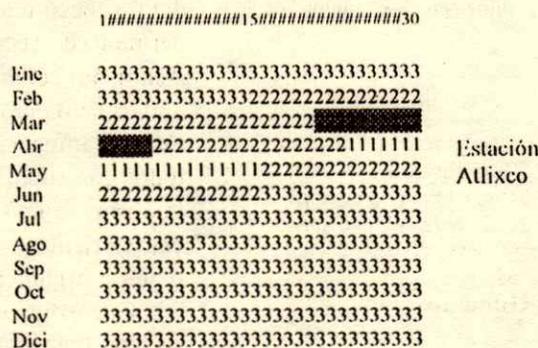
En el caso de otro tipo de suelos, se recomienda involucrar datos de evapotranspiración potencial, generados con otros métodos, y de capacidad de retención de humedad, de acuerdo con las características o propiedades del suelo, con la idea de obtener un modelo donde los resultados parezcan a los recabados en campo, o bien que se acerquen a la realidad. De probarse lo anterior, los balances de humedad serían de gran utilidad para el manejo del suelo y se estimarían regímenes de humedad adecuados para la Taxonomía de Suelos.

Clasificación de Suelos

Taxonomía de suelos. Todos los suelos de humedad residual (SHR) presentan un epipedón ócrico, por el bajo contenido de carbono orgánico (< 6%), el color en húmedo (chromas > 3) y, en ocasiones, el espesor (< 18 cm), requisitos considerados en el cpipedón mólico.

En general, estos suelos carecen de endopedones y características de diagnóstico bien definidas y conservan la estructura geológica; es decir, depósitos laminares lacustres, aluviales y eólicos, lo que demuestra el escaso o nulo desarrollo de procesos pedogenéticos. El único perfil que tiene un horizonte subsuperficial cámbico fue el 2, al presentar un desarrollo de estructura y color e incipiente incremento en el contenido de arcilla con respecto al horizonte suprayacente; esta formación es más por procesos de alteración química que por iluviación, pues no se observaron revestimientos arcillosos laminares.

Los SHR, al estar constituidos sólo por epipedones ócricos y carecer de endopedones y características de diagnóstico, se ubicaron dentro del orden Entisols y



Calendario de Humedad
 1 = seco; 2 = semiseco o semihúmedo; 3 = húmedo
 Lapso de días para la siembra

Figura 1. Calendarios de humedad de la estación Atlixco.

se subdividieron en Psamments y Fluvents (Cuadro 5), debido al decrecimiento irregular del carbono orgánico y a las deposiciones de materiales relacionados con ríos, flujo de lavas y materiales piroclásticos.

Las condiciones climáticas en que se desarrollan los suelos de humedad residual corresponden a los regímenes de humedad údicos y ústicos, por los que los suelos se subdividieron en cuatro Grandes Grupos: Udipsamments (Perfil 1), Ustifluvents (Perfil 3) y Ustipsamments (Perfil 4).

A nivel de subgrupo, estos suelos no reflejan sus características intrínsecas y se ubican en clases (Subgrupos) muy generales, como los Typic (Typic Udipsamments y Typic Ustipsamments), o relacionados con transiciones entre climas húmedos y templados (Udic Ustifluvents) (Cuadro 5).

Los materiales pomáceos se han estudiado en ambientes húmedos de regiones tropicales, xéricos y arídicos, pero no en ambientes ústicos, por lo que la Taxonomía no los contempla como un material parental en esas condiciones. Esto llama la atención, ya que los volcanes no están relacionados con un clima en particular.

En el mismo esquema, cuando un suelo no refleja sus características diferenciadoras en los niveles jerárquicos más altos, esto significa que no está bien clasificado y, por lo tanto, no estudiado. El término vítrico tampoco refleja la naturaleza del material que le está dando origen, porque puede ser ceniza, pómez o material parecido a pómez. Situación que se podría resolver si al término psamment se le agregara pómez (pomezpsamments), como está reportado cuando las arenas están compuestas por cuarzo (quarzipsamments).

El suelo que tiene un horizonte ócrico y un cámbico se clasificó como Inceptisol (Perfil 2) y por la presencia del epipedón ócrico se ubicó en los Ochrepts, por 50% de PSB en todos los horizontes en los Eutrochrepts y, finalmente, por el contenido de pómez, en los Vitrandic Eutrochrepts.

Los SHR tienen, como característica principal, la piedra pómez en todo el espesor del perfil, en diferentes proporciones, tamaños y volúmenes; no obstante, esta situación no queda de manifiesto incluso a nivel de familia; por ejemplo, arena gruesa francosa sobre francosa fina, no calcárea, isotérmica, no refleja la característica diferenciadora de estos

Cuadro 5. Clasificación taxonómica de los suelos de humedad residual.

Perfil	Orden	Suborden	Gran Grupo	Subgrupo	Familia
1	Entisols	Psamments	Udipsamments	Typic Udipsamments	Ceniza, no calcárea, isotérmica
4			Ustipsamments	Typic Ustipsamments	Ceniza, no calcárea, isotérmica
3			Fluvents	Ustifluvents	Udic Ustifluvents
2	Inceptisols	Ochrepts	Eutrochrepts	Vitrandic Eutrochrepts	Arena, gruesa-francosa sobre francosa-fina, no calcárea, isotérmica

Cuadro 6. Relación de las clases de tierras campesinas con las clasificaciones científicas.

Nombre local del suelo	Perfil	Clasificación Taxonómica	World Reference Base
Arenales	1	Typic Udipsamments	Fluvisoles téfri-arénicos
Arenal	2	Vitrandic Eutrochrepts	Cambisoles fluvi-vítricos
Xaltéte (arena con pómez)	3	Udic Ustifluvents	Fluvisoles eutri-téfricos
Arena gruesa	4	Typic Ustipsamments	Fluvisoles eutri-téfricos

suelos pomáceos y capaces de retener humedad, a pesar de que, en todos los suelos, el régimen de humedad sea muy importante para su correcta clasificación.

World Reference Base. Los SHR se clasificaron dentro de los Grupos Fluvisoles, con diferente grado de alteración (Téfricos y Vítricos) y Cambisoles (Cuadro 6). Con este sistema de clasificación se esperaba que se clasificaran mejor a los suelos estudiados, ya que la WRB, a diferencia de la Taxonomía de Suelos, tiene más horizontes volcánicos, y es posible ubicar características diferenciadoras de los suelos a nivel de subunidad (ISSS-ISRIC-FAO, 1998); sin embargo, esto no sucedió, ya que la capacidad de retención de humedad de estos suelos no queda expresada, lo que significa que los suelos de origen volcánico deben de analizarse con mayor cuidado para hacer propuestas sobre su clasificación y, por consecuencia, en su manejo.

Clasificación campesina de tierras. Los nombres locales de los SHR, utilizados por el campesino, hacen referencia al tamaño de la partícula; sin embargo, le añaden otras características, es decir, lo relacionan con el color, la ubicación y la extensión que ocupan, inclusive pueden involucrar un conocimiento más preciso de la tierra como en el caso del Xaltéte, nombre Náhuatl, que indica la presencia de pómez (Cuadro 6).

En otros estudios relacionados con la clasificación campesina de tierras, los productores sólo se basan en textura y color (Sánchez *et al.*, 2002), pero no en la extensión que ocupan los suelos, como es el caso de los arenales, los cuales ocupan una gran superficie, o el contenido de humedad e inclusive la cercanía con los ríos.

Gutiérrez-Castorena y Ortiz-Solorio (1999) mencionaron que una misma clase de tierra, reconocida por los productores de una zona en particular, puede estar integrada por suelos cuya clasificación taxonómica a nivel de subgrupo sea diferente y que, a su vez, esta clase de tierra sea única a nivel de familia. En los SHR, a diferencia de lo anterior, un subgrupo puede aparecer en diferentes

clases de tierra, pero no a nivel de familia donde le corresponde una clase de tierra, como lo reportaron Gutiérrez-Castorena y Ortiz-Solorio (1999) en suelos del ex lago de Texcoco.

Al relacionar la clasificación de los SHR a nivel de Subgrupo, se encontró que los Vitrandic Eutrochrepts se encuentran en las tierras denominadas arenal y arena, en cambio, los subgrupos Udic Ustifluvents, Typic Udipsamment y Typic Ustipsamments corresponden cada uno a una clase de tierra (xaltéte, arenales y arena gruesa, respectivamente). En el caso de la WRB, la clasificación de los suelos se generaliza y se pierde información.

CONCLUSIONES

- El régimen de humedad de suelos arenosos de origen volcánico y con presencia de pómez puede estimarse con el modelo Newhall.
- Los suelos de humedad residual se clasificaron como Entisols o Fluvisoles, debido a que están formados por materiales volcánicos recientemente depositados, tiempo insuficiente para formar horizontes de diagnóstico. Sólo en algunos casos, el ambiente ha sido más estable, por lo que el intemperismo químico está alterando al material y formando arcillas para evolucionar a un horizonte cámbico y clasificarse dentro del Orden Inceptisoles o el Grupo Cambisoles.
- Los suelos derivados de materiales pomáceos en ambientes templados no han sido lo suficientemente estudiados a nivel internacional, de ahí que su clasificación científica no refleje sus características más importantes, el tipo de material parental y la capacidad de retener humedad, las cuales influyen en su manejo.

LITERATURA CITADA

- Alcalá-de Jesús, M., C.A. Ortiz-Solorio y M.C. Gutiérrez-Castorena. 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca. *Terra* 19: 227-239.
- CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo). 1969. El Plan Puebla: 1967-1969. El Batán, México.
- CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo). 1974. El Plan Puebla: Siete años de experiencia: 1967-1973. El Batán, México.

- Cuanalo de la Cerda, H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Tercera Edición. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México
- Dexter, A.R. 1997. Physical properties of tilled soils. *Soil Tillage Res.* 43: 41-63.
- Díaz-Cisneros, H., L. Jiménez-Salas, R.J. Laird y A. Turrent-Fernández. 1999. El Plan Puebla 1967-1992. Análisis de una estrategia de desarrollo de la agricultura tradicional. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Donatelli, M., M. Acutis y N. Laruccia. 1996. Evaluation of methods to estimate water content at field capacity and wilting point. Proc. 4th European Society of Agronomy Congress. Veldhoven, Netherlands. 86-87.
- Dunne, T. 1978. Water in environmental planning. W.H. Freeman and Company. San Francisco, CA.
- Fuentes-Yagüe, J.L. y G. García-Legaspi. 1999. Técnicas de riego. Sistemas de riego en la agricultura. Mundi-Prensa. México, D.F.
- Gama-Castro, J.E., E. Solleiro-Rebolledo y E. Vallejo-Gómez. 2000. Weathered punice influence on selected alluvial soil properties in West Nayarit, Mexico. *Soil Tillage Res.* 55: 143-165.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Offset Larios. México, D.F.
- Gutiérrez-Castorena, M.A. y C.A. Ortiz-Solorio. 1999. Origen y evolución de los suelos del ex lago de Texcoco, México. *Agrociencia* 33: 199-208.
- Hamblin, A.P. 1991. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.* 38: 95-157.
- ISSS-ISRIC-FAO (International Soil Science Society-International Soil Reference and Information Centre-Food and Agricultural Organization). 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 84. Rome, Italy.
- Newhall, F. 1972. Calculation of soil moisture regimes from climatic record. Rev. 4 mimeographed. Soil Conservation Service. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Ortiz-Solorio, C.A. y M.C. Gutiérrez-Castorena. 2001. Mexican ethnopedology: The experience in soil mapping. pp. 107-136. In: Science and tradition: Roots and wings for development. Royal Academy of Overseas Sciences. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Brussels, Belgium.
- Peña O., B.V. 1974. Evolución del levantamiento fisiográfico de la región Sur-Occidental del Valle de México cuando se usa como base para desarrollar recomendaciones de productividad. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Porta-Casanelas, J., M. López-Acevedo Regurín y C. Roquero-de Laburu. 1999. Edafología, para la agricultura y el medio ambiente. 2a edición. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Sánchez-G., P., C.A. Ortiz-Solorio, Ma. del C. Gutiérrez-Castorena y J.D. Gómez D. 2002. Clasificación campesina de tierras y su relación con la producción de caña de azúcar en el sur de Veracruz. *Terra* 20: 359-369.
- Segura-Castruita, M.A., C.A. Ortiz-Solorio, y M.C. Gutiérrez-Castorena. 2003. Localización de suelos de humedad residual a partir de imágenes de satélite: Clasificación automática supervisada de la imagen. *Terra* 21: 149-156.
- Soil Survey Investigation. 1992. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Report 42. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC
- Soil Survey Staff. 1994. Claves para la Taxonomía de Suelos. Trad. al español por C.A. Ortiz-Solorio y Ma del C. Gutiérrez-Castorena. Publicación Especial 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Texcoco, México.
- Soil Survey Staff. 1999. Keys to soil taxonomy. Second edition. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.
- Soil Survey Staff. 2003. Keys to soil taxonomy. Ninth edition. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.
- Tejedor, M., C.C. Jiménez y F. Díaz. 2002. Soil moisture changes in tephra mulched soils: Implications for Soil Taxonomy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 202-206.
- Van Reeuwijk, L.P. 1995. Procedures for soil analysis. Tech. Paper 9. 4th ed. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Van Wambeke, A.R. 2000. The Newhall simulation model for estimating soil moisture and temperature regimes. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University. Ithaca, NY.
- Wada, K. 1989. Allophane and imogolite. pp. 1051-1087. In: Dixon, J.B. y S.B. Weed (eds.). Minerals in soil environments. 2nd ed. SSSA Book Series 1. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- 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.
- Yerima, B.P.K., L.P. Wilding, F.G. Calhoun y T. Hallmark. 1987. Volcanic ash-influence and associated mollisols of El Salvador: Physical, chemical, and morphological properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 699-708.

CARBONO ORGÁNICO DE LOS SUELOS DE MÉXICO

Organic Carbon of Mexican Soils

Miguel A. Segura-Castruita^{1†}, Patricio Sánchez-Guzmán², Carlos A. Ortiz-Solorio² y
Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena²

RESUMEN

En el mundo, el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) se ha obtenido a partir de datos de perfiles de suelo que provienen de mapas edafológicos; estos resultados se generalizan con la aplicación de sistemas de información geográficos (SIG) para estimaciones regionales y nacionales. En México, la cartografía de suelos carece de datos analíticos y, si existen, corresponden al centro de país, de tal forma que la utilización de estos mapas es limitada. Los objetivos del presente estudio fueron determinar el contenido de COS en el horizonte superficial de los suelos de México y establecer sus aportes por entidad federativa, región ecológica, uso del suelo y por áreas según su influencia humana. Para seleccionar sitios potenciales de muestreo, se utilizó una cuadrícula de 5 km x 5 km sobrepuesta a mapas espaciales, escala 1:250 000, se recolectaron un total de 4583 muestras de suelo del horizonte superficial (0 a 20 cm) y, en cada sitio, se registraron el uso del suelo y la influencia humana. A cada muestra se le determinó su contenido de COS y sus resultados se emplearon para la generación de un mapa con formato "raster", por interpolación, al cual se le sobrepusieron las capas con información de límites estatales, uso del suelo e influencia humana, mediante SIG. El resultado final muestra que la capa superficial de los suelos de la República Mexicana tiene un contenido total de 10.5 Pg C y que el contenido más alto se relaciona con selvas húmedas y secas.

Palabras clave: carbono orgánico edáfico, vegetación, influencia humana, captura de C.

¹ Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10. Torreón, Coahuila.

[†] Autor responsable (dmilys@hotmail.com)

² Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

Recibido: Abril de 2003. Aceptado: Septiembre de 2004.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 23: 21-28.

SUMMARY

The amount of soil organic carbon (SOC) is usually obtained from the soil profile data of soil survey maps. The resulted values are generalized into soil maps to estimate regional and national values of SOC by geographic information systems (GIS). In Mexico, most of the official soil maps do not have information on soil properties and the ones that do are mostly related to the central region of the country, making application limited. The objectives of the present research were to determine the amount of soil organic carbon in the surface horizon of Mexican soils and to estimate its contribution by state, ecological region, land use, and human activity. A five by five kilometer grid superimposed on digital maps (scale 1:250 000) was used to select the sampling sites. A total of 4583 samples were taken from the top 20 cm of the soil profile. In addition, geographic coordinates, land use, and human activity were recorded at each study site. Soil organic content was obtained in a laboratory from each soil sample to generate a raster map of SOC. Information about state boundaries, land use, and human activity was superimposed on the SOC raster map by GIS. The results showed that the topsoil of Mexico has a SOC content of 10.5 Pg observing the highest values in dry and rain forest areas.

Index words: soil organic carbon, vegetation, human influence, C sequestration.

INTRODUCCIÓN

El sistema suelo-vegetación juega un papel importante en el aumento o en la reducción de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, dependiendo de la velocidad de formación y descomposición del carbono orgánico en el suelo (COS) (Van Bremen y Feijtel, 1990); razón por la cual, el recurso suelo es uno de los reservorios terrestres de C más grandes (Post *et al.*, 1990); además, es el medio para evaluar el flujo de gases invernadero entre la biosfera y la atmósfera (Kern, 1994). Ante el incremento de la

cantidad de CO₂ en la atmósfera y la recomendación que se planteó en el Protocolo de Kyoto del Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton *et al.*, 1997), se ha extendido el interés en la dinámica del COS en el mundo, buscándose alternativas para su captura. Batjes (1999) indicó que, para estimar el potencial de captura de C en el suelo bajo distintos escenarios, es necesario distinguir dos cuestiones: a) ¿cuál es la existencia original de carbono en el suelo? y b) ¿cuáles son los cambios en la existencia del mismo? Es decir, no puede tenerse certidumbre acerca de los cambios si no se tienen datos base que sirvan de comparación en evaluaciones del contenido de COS en un sitio o lugar determinado. El método que comúnmente se aplica es la determinación del COS a diferentes profundidades o globalmente, para uno o más horizontes y, posteriormente, se transforman los datos tomando en cuenta la densidad aparente (Da) y la pedregosidad del suelo (FAO, 2002). La escala puede ser a nivel parcela, cuenca, región, un país en específico, un continente o zona agroecológica (FAO/IIASA, 1999). Una de las alternativas que se han utilizado para conocer el COS es el análisis de datos de perfiles de suelos a través de sistemas de información geográficos (SIG), con el fin de generalizar la información; sin embargo, han faltado datos bien referenciados (FAO, 2002). Algunos estudios estadísticos sobre el contenido de C en el suelo y su distribución, a nivel mundial, de países o, en su gran mayoría, regionales y locales, se basaron en mapas de suelos.

Sombroek *et al.* (1993) determinaron el contenido de C total en los suelos del mundo, tomando como base el Mapa Mundial de Suelos de la FAO/UNESCO/ISRIC (1988) y datos de 400 perfiles de suelos de zonas tropicales. Éstos se agruparon por unidades de suelos, con el rango de COS y Da; sin embargo, la mayoría de estos perfiles carecen de información relacionada con su localización geográfica. En cambio, Batjes (1996) utilizó la base de datos "WISE" que cuenta con 4353 perfiles georreferenciados (19 222 análisis de COS) y encontró que el suelo tiene un contenido total de C de 1500 Pg en sus horizontes superiores (0 a 100 cm). Similares resultados reportaron Post *et al.* (1982) y Eswaran *et al.* (1993), quienes emplearon alrededor de 16 000 datos de suelos provenientes de los Estados Unidos de América.

En Estados Unidos de Norteamérica (Kern, 1994) y Canadá se basaron sus estudios en mapas

edafológicos locales (clasificados según la Taxonomía de Suelos de 1992) y en el Mapa Mundial de Suelos de la FAO/UNESCO/ISRIC (1988). En cambio, en otros países han considerado al tipo de suelo y la cubierta vegetal conjuntamente para la generación de sus mapas, entre los que se encuentran: Gran Bretaña (Howard *et al.*, 1995), Brasil (Moracs *et al.*, 1998) y Francia (Arrouays *et al.*, 1999), aunque sus estudios los limitaron a zonas forestales. En Francia, consideraron datos pedológicos georreferenciados y su muestreo se basó en una colecta sistemática de suelos, con el auxilio de una cuadrícula de 16 km x 16 km; el mapa de COS que se generó permitió estimar la existencia de 3.1 Pg de C a una profundidad de 30 cm.

En México, se han realizado estudios del contenido de C (Mascara, 1995; De Jong *et al.*, 1999; Acosta *et al.*, 2002); sin embargo, éstos se han desarrollado a escala regional y local, referidos a la vegetación y pocos toman en cuenta al suelo. Por otra parte, la cartografía de suelos existente para la República Mexicana, en su mayor parte, carece de datos analíticos y si existen son del centro del país, de tal forma que la utilización de estos mapas es limitada. Los objetivos del presente estudio fueron determinar el contenido de COS en el horizonte superficial de los suelos de México y establecer sus aportes por entidad federativa, región ecológica, uso del suelo y por áreas según su influencia humana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

México se localiza entre los paralelos 14° 32' y 32° 43' N y los meridianos 86° 42' y 118° 27' O. La geología del territorio mexicano, por su origen, está representada por rocas sedimentarias (64%), por rocas ígneas (32%) y por rocas metamórficas (4%), las cuales pertenecen a distintas Eras Geológicas; 6% a la Precámbrica, 3% a la Paleozoica, 62% a la Mesozoica y 29% a la Cenozoica (Ortiz-Villanueva y Ortiz-Solorio, 1990). Las condiciones climáticas varían de manera considerable y ocupan distintos porcentajes de su superficie, siendo los principales: cálido húmedo (4.7%), cálido subhúmedo (23.0%), templado húmedo (2.7%), templado subhúmedo (20.6%), seco (24.3%), y muy seco (24.7%) (SARH, 1994). La vegetación natural domina en México con una extensión de 61%, donde abundan bosques (templado y tropical) que cubren una superficie de

29%, y los matorrales con 26% (Comisión para la Cooperación Ambiental, 1997). El uso del suelo es predominantemente agrícola y pecuario (25% de la superficie total de México), mientras las zonas urbanas cubren tan sólo 0.23% (INEGI, 1999).

Metodología

La metodología se realizó en forma paralela a la "Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el Hombre en la República Mexicana escala 1:250 000" (SEMARNAT-CP, 2002) y consta de cuatro etapas: a) selección de sitios de muestreo, b) muestreo de suelo, c) análisis de laboratorio, y d) procesamiento de datos, mismas que se describen a continuación.

Selección de sitios de muestreo. Se sobrepuso una cuadrícula (5 km x 5 km) a los espaciogramas, escala 1:250 000 del INEGI (1995), con proyección UTM (Universal Transversa de Mercator). Cada vértice de la cuadrícula representó un punto potencial de muestreo. Para la selección final de los sitios de muestreo, se tomó como criterio la accesibilidad de los lugares (carreteras pavimentadas, terracerías y brechas), utilizando las cartas topográficas del INEGI (2000).

Recorrido de campo y muestreo de suelos. En el muestreo, se consideró a los ambientes que componen la República Mexicana; es decir, desde zonas áridas y semiáridas hasta el trópico húmedo con vegetación exuberante, como las selvas altas perennifolias y los manglares; así como distintas condiciones de altitud, áreas cercanas a los litorales costeros, hasta zonas con altitudes mayores que 3000 m. Cada sitio seleccionado se georreferenció en campo mediante un geoposicionador (GPS), marca Garmin modelo "e-trex", y se recolectó una muestra única de suelo de la capa superficial (0 a 20 cm) en el punto donde se tomó el dato de localización. Se registró el uso dominante del suelo y para la influencia humana existente en cada sitio se utilizaron los datos de campo obtenidos en el estudio de degradación de suelos de la República Mexicana (SEMARNAT-CP, 2002).

Análisis de laboratorio. Las muestras se trasladaron al laboratorio, se dejaron secar a la sombra a temperatura ambiente y se tamizaron con una malla de 2 mm; posteriormente, se determinó el porcentaje de COS (Walkley y Black, 1934) y la Da (método de la parafina), basados en la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000 (Diario Oficial de la Federación, 2000).

Procesamiento de datos. El contenido de COS por unidad de superficie (Mg ha^{-1}) en cada punto se obtuvo a partir del porcentaje del COS, de la Da y de la profundidad del suelo. Los resultados constituyeron la base de datos que se utilizó para realizar un mapa temático (tipo "raster") de contenido de carbono orgánico de México, a través de una interpolación con el módulo INTERPOL (inverso de la distancia) SIG IDRISI®. Con el SIG Arcview 8.1®, se produjeron las coberturas de uso del suelo e influencia humana de la República Mexicana, las cuales se usaron para obtener máscaras digitales del mapa de contenido de COS. Posteriormente, se sobrepusieron las capas de límites estatales (INEGI, 2002), regiones ecológicas (Comisión para la Cooperación Ambiental, 1997), uso del suelo e influencia humana (SEMARNAT-CP, 2002), para establecer el comportamiento del contenido de COS con cada uno de estos temas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En total, se recolectaron 4583 muestras de suelo, la Da varía de 1.01 a 1.99 g cm^{-3} ; sin embargo, sólo a 1843 muestras del total se les determinó la Da, debido a que las restantes no conservaron su propiedad de agregación natural o por el laboreo en sistemas agrícolas. No obstante, con los resultados obtenidos, se generó un promedio nacional de 1.51 g cm^{-3} .

Los suelos de México presentan contenidos de CO que varían de 0.006 a 16.40% en el horizonte superficial (0 a 20 cm de profundidad), lo que muestra su heterogeneidad en los diferentes ambientes. El contenido de COS por unidad de superficie varía desde 0.2 hasta 493 Mg ha^{-1} ; de acuerdo con estos resultados, se generaron cinco clases de la siguiente forma: a) menos que 5; b) de 5 a 25; c) de 25 a 50; d) de 50 a 100; y e) mayor que 100 Mg ha^{-1} de COS, cuya distribución se muestra en el mapa temático tipo "raster" (Figura 1).

Para estimar el contenido de COS a nivel nacional, estatal, región ecológica, uso del suelo e influencia humana, se utilizaron los histogramas respectivos y se tomó el valor medio de cada clase, el cual se multiplicó por su respectiva superficie; estos valores medios de clase son: 2, 5, 15, 37.5, 75 y 300 Mg ha^{-1} C, este último valor surge a partir de que, como se señaló, el valor máximo encontrado es 493 Mg ha^{-1} (se redondeó a 500 Mg ha^{-1} de COS).

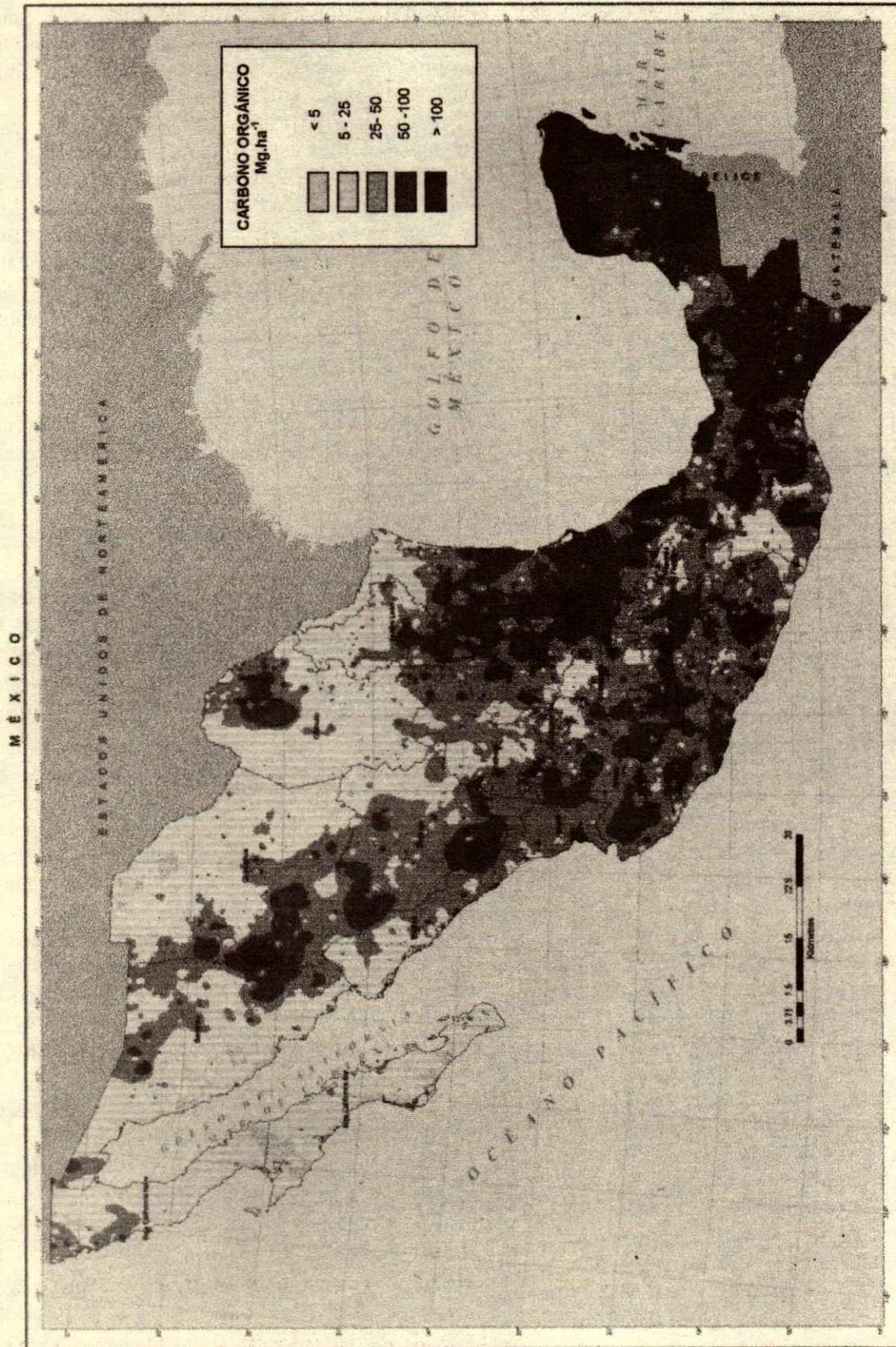


Figura 1. Contenido de carbono orgánico en la capa superficial (0 a 20 cm) de los suelos de México.

A nivel estatal, se determinó que los Estados que tienen un mayor contenido promedio de COS son Yucatán, Quintana Roo, Querétaro, Chiapas e Hidalgo, con más de 80 Mg ha⁻¹ de COS; mientras que los estados con el menor contenido de COS son: Baja California Sur, Baja California, Sonora, Coahuila y Tlaxcala, con menos de 30 Mg ha⁻¹ de CO (Cuadro 1).

Cuando se consideró la extensión de cada entidad federativa, se encontró que Chihuahua, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas y Campeche aportan 35% del COS de México. Lo anterior tiene relación con el clima que predomina en ellos, ya que en los estados con climas tropicales con alta pluviometría se ve favorecida la acumulación de materiales orgánicos; en cambio, en los de zonas áridas, el contenido disminuye. Estos resultados concuerdan con lo reportado por diversos autores (Sims y Nielsen, 1986; Grigal y Ohmann, 1992; Eswaran *et al.*, 1993; Homann *et al.*, 1998; Batjes, 1999; y Bockheim *et al.*, 1999), quienes señalaron que el clima, a través de la temperatura y la precipitación, juega un papel determinante en la acumulación del COS. Es probable que, en las regiones áridas y semiáridas de México, el contenido de C inorgánico del suelo (CIS) sea superior al de otras regiones, representando este CIS otra alternativa de acumulación de este elemento.

Este mismo comportamiento puede verificarse con el análisis realizado por regiones ecológicas mayores, que se encuentran delimitadas de acuerdo con la vegetación primaria dominante (INEGI, 2002). De este análisis, se encontró que los suelos de las selvas húmedas, de los manglares y de los bosques mesófilos de montaña aportan más de 100 Mg ha⁻¹ de CO; mientras que, en los pastizales, en los matorrales xerófilos y en los matorrales espinosos se observaron bajas aportaciones (menos de 30 Mg ha⁻¹ de CO).

De acuerdo con la superficie que ocupa cada región ecológica, los suelos de los bosques de coníferas y encinos, de las selvas húmedas y de las selvas secas aportan 70% del COS de México (Cuadro 2).

Estudios realizados en diversas partes del mundo indican que el tipo de vegetación es otro factor determinante en las evaluaciones del CO de los suelos; de tal manera que el contenido cambia con el tipo de vegetación, el tipo de material parental y los factores topográficos del área (Franzmeier *et al.*, 1985), así como el tipo de árbol y su edad (Grigal y Ohmann, 1992). Schlegel *et al.* (2001) señalaron que debe tomarse en cuenta al tipo de vegetación para

Cuadro 1. Contenido de COS promedio por Entidad Federativa.

Estado	CO [†]	COS [†]	Contribución al total
	Mg ha ⁻¹	Pg C	%
Aguascalientes	34.5	0.01	0.09
Baja California	20.3	0.14	1.32
Baja California Sur	16.0	0.11	1.04
Campeche	49.3	0.66	6.24
Coahuila	28.4	0.42	3.97
Colima	59.4	0.03	0.28
Chiapas	95.2	0.7	6.62
Chihuahua	63.4	0.93	8.79
Distrito Federal	64.2	0.01	0.09
Durango	48.5	0.59	5.58
Guanajuato	42.5	0.13	1.23
Guerrero	55.8	0.36	3.40
Hidalgo	81.7	0.16	1.51
Jalisco	54.7	0.43	4.06
Estado de México	52.6	0.11	1.04
Michoacán	63.0	0.36	3.40
Morelos	57.3	0.02	0.19
Nayarit	43.7	0.11	1.04
Nuevo León	36.9	0.23	2.17
Oaxaca	52.1	0.48	4.54
Puebla	48.4	0.16	1.51
Querétaro	111.6	0.13	1.23
Quintana Roo	186.8	0.73	6.90
San Luis Potosí	79.1	0.5	4.73
Sinaloa	32.4	0.18	1.70
Sonora	28.1	0.5	4.73
Tabasco	64.1	0.15	1.42
Tamaulipas	63.6	0.5	4.73
Tlaxcala	29.6	0.01	0.09
Veracruz	79.3	0.57	5.39
Yucatán	206.2	0.89	8.41
Zacatecas	36.9	0.27	2.55
Nacional	56.1	10.5	100

[†]CO = carbono orgánica; [†]COS = carbono orgánico del suelo, 1 Pg = 10¹⁵ g.

estratificar el ambiente en las evaluaciones de COS. Esto es una razón para mencionar que, en la evaluación de las emisiones de CO₂ de la biosfera a la atmósfera, debe incluirse tanto al suelo, como a la vegetación.

Por otra parte, al relacionar los principales usos del suelo con el contenido de COS, se estableció que aquellos que se destinan a la ganadería intensiva tienen el más elevado contenido de COS (más de 80 Mg ha⁻¹), seguido de los suelos forestales (más de 75 Mg ha⁻¹); mientras que los suelos con agricultura de riego presentan las menores cantidades de este elemento (40.8 Mg ha⁻¹). En el caso del uso urbano, la existencia de COS se cuantificó en las áreas que no están cubiertas completamente por asfalto; además,

Cuadro 2. Contenido de COS promedio de las Regiones Ecológicas Mayores de México.

Región ecológica mayor	Extensión	CO [†]	COS [‡]	Contribución al total
	%	Mg ha ⁻¹	Pg C	%
Bosques de coníferas y encinos	22.32	65.5	2.86	27.24
Bosques mesófilos de montaña	0.84	104.9	0.17	1.64
Chaparrales	0.61	30.6	0.04	0.35
Manglares	1.43	106.1	0.30	2.84
Matorrales espinosos	4.30	30.0	0.25	2.40
Matorrales submontanos	1.25	55.5	0.14	1.29
Matorrales xerófilos	39.86	24.0	1.88	17.83
Pantanos	0.32	62.0	0.04	0.37
Pastizales	0.18	21.4	0.01	0.07
Selvas húmedas	11.21	110.5	2.43	23.07
Selvas secas	17.68	69.6	2.41	22.91
Nacional	100	56.1	10.5	100

[†] CO = carbono orgánica; [‡] COS = carbono orgánico del suelo, 1 Pg = 10¹⁵ g.

este tipo de uso es el que menos aporta (0.53%) al total nacional.

A pesar de que en los suelos destinados a la ganadería extensiva se observa el contenido más alto de COS, su contribución es baja a nivel nacional, dada la escasa superficie destinada a ello (Cuadro 3). Por otra parte, se esperaría que los terrenos con ningún uso presentaran el contenido más bajo de COS, lo cual no sucedió debido a que, dentro de esta categoría, se consideraron áreas de bosques de coníferas, de regiones montañosas y selvas vírgenes donde el hombre prácticamente no ha intervenido.

De igual manera, al analizar el contenido de COS con el grado de influencia humana, se demuestra que, en la medida en que se incrementan las actividades humanas en los suelos, los valores de CO tienden a disminuir (Cuadro 4). Esto concuerda con los resultados reportados por Grigal y Ohmann (1992), quienes mencionaron que la variación del contenido

Cuadro 3. Contenido de COS según el uso del suelo.

Uso del suelo	Extensión	CO [†]	COS [‡]	Contribución al total
	%	Mg ha ⁻¹	Pg C	%
Agricultura de riego	6.41	40.8	0.51	4.76
Agricultura de temporal	15.92	71.2	2.22	20.66
Forestal	4.91	76.2	0.73	6.83
Pecuario extensivo	21.03	42.8	1.66	16.41
Pecuario intensivo	0.18	80.6	0.03	0.27
Urbano	0.54	54.5	0.06	0.53
Sin uso aparente	51.01	54.3	5.33	50.54
Total	100	10.5	100	100

[†] CO = carbono orgánica; [‡] COS = carbono orgánico del suelo, 1 Pg = 10¹⁵ g.

de COS puede estar relacionada con las actividades humanas.

Cabe señalar que la estimación de COS total de la República Mexicana varía entre 10.5 y 10.7 Pg CO según la forma en la que se agrupen las superficies (por estado, por región ecológica, por tipo de uso y por grado de influencia del hombre), mismas que, al ser multiplicadas por el valor medio de la clase, provocan diferencias en la estimación total. Por esta razón, se determinó que en la capa superficial (0 a 20 cm) de los suelos de México existen 10.5 Pg de COS y que, en promedio, hay 56 Mg ha⁻¹ de COS (provenientes del análisis estatal), que se generaron a través de la evaluación de 32 histogramas, correspondientes a las entidades federativas.

Con la información anterior, se cuenta con la distribución, en la capa superficial, del contenido de COS en México y su relación con divisiones estatales, regiones ecológicas, uso del suelo e influencia humana; sin embargo, falta por conocer dos aspectos: a) ¿Cómo influyen las condiciones ambientales, de uso y manejo en la dinámica del COS de México? y

Cuadro 4. Contenido de COS, de acuerdo con el grado de influencia del hombre.

Influencia humana	Extensión	CO [†]	COS [‡]	Contribución al total
	%	Mg ha ⁻¹	Pg C	%
Fuerte	4.78	40.1	0.38	3.50
Moderada	44.06	57.0	4.82	45.92
Ligera	51.16	54.1	5.32	50.58
Total	100	10.5	100	100

[†] CO = carbono orgánica; [‡] COS = carbono orgánico del suelo, 1 Pg = 10¹⁵ g.

b) ¿Cuál es la influencia del suelo y de la vegetación con respecto a las industrias, en el flujo de gases invernadero de la biosfera a la atmósfera? Es probable que, al contestar estas preguntas entre muchas otras, pueda evaluarse cuál es el impacto de los esfuerzos de captura de C en la República Mexicana.

CONCLUSIONES

- Los suelos de México tienen, en promedio, 1.8% de CO (3.1% de materia orgánica del suelo), lo que representa un contenido total de 10.5 Pg de CO en la capa superficial (de 0 a 20 cm de profundidad).

- Los estados que presentan el más alto contenido de COS son Yucatán, Quintana Roo y Campeche, lo cual está relacionado con el clima y con la vegetación dominante en ellos; lo mismo puede constatarse con el análisis de las regiones ecológicas, donde se observa que las selvas húmedas y secas tienen mayores contribuciones en comparación con las de climas áridos.

- En cuanto al uso del suelo, se encontró que con agricultura de riego hay el menor contenido de COS; mientras que los usos pecuario intensivo y forestal manifiestan los principales aportes; en la medida en que el hombre incrementa sus actividades (agrícolas, pecuarias y forestales) disminuye el contenido de CO en el suelo.

- Se recomienda estudiar el contenido de C inorgánico de los suelos (carbonatos totales), ya que éste debe ser más importante en las zonas áridas y semiáridas de México.

AGRADECIMIENTOS

Al personal de campo y laboratorio del Colegio de Postgraduados, por su valiosa participación en la colecta de muestras de suelo y en la realización del análisis de laboratorio: M.C. Elvia Moreno-Cáliz, Ing. Gabriela López-Ramírez, Ing. Ma. de Lourdes Lira-Quintero, Ing. Alberto Islas-López, Ing. Gustavo Cruz-Cárdenas, Ing. César Ramos-Méndez, Ing. Israel Segura-Castruita, M.C. Jerónimo Chavarría-Hernández, Biol. Patricia Hernández-Ramírez, Sr. Luis Zamora-Hernández, Sr. Candelario Ayala-Vergara, Sra. Felipa Hernández-Hernández, Sr. Pedro Torres-Flores, Sr. Sergio Prado-Almeraya y Srita. Carmen Bojorges-Bautista.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, J.D. Etchevers-Barra y A. Velásquez-Martínez. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Arrouays, D., W. Deslais, J. Daroussin, J. Balesdent, J. Gaillard, J.L. Dupoucy, C. Nys, V. Badaeu y S. Belkacem. 1999. Stocks de carbone dans les sols de France: quelles estimations? *C.R. Acad. Agric. Fr.* 85: 278-292.
- Batjes, N.H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163.
- Batjes, N.H. 1999. Management options for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Bockheim, J.G., L.R. Everett, K.M. Hinkel, F.E. Nelson y J. Brown. 1999. Soil organic carbon storage and distribution in arctic tundra, Barrow, Alaska. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 934-940.
- Comisión para la Cooperación Ambiental. 1997. Regiones ecológicas de América del Norte: Hacia una perspectiva común. Montreal, Canadá.
- De Jong, B.H.J., M.A. Cairns, P.K. Haggerty, N. Ramírez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, M. González-Espinosa, I. March-Mifsut. 1999. Land-use change and carbon flux between 1970s and 1990s in central highlands of Chiapas, Mexico. *Environ. Manage.* 23: 373-385.
- Diario Oficial de la Federación. 2000. Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000, que establezca las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestras y Análisis. Tomo DLXV,-12: 6-74. Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. Talleres Gráficos de México, México, D.F.
- Eswaran, H., E. van der Berg y P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 192-194.
- FAO (Food and Agricultural Organization). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Reporte 96. Roma, Italia.
- FAO/IIASA (Food and Agricultural Organization). 1999. World agro-ecological zoning. Rome, Italy.
- FAO/UNESCO/ISRIC (Food and Agricultural Organization). 1988. Soil Map of the World. Revised Legend. World Resources Report 60. Rome, Italy.
- Franzmeier, D.P., G.D. Lemme y R.J. Miles. 1985. Organic carbon in soils of the North Central United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 702-708.
- Grigal, D.F. y L.F. Ohmann. 1992. Carbon storage in upland forests of the Lake States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 935-943.
- Homann, P.S., P. Sollins, M. Fiorella, T. Thorson y J.S. Kern. 1998. Soil organic carbon in a mountainous, forested region: Relation to the site characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1468-1475.
- Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B. Lim, K. Treanton, I. Mamaty, Y. Bonduki, D.J. Griggs y B.A. Callender. 1997. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Reference Manual Volume 3. Intergovernmental Panel on Climatic Change. Ginebra, Suiza.

- Howard, P.J.A., P.J. Loveland, R.I. Bradley, F.T. Dry, D.M. Howard y D.C. Howard. 1995. The carbon content of soil and its geographical distribution in Great Britain. *Soil Use Manage.* 11: 9-15.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1995. Espacio-mapas escala 1:250 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1999. Agenda estadística de los Estados Unidos Mexicanos. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000. Cartas topográficas escala 1:250 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2002. Coberturas digitales de límites estatales a escala 1:250 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Kern, J.S. 1994. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 439-455.
- Masera, O.R. 1995. Carbon mitigation scenarios for Mexican forests: Methodological considerations and results. *Interciencia* 20(6): 388-395.
- Moraes, J.L., F. Seyler, C.C. Cerri y B. Volkoff. 1998. Land cover mapping and carbon pools estimates in Rondonia, Brazil. *Int. J. Remote Sensing* 19: 921-934.
- Ortiz-Villanueva, B. y C.A. Ortiz-Solorio. 1990. Edafología. 7a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Post, W.M., W.R. Emanuel, P.J. Zinke y A.F. Stangenberger. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 258: 156-159.
- Post, W.M., T.H. Peng, W.R. Emanuel, A.W. King, V.H. Dale, y D.L. DeAngelis. 1990. The global carbon cycle. *Am. Sci.* 78: 310-326.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1994. Inventario Nacional Periódico: Memoria Nacional. Subdirección Forestal y de la Fauna Silvestre. México, D.F.
- Schlegel B., J. Gayoso y J. Guerra. 2001. Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- SEMARNAT-CP (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas). 2002. Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la República Mexicana a escala 1:250 000. Información complementaria a la Memoria Nacional. (CD Sitios de muestreo y datos analíticos). México, D.F.
- Sims, Z.R. y G.A. Nielsen. 1986. Organic carbon in Montana soils as related to clay content and climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1269-1271.
- Sombroek, W.G., F.O. Nachtergaele y A. Hebel. 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22: 417-426.
- Van Bremen, N. y T.C.J. Feijtel. 1990. Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gases, with special relevance to soil taxonomic system. pp. 195-220. *In: Bouwman, A.F. (ed.). Soil and the greenhouse effect.* Wiley. Chichester, UK.
- Walkley, A. y C.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.

RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS UTILIZANDO PLANTAS Y MICROORGANISMOS RIZOSFÉRICOS[†]

Remediation of Soils Polluted with Heavy Metal Using Plants and Rhizospheric Microorganisms

Ma. del Carmen Ángeles González-Chávez¹

RESUMEN

En México, al igual que en muchos países, la prevención de la contaminación del ambiente (suelo, agua y aire) y su recuperación es una prioridad. La Biotecnología del Suelo nace como una rama trascendental dentro de la Ciencia del Suelo, y los resultados muestran el enorme potencial de los microorganismos del suelo, en el mejoramiento de la calidad del suelo, degradación e inmovilización de contaminantes, su efecto en el crecimiento y en la protección de las plantas frente a diferentes factores. Como resultado, se incrementa el interés de los investigadores por la aplicación de los microorganismos en diferentes áreas. Dentro de los métodos biológicos de recuperación de suelos contaminados por metales pesados, metaloides y otros contaminantes, el uso de plantas y microorganismos rizosféricos representa una alternativa de bajo costo y con enormes ventajas ambientales. Las tecnologías que consideran el uso de estos organismos son llamadas: fitorecuperación y biorecuperación, respectivamente. Se resumieron las principales alternativas biológicas que pueden usarse para la descontaminación y recuperación de suelos contaminados por metales pesados. Se hizo énfasis que el uso de plantas requiere considerar a sus microorganismos simbióticos mutualistas de la rizosfera.

Palabras clave: *microorganismos simbióticos, micorriza, Rhizobium, elementos potencialmente tóxicos.*

[†] Este trabajo forma parte del proyecto SEMARNAT-CONACYT CO1-2002-739.

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, estado de México. (carmeng@colpos.mx)

Recibido: Marzo de 2003. Aceptado: Agosto de 2004.

Publicado como ensayo en *Terra Latinoamericana* 23: 29-37.

SUMMARY

Prevention and remediation of environmental contamination (soil, water, and air) is a relevant issue in many regions of the world. In the last decade, Soil Biotechnology became a transcendental branch of Soil Science. The scientific interest for the application of microbes in different areas has arisen. This is due to the soil microorganism potential in soil quality improvement, degradation and immobilization of contaminants, plant growth, and plant protection under different conditions. Use of plants and microorganisms (phyto and bio-remediation, respectively) in the biological processes of metal (loids)s polluted soil remediation is a cheap, environment-friendly biological alternative. The objective of this paper is to summarize the main biological alternatives that can be used to decontaminate and remediate metal(loids)s polluted soils. Particular emphasis on the use of symbiotic soil microorganisms is made.

Index words: *symbiotic microorganisms, mycorrhiza, Rhizobium, potentially toxic elements.*

Tecnologías de Biorrecuperación en Suelos Contaminados

Biorrecuperación: Alternativa biológica que usa de microorganismos vivos o sus metabolitos para acumular, transformar o degradar contaminantes (Bandyopadhyay *et al.*, 1994).

Las tecnologías tradicionales para la recuperación de suelos contaminados con elementos potencialmente tóxicos (EPTs) utilizan métodos de ingeniería y tratamientos químicos. [EPT: Elementos potencialmente tóxicos, término menos impreciso para nombrar a los metales pesados. Este vocablo incluye a los elementos esenciales, los cuales bajo ciertas concentraciones empiezan a ser tóxicos para los organismos vivos, y a aquellos elementos que son considerados tóxicos (Cd y Pb), aun a concentraciones

minimas (Gadd, 1993)]. Los métodos de ingeniería consideran la excavación y los rellenos sanitarios, lavado del suelo, tratamientos térmicos y eléctricos. Los tratamientos químicos incluyen la adición de fosfatos, sustancias altamente adsorbentes (zeolitas, aminosilicatos, etc), encalado y agentes quelatantes. Estas alternativas tienen limitaciones económicas y de riesgo (Vangronsveld y Cunningham, 1998).

Las tecnologías biológicas involucran el uso de microorganismos y plantas para remover, contener o retener contaminantes ambientales sin causar daño (Cunningham y Lee, 1995). Las tecnologías biológicas se han utilizado para el tratamiento de varios tipos de contaminantes del suelo y del agua, como: hidrocarburos, plaguicidas, sustancias radiactivas y otro tipo de contaminantes orgánicos; sin embargo, su uso en la remediación de suelos contaminados con EPTs, como son los metales pesados y metaloides, es de reciente aplicación (Bollag y Bollag, 1995).

La bio y fitorecuperación son alternativas que causan interés, por ser más económicas que la tecnología de ingeniería o las que utilizan procesos físicos y químicos. La fito y biorecuperación *in situ* reducen el riesgo de exposición para el personal que limpia y transporta el material contaminado. El impacto ambiental es mínimo, porque estas alternativas son procesos naturales y útiles para la completa transformación de una amplia variedad de contaminantes (no es el caso para los EPTs). Además, puede recuperarse un sitio sin causar perturbación en sus actividades normales (Skladany y Metting, 1993; Cunningham y Lee, 1995).

Las alternativas biológicas son aplicables cuando los contaminantes se encuentran cerca de la superficie y no son lixiviabiles, o cuando la remoción de los contaminantes no es una situación de emergencia, o bien, si se requiere de disminuir el riesgo, ya que puede cubrir extensas áreas (Stomp *et al.*, 1994). Sin embargo, para alcanzar el éxito debe realizarse la selección de especies microbianas adaptadas a las condiciones de contaminación.

Algunas desventajas que las tecnologías biológicas presentan son: (1) la necesidad de mantener las condiciones de crecimiento microbiano en el sitio de contaminación, lo cual es difícil, en particular porque las condiciones varían de un sitio a otro, pero la selección de especies microbianas adaptadas puede realizarse; (2) otra desventaja es, que el ambiente contaminado puede tener otras sustancias u organismos que inhiben el crecimiento de la población

microbiana deseada y afectar la eficiencia del proceso; y finalmente (3) algunos de los procesos biológicos que requieren de los microorganismos son muy específicos (Skladany y Metting, 1993). Sin embargo, los grupos de investigación están considerando estos factores y tratan de encontrar las mejores condiciones para explotar estas tecnologías amigables con el ambiente y de bajo costo.

Las plantas se utilizan como sistemas directos o indirectos de descontaminación. En el primer caso, las plantas participan en la modificación del contaminante a través de la absorción, secuestración o acumulación. En el segundo, los diversos microorganismos rizosféricos, que se asocian a las raíces de las plantas (bacterias, hongos, actinomicetes y cianobacterias), actúan sobre los contaminantes (Stomp *et al.*, 1994). Es relevante señalar que en el caso de los EPTs, a diferencia de los compuestos orgánicos, éstos no se degradan, sino sólo se modifican para disminuir su disponibilidad, toxicidad y riesgo dentro de la cadena trófica.

La fitorecuperación [Fitorrecuperación: Uso de especies vegetales para el saneamiento del terreno (Walton *et al.*, 1994)] se considera una herramienta novedosa para resolver un problema común en varias partes del mundo (Dushenkov *et al.*, 1997). Ésta se basa en los procesos de fitoextracción [Bio o fitoextracción: Proceso que considera la absorción y acumulación de un contaminante por microorganismos o plantas, respectivamente, y su posterior cosecha y destrucción del contaminante (Cunningham *et al.* 1995)] o fitoestabilización [Bio o fitoestabilización: Proceso que involucra la retención de contaminantes en el suelo (Cunningham *et al.* 1995)].

En el primer proceso, la concentración del contaminante en el suelo disminuye por la marcada extracción de la planta. Esta tecnología se basa en la particularidad de que algunas plantas poseen mecanismos para absorber, translocar y tolerar cantidades significantes del contaminante que para otras especies serían tóxicas. Por esta razón, estas plantas pueden sobrevivir en ambientes fuertemente contaminados, donde otras plantas sin estos mecanismos morirían (Raskin *et al.* 1994; Cunningham y Lee, 1995).

En contraste, la estabilización no reduce la cantidad del contaminante en el sitio, sino que disminuye la disponibilidad y, principalmente, reduce los riesgos ambientales y de salud humana. La disponibilidad del contaminante se abate a niveles

aceptables por secuestración o sorción (adsorción) de los contaminantes en la matriz del suelo (Cunningham *et al.*, 1995).

En la rizosfera hay expresión de relaciones simbióticas mutualistas entre microorganismos y plantas, debido a la exudación de nutrimentos orgánicos útiles para el metabolismo microbiano y a que la raíz proporciona un nicho ecológico. Los microorganismos, a la vez, participan en numerosos beneficios, como: influencia en el crecimiento radical, regulación de la actividad metabólica de la raíz e influencia en las propiedades físicas y químicas del suelo, así como de los contaminantes (Curl y Truelove, 1986; Stomp *et al.*, 1994).

El uso de plantas en la recuperación de suelos contaminados es relevante, porque la mayoría de las plantas participarán parcialmente en el control de la erosión por viento y lluvia. Por un lado, existe la posibilidad de recuperación del suelo contaminado y, por otro lado, simultáneamente, el reestablecimiento de la vegetación en dicha área (Cunningham y Lee, 1995; Colpaert, 1998), por lo cual, a largo plazo, la recuperación del suelo a través de la fitorrecuperación será sinónimo de reestablecimiento, revegetación y rehabilitación de áreas con alta perturbación (términos que se han utilizado como sinónimos, pero que consideran diferentes procesos y metas).

Es obvio que dentro de la tecnología de la fitorecuperación, los microorganismos simbióticos mutualistas que se asocian a las raíces de las plantas deben considerarse, porque existen evidencias de su participación en la rizosfera (Shetty *et al.*, 1994; Stomp *et al.*, 1994; Berthelin *et al.*, 1995; Colpaert, 1998; Van der Lelie, 1998).

Participación de Plantas y Microorganismos en la Recuperación de Suelos Contaminados

Plantas. Fitorrecuperación requiere del establecimiento rápido de una cobertura vegetal abundante; sin embargo, la alta concentración de EPTs será la principal limitante para el crecimiento de las plantas, debido a que las especies vegetales difieren, ampliamente, en su tolerancia a éstos. Para los fines de recuperación de suelos contaminados, se prefiere el uso de plantas tolerantes, ya que esto influenciará el éxito de la recuperación de suelos (Smith y Bradshaw, 1970; Berti *et al.*, 1998; Li y Chaney, 1998; Schat y Verkleij, 1998).

Los resultados de Vangronsveld (1998) demuestran que después del uso de un agente secuestrante

(beringita), composta y plantas tolerantes (*Agrostis capillaris* y *Festuca rubra*) se logró la revegetación de un sitio que tuvo actividad piro metalúrgica en Bélgica. Después de este tratamiento, una amplia cobertura vegetal se desarrolló en el área, resultado que aún se mantiene después de más de 13 años del tratamiento inicial. Otro ejemplo, en suelos salinos, que se regaron con aguas residuales con altas concentraciones de EPTs (As, B, Mo, Se, U y V), se requirió del uso de plantas tolerantes a la salinidad. Plantas como: *Sporobolus airoides*, *Elytrigia pontica*, *Oryzopsis hymenoides*, *Astragalus bisulcatus* y *A. racemosus* se establecieron exitosamente en estos sitios (Retana *et al.*, 1993).

Especies herbáceas, arbustivas y árboles pueden utilizarse en las prácticas de recuperación de suelos contaminados por EPTs. Algunos ejemplos son: *Anthoxanthum odoratum*, *Agrostis canina*, *A. capillaris*, *A. stolonifera*, *Deschampsia cespitosa*, *D. flexuosa*, *Festuca rubra*, *F. ovina*, *Holcus lanatus* y *Silene vulgaris* (Baker y Brooks, 1989).

Los árboles también son candidatos en las prácticas de recuperación, pero las consecuencias ecológicas de su uso difieren con relación a las plantas herbáceas. Esto se debe a su forma de crecimiento, composición química y longevidad. En los árboles, la retención de EPTs es en los tejidos perennes, por lo que el tiempo para entrar al ciclo de descomposición es mayor. En consecuencia, los árboles tienen la capacidad de inmovilizar EPTs, en compartimentos metabolitamente inactivos, por periodos más largos, en comparación con plantas herbáceas. En éstas, los brotes muestran parcial o total pérdida y descomposición, así los EPTs ingresan de nuevo al proceso biogeoquímico en el suelo (Colpaert, 1998).

Los árboles con altas posibilidades de éxito en la fitorecuperación son *Pinus* y *Betula*, las cuales son especies pioneras en suelos contaminados. Estas especies son micotróficas obligadas, por lo que necesitan a los hongos ectomicorrízicos asociados a su raíz, para su adecuado desarrollo (ver más adelante). Especies de *Acer* se asocian con los hongos arbusculares, mientras que especies de *Salix* lo hacen, tanto con los hongos ectomicorrízicos, como con los hongos arbusculares (Colpaert, 1998). La dependencia por los hongos ectomicorrízicos o endomicorrízicos es una característica relevante que auxilia a las plantas a sobrevivir en sitios contaminados (González-Chávez, 2004).

Plantas hiperacumuladoras. El uso de este tipo de plantas es relevante en el proceso de fitoextracción.

En numerosos casos, acumulación e hiperacumulación son términos que se utilizan como sinónimos; sin embargo, éstos son diferentes. Las plantas hiperacumuladoras son capaces de acumular excesivas cantidades de EPTs en su follaje (> 1% del peso seco de la planta). Este mecanismo implica alta tolerancia específica a metales pesados, los cuales están presentes en el suelo en concentraciones que normalmente podrían considerarse fitotóxicas (Baker y Brooks, 1989). El uso de plantas hiperacumuladoras con fines de biorremediación de suelos contaminados es una práctica reciente con enormes avances en varios países. Esto se debe a que representa una alternativa viable y redituable (Cunningham *et al.*, 1995). Sin embargo, las plantas hiperacumuladoras son endémicas de áreas contaminadas, presentan lento crecimiento y poca producción de materia vegetal, por lo que varios investigadores están en la búsqueda constante de especies con alta capacidad acumuladora, rápido crecimiento vegetal y abundante producción de materia verde. Otra característica de la mayoría de las especies hiperacumuladoras es que no son micorrízicas como *Thlaspi* y *Alyssum*. Sin embargo, *Viola calaminaria* y *V. guesphalica*, especies metalofitas de suelos contaminados con altas concentraciones de Zn, presentan altos grados de colonización por hongos micorrízicos arbusculares (Hildebrandt *et al.*, 1999). Un aspecto interesante de resaltar es el poco conocimiento que se tiene sobre la importancia y la función de la simbiosis en este tipo de plantas y que requiere de estudiarse con profundidad.

Ebs *et al.* (1997) realizaron una selección de 300 tipos de especies vegetales con capacidad acumuladora. Las especies de *Brassica* fueron las más efectivas en remover Zn, especialmente, por su mayor producción de biomasa (10 veces más) que *Thlaspi caerulescens* (planta hiperacumuladora). Otras plantas que muestran capacidad para acumular EPTs son: girasol, sauce, álamo, alfalfa, maíz, tabaco, sorgo y amaranto (Wenzel *et al.*, 1999).

Microorganismos. Algunos microorganismos tienen la habilidad de desarrollarse en ambientes extremadamente contaminados y pueden ser capaces de alterar el estado químico, la forma o distribución de los EPTs en el suelo (Erlich y Brierley, 1990; Skladany y Metting, 1993). Como resultado, éstos deben considerarse en los diferentes procesos de recuperación de áreas contaminadas (Lepp, 1992; Gadd, 1993). Aun cuando los microorganismos

incluyen menos de 3% del carbono orgánico del suelo y ocupan sólo 0.001% del volumen del suelo (Jenkinson y Ladd, 1981; Sparling, 1985), ellos son la maquinaria bioquímica que maneja los procesos químicos de transformación, secuestro y acumulación de los EPTs en el suelo (Turco y Sadowsky, 1995).

Las bacterias y los hongos son los que principalmente se involucran en la mayoría de los procesos del suelo, así como en la degradación de compuestos orgánicos y la transformación de EPTs (Bollag *et al.*, 1994). Las bacterias representan la mayor diversidad en el suelo y se distribuyen en todos los ambientes vivos (Walton *et al.*, 1994). Su rápido crecimiento y metabolismo las ubican como importante alternativa en el proceso de recuperación. Las bacterias tienen, en general, una amplia capacidad para acumular metales en su biomasa. Por otro lado, los hongos filamentosos tienen, además, la característica de invadir el suelo por medio de la extensión de su micelio e incrementar la superficie de exploración y acción.

Aunque los actinomicetos, hongos micorrízicos arbusculares y las cianobacterias forman parte del complejo microbiano de suelos altamente contaminados (González-Chávez *et al.*, 2000a), relativamente poca investigación se conduce en estos grupos microbianos y, por lo tanto, poco se conoce de su participación en los procesos de descontaminación de los EPTs y otros compuestos tóxicos. Estos grupos microbianos se asocian con las raíces de las plantas, en consecuencia su influencia no debería ignorarse.

Resulta relevante hacer énfasis que ciertos grupos microbianos tienen múltiples funciones y propiedades que ofrecen dentro de la biotecnología de la recuperación de suelos, como, por ejemplo: su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico, solubilizar fósforo, producir antibióticos, sustancias promotoras del crecimiento, sideróforos y sustancias con actividad surfactante. Esto permite a la planta obtener ventajas adicionales de la asociación con estos microorganismos.

Es posible aislar bacterias tolerantes de suelos con altas concentraciones de EPTs, ya sea por contaminación humana o de origen natural (Van der Lelie, 1998). Las bacterias más comúnmente aisladas de ambientes contaminados por el hombre con EPTs son: *Burkholderia pickettii*, *B. solanacearum* y *Alcaligenes eutrophus*. Las bacterias aisladas de suelos naturalmente contaminados con EPTs, pertenecen a varios géneros. Algunos ejemplos son: *Burkholderia*, *Hafnia*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*,

Comamonas y *Agrobacterium*. Especies Gram positivas también se encuentran en estos ambientes, por ejemplo: *Arthrobacter ramosus* y *A. aureus*. Existen reportes, tanto a nivel piloto, como a mayor escala, del uso de bacterias acumuladoras de EPTs en diversos procesos para limpiar aguas contaminadas con múltiples EPTs en solución (Volesky, 1997). Un gran número de los procesos a mayor escala involucraron el uso de células inmovilizadas y creciendo activamente en biopelículas sobre materiales inertes. Este tipo de tecnologías no se ha probado en la recuperación de suelos, a pesar de que representan una alternativa altamente viable.

Sizova *et al.* (2001) concluyeron que el uso de especies de *Pseudomonas* (*P. fluorescens* 38a, *P. putida* 53a y *P. aureofaciens* BS1393) incrementaron la supervivencia de sorgo en un suelo contaminado con arsenito. Estas bacterias también presentaron la característica de ser antagonistas contra un amplio número de hongos fitopatógenos y ser promotoras del crecimiento de esta planta.

Recientemente, ante la búsqueda de tecnologías novedosas para la expedita remediación de suelos contaminados con EPTs, el uso de productos microbianos se plantea como una biotecnología más para remover estos contaminantes presentes en el suelo. Por ejemplo, los sideróforos, los cuales son componentes extracelulares de microorganismos, que secuestran y solubilizan hierro; sin embargo, en adición al Fe, otros metales como el Cd, Cu, Ni, Pb y Zn pueden ser enlazados y formar complejos estables (Barton y Hemming, 1993). Otro ejemplo son los surfactantes que también tienen la capacidad de remover EPTs del suelo (Torrens *et al.*, 1998). Maier (1995) demostró que *Pseudomonas aeruginosa* produce biosurfactantes que acomplejan Cd, Pb y Zn, tanto de soluciones, como del suelo. Torrens *et al.* (1998) demostraron que en diferentes tipos de suelo los biosurfactantes removieron hasta 80% de cadmio. En consecuencia, estas sustancias son de particular interés, porque son productos naturales y se degradan fácilmente. Los producen microorganismos en una amplia variedad estructural con el potencial para su producción *in situ*, y tienen alta actividad y selectividad por EPTs en comparación con surfactantes sintéticos (Herman *et al.*, 1995).

También, se conoce que los hongos, las bacterias y las algas acumulan metales y sustancias radiactivas por medio de mecanismos físicos, químicos y biológicos, los cuales incluyen el enlace de los contaminantes a

nivel extracelular; por la producción de metabolitos y biopolímeros, unión a polipéptidos específicos y por acumulación dependiente del metabolismo (Tobin *et al.*, 1993). Uno de los procesos más importantes con relevante potencial en la biotecnología de la descontaminación es la biosorción, proceso de secuestro de metales independientes del metabolismo y que funciona en la pared celular. Con este proceso, numerosos microorganismos se utilizan como biosorbentes comerciales para la limpieza de aguas contaminadas con EPTs; sin embargo, su uso en la recuperación de suelos no se ha explotado aún comercialmente, lo que representa una alternativa más con alto potencial de uso.

Microorganismos simbióticos mutualistas del suelo. Los hongos que se establecen en las raíces de las plantas, que forman micorriza arbuscular, y otros mutualistas de la rizosfera (*Rhizobium* y *Azospirillum*) representan un promisorio elemento microbiológico en la recuperación de suelos contaminados. Varios reportes mencionan que los hongos micorrízicos auxilian a las plantas a establecerse y crecer en condiciones de estrés, como: suelos salinos, contaminados con metales pesados, plaguicidas e hidrocarburos y también las protegen contra enfermedades de la raíz (Leyval y Binet, 1998; Cabello, 1999; Binet *et al.*, 2000; González-Chávez, 2000a,b; 2004; González-Chávez *et al.*, 2002a).

Jasper (1994) mencionó que los hongos micorrízicos arbusculares, *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter* y *Frankia* son importantes componentes microbianos que disminuyen las limitaciones para el crecimiento de las plantas en suelos contaminados con EPTs. Las leguminosas fijan nitrógeno atmosférico y son capaces de establecerse en suelos contaminados por EPTs (González-Chávez, 2000a), pero su relación con sus simbiontes rizosféricos no se ha considerado.

Hace una década, se sugirió el uso de los hongos micorrízicos en programas de recuperación de áreas contaminadas (Hetrick *et al.*, 1994; Pflieger *et al.*, 1994; Shetty *et al.*, 1994); sin embargo, hasta la fecha esto empieza a ser una realidad, porque ahora se entiende mejor la función de estos hongos en suelos contaminados. Akhilesh-Kuman *et al.* (1999) y González-Chávez *et al.* (2002b) mencionaron que los hongos micorrízicos representan un complemento del sistema radical, lo que permite a las plantas adquirir nutrientes esenciales para el crecimiento, aun en condiciones de estrés. Esto resulta en mayor tolerancia de las plantas a estas condiciones, incremento del

transporte de agua, disminución en el efecto de pH desfavorables, tolerancia a patógenos e incremento en la fecundidad y vitalidad de las plantas.

El uso de hongos micorrizicos en la biorremediación de suelos contaminados con compuestos orgánicos ha recibido considerable investigación (Donnelly y Fletcher, 1994; Donnelly y Entry, 1999); sin embargo, con EPTs la investigación requiere mayor atención, principalmente, porque un gran número de especies vegetales que se desarrollan en suelos altamente contaminados son naturalmente micorrizicas. La colonización de estos hongos es una regla, más que una excepción, en la mayoría de las plantas terrestres (Smith y Read, 1997).

Los tipos de micorriza que son de principal interés en suelos contaminados con EPTs son: (a) la ectomicorriza (relación entre especies arbóreas y basidiomicetes/ascomicetes); (b) la micorriza arbuscular (más de 80% de las especies vegetales; se incluyen: herbáceas, algunos arbustos y árboles, y hongos del phylum Glomeromicetes), y (c) la micorriza cricoide (Ascomicetes y miembros de la familia Ericaceae).

Los estudios de Bradley *et al.* (1981; 1982) demostraron claramente que los hongos simbioses que se asocian a las Ericaceas confieren tolerancia a cobre a especies como: *Calluna vulgaris*, *Vaccinium macrocarpum* y *Rhododendron ponticum*. El principal mecanismo que se sugirió fue la participación del micelio extraradical en el secuestro de iones y la, consecuente, disminución en la disponibilidad de estos contaminantes en el suelo. Sharples *et al.* (1999) observaron que el hongo *Hymenoscyphus ericae* (que forma micorriza de tipo Ericoide) presenta baja sensibilidad a arsenato y esto ofrece, a su planta hospedante, la capacidad para colonizar y sobrevivir en ambientes contaminados.

Los hongos ectomicorrizicos también participan en la bioestabilización de EPTs en el suelo y la rizosfera. La capacidad del micelio para secuestrar estos elementos y prevenir la translocación a los brotes parece ser el principal mecanismo involucrado. Como resultado, los síntomas de toxicidad por EPTs disminuyen en las plantas hospedantes de estos hongos (Denny y Wilkins, 1987). Stomp *et al.* (1994) sugirieron que los árboles y los numerosos microorganismos asociados a su rizosfera (bacterias, hongos ectomicorrizicos, arbusculares, actinomicetes, cianobacterias) presentan ventajas para la biorremediación. Sin embargo, no se ha realizado investigación sobre la participación global de los

microorganismos rizosféricos en árboles. La asociación ectomicorrizica es común en árboles de interés ecológico y económico, como *Quercus*, *Eucalyptus*, *Betula*, *Pinus rigida* y *Picea abies* (Denny y Wilkins, 1987; Wilkins, 1991), por lo cual es importante entender los procesos que ocurren durante la exposición a los contaminantes.

En relación con hongos arbusculares, los mecanismos para conferir tolerancia EPTs a sus plantas hospedantes son poco entendidos. Recientemente, González-Chávez *et al.* (2002c) mostraron que el micelio de estos hongos es capaz de acumular altas concentraciones de Cu y As, lo cual participaría en menor toxicidad de estos EPTs a sus plantas hospedantes. Sánchez-Viveros *et al.* (2004) también observaron que las esporas de estos hongos son capaces de secuestrar Cu, aparentemente la quitina, principal componente estructural, participa en la sorción de este elemento. González-Chávez *et al.* (2002b) mostraron que los hongos arbusculares, independientemente de su tolerancia, reducen la utilización de arsénico en plantas tolerantes y no tolerantes de *Holcus lanatus*. Esto es, una planta no tolerante puede establecerse en sitios contaminados cuando sus raíces están colonizadas por estos hongos y una planta tolerante puede ser "más tolerante" al estar colonizada, siendo la regulación de As:P el mecanismo fúngico más importante (González-Chávez *et al.*, 2002b). Hetrick *et al.* (1994) mostraron que estos simbioses fueron primordiales para el establecimiento y crecimiento de *Andropogon gerardii* en sitios cercanos a minas; además, observaron que, en plantas colonizadas, el zinc se acumuló en alta concentración en las raíces, pero no en brotes. Otras plantas que también se encuentran en sitios contaminados y que establecen naturalmente la simbiosis arbuscular son: *Agrostis capillaris*, *Festuca rubra*, *F. arundinaceae* y *Deschampsia flexuosa* (González-Chávez, 2002a,b; González-Chávez *et al.*, 2002b,c; Hildebrandt *et al.*, 1999; Pawlowska *et al.*, 1996; Hetrick *et al.*, 1994).

La posibilidad del uso de hongos micorrizicos en la remediación de suelos se basa en estudios que demuestran que las plantas inoculadas tienen mayor oportunidad de supervivencia al trasplantarse al sitio contaminado, que plantas no inoculadas (Lambert y Cole, 1980; Dehn y Schuepp, 1989).

En general, los suelos contaminados tienen diversas limitaciones, como bajos valores de elementos esenciales o baja disponibilidad, y baja agregación del suelo, los cuales son factores que afectan, en forma

negativa, el establecimiento de las plantas y, en consecuencia, la recuperación de los sitios (Dodd *et al.*, 2002; Jeffries *et al.*, 2003). El uso de los hongos puede auxiliar a aliviar algunas de estas limitaciones (González-Chávez, 2004). Existen evidencias que algunas plantas en situaciones no estresadas son micotróficas facultativas, lo que significa que sus raíces se colonizan por hongos arbusculares, pero obtienen poco o ningún beneficio de la asociación. En contraste, en condiciones estresantes como la contaminación, estas plantas por su asociación a estos hongos obtienen múltiples beneficios de protección y nutrición. Por ejemplo, la nutrición fosforada mejora, por una mayor superficie de absorción del micelio externo en el suelo. Mayor tolerancia a arsénico resulta de la habilidad de hongos tolerantes a restringir la utilización de arsenato, tanto en plantas tolerantes, como no tolerantes al arsénico (González-Chávez *et al.*, 2002b).

El micelio externo desarrolla una función importante en el suelo: participa en el ciclo de nutrimentos de los ecosistemas, en la agregación de partículas del suelo y en la estabilidad de los agregados (Wright y Upadhyaya, 1998; Dodd *et al.*, 2000). En relación con este último proceso, recientemente se descubrió que las hifas de todos los hongos arbusculares producen y excretan al suelo una proteína, la glomalina, que es la que actúa como cementante en el suelo. González-Chávez *et al.* (2004) reportaron que esta proteína también se involucra en el secuestro de EPTs, en hifas, raíces y suelo.

CONCLUSIONES

La información planteada muestra que la interacción planta-microorganismos rizosféricos necesita considerarse para incrementar el éxito de las alternativas biológicas que utilicen plantas en la recuperación de suelos contaminados con EPTs.

A diferencia de las alternativas biológicas utilizando plantas para la limpieza de aguas y de suelos contaminados con sustancias orgánicas, la recuperación de suelos contaminados con EPTs considerando los microorganismos simbióticos de la rizosfera es claramente un campo nuevo, presenta un enorme potencial de uso, pero requiere de mayor investigación. La utilidad de los microorganismos rizosféricos dependerá básicamente del nivel de contaminación, del tipo de contaminante del suelo y de los objetivos establecidos para la recuperación. Es

necesario proponer nuevos métodos adecuados para remediar los suelos contaminados que consideren el manejo de prácticas agronómicas como: uso de fertilizantes, aplicación de abonos verdes, labranza, compostas y vermicompostas, que favorezcan y aceleren la recuperación de áreas contaminadas. Para lograr esto, se requiere del entendimiento de los factores químicos, físicos y biológicos que afectan las vías de biotransformación, lo cual exige la participación interdisciplinaria para la resolución de los problemas complejos involucrados en la biorrecuperación de suelos contaminados por EPTs (metales pesados).

LITERATURA CITADA

- Akhilesh-Kuman, N., R.S. Upadhyaya y A. Kumar. 1999. VA mycorrhizae and revegetation of coal mine spoils: A review. *Trop. Ecol.* 40: 1-10.
- Baker, A.J.M. y R.R. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1: 81-126.
- Bandyopadhyay, S., S.K. Bhattacharya y P. Majundar. 1994. Engineering aspects of bioremediation. pp. 55-75. *In: Wise, D.L. y D.J. Trantolo (eds.)*. Remediation of hazardous waste contaminated soil. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Barton, K.K. y B.B. Hemming. 1993. Iron chelation in plants and soil microorganisms. Academic Press. London, UK.
- Berthelin, J., C. Munier-Lamy y C. Leyval. 1995. Effect of microorganisms on mobility of heavy metals in soils. pp. 3-17. *In: Huang, P.M., J. Berthelin, J.M. Bollag, G.B. McGill y A.L. Page (eds.)*. Environmental impact of soil component interactions. Vol. 2: Metals, other inorganics, and microbial activities. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.
- Berti, W.R., E.M. Cooper, S.D. Cunningham y J. Vangronsveld. 1998. Field implementation - Practical consideration. pp. 215-228. *In: Vangronsveld, J. y S.D. Cunningham (eds.)*. Metal-contaminated soils: *In situ* Inactivation and phytoremediation. R.G. Landes Company. Georgetown, TX.
- Binet, Ph., J.M. Portal y C. Leyval. 2000. Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the rhizosphere and mycorrhizosphere of regrass. *Plant Soil* 227: 207-213.
- Bollag, J.M. y W.B. Bollag. 1995. Soil contamination and the feasibility of biological remediation. pp. 1-12. *In: Bioremediation: Science and applications*. Special Publication 43. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Bollag, J.M., T. Mertz y L. Otuen. 1994. Role of microorganisms in soil bioremediation. pp. 2-10. *In: Anderson, T.A. y J.R. Coats (eds.)*. Bioremediation through rhizosphere technology. American Chemical Society. Washington, DC.
- Bradley, R., A.J. Burt y D.J. Read. 1981. Mycorrhizal infection and resistance to heavy metal toxicity in *Calluna vulgaris*. *Nature* 292: 335-337.
- Bradley, R., A.J. Burt y D.J. Read. 1982. The biology of mycorrhiza in the Ericaceae. VIII. The role of mycorrhizal infection in heavy metal resistance. *New Phytol.* 91: 197-201.

- Cabello, M.N. 1999. Effectiveness of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) isolated from hydrocarbons polluted soils. *J. Basic Microbiol.* 2: 89-95.
- Colpaert, J.V. 1998. Biological Interactions: The significance of root-microbial symbioses for phytoremediation of metal-contaminated soils. pp. 75-91. *In: Vangronsveld, J. y S.D. Cunningham (eds.). Metal-contaminated soils: In situ activation and phytoremediation.* R.G. Landes Company. Georgetown, TX.
- Cunningham, S.D. y C.R. Lee. 1995. Phytoremediation: Plant-based remediation of contaminated soils and sediments. pp. 145-156. *In: Bioremediation: Science and applications.* Special Publication 43. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Cunningham, S.D., W.R. Berti y J.W. Huang. 1995. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotech.* 13: 393-397.
- Curl, E.A. y B. Truelove. 1986. *The Rhizosphere.* Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Dehn, B. y H. Schuepp. 1989. Influence of VA mycorrhizae on the uptake and distribution of heavy metals in plants. *Agric. Ecosyst. Environ.* 29: 79-83.
- Denny, H.J. y D.A. Wilkins. 1987. Zinc tolerance in *Betula* spp. IV. Mechanisms of ectomycorrhizal amelioration of zinc toxicity. *New Phytol.* 130: 251-257.
- Dodd, J.C., C.L. Boddington, A. Rodriguez, M.C. Gonzalez-Chavez e I. Mansur. 2000. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) from different genera: Form, function and detection. *Plant Soil* 226: 131-151.
- Dodd, J.C., T.A. Dougall, J.P. Clapp y P. Jeffries. 2002. The role and species richness of AMF in plant community establishment at the Eurotunnel site of special scientific interest, Samphire Hoe, Kent, UK. *Biodiversity Conserv.* 11: 39-58.
- Donnelly, P.K. y J.A. Entry. 1999. Bioremediation of soils with mycorrhizal fungi. pp. 417-438. *In: Adriano, D.C., J.M. Bollag, W.T. Frankenberger Jr. y R.C. Sims (eds.). Bioremediation of contaminated soils.* Agronomy 37. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Donnelly, P.K. y J.S. Fletcher. 1994. Potential use of mycorrhizal fungi as bioremediation agents. pp. 93-99. *In: Anderson, T.A. y J.R. Coats (eds.). Bioremediation through rhizosphere technology.* American Chemical Society. Washington, D.C.
- Dushenkov, S., Y. Kapulnik, M. Blaylock, B. Sorochinsky, I. Raskin y B. Ensley. 1997. Phytoremediation a novel approach to an old problem. *Global environmental biotechnology: Proceedings of the third biennial meeting of the International Society for Environmental Biotechnology.* 15-20 July 1996. Boston, MA USA. Elsevier.
- Ebs, S.D., M.M. Lasat, D.J. Brady, J. Crnish, R. Gordon y L.V. Kochian. 1997. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. *J. Environ. Quality* 26: 1424-1430.
- Erlich, H.L. y C.L. Brierley. 1990. *Microbial mineral recovery.* McGraw-Hill. New York.
- Gadd, G.M. 1993. Interaction of fungi with toxic metals. *New Phytol.* 124: 25-60.
- González-Chávez, M.C. 2000a. Biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. pp. 714-731. *In: Quintero-Lizaola, R., T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chec, A. Ibáñez-Huerta y N.E. García-Calderón (eds.). La Edafología y sus Perspectivas al Siglo XXI. Tomo II. Colegio de Postgraduados-Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Autónoma Chapingo. México, D.F.*
- González-Chávez, M.C. 2000b. Arbuscular mycorrhizal fungi from As/Cu polluted soils, contribution to plant tolerance and importance of the external mycelium. PhD Thesis. Reading University. Reading, UK.
- González-Chávez, M.C. 2004. Los hongos micorrízicos en suelos contaminados con elementos potencialmente tóxicos: Mecanismos de tolerancia, relevancia ecológica y su uso en biorremediación. *In: Ferrera-Cerrato, R. y A. Alarcón. (eds.). Microbiología Agrícola para el siglo XXI.* Editorial Mundi-Prensa. México. (En prensa.)
- González-Chávez, M.C., R. Ferrera-Cerrato y M.E. Lara-Hernández. 2002a. Hydrocarbons for microorganisms meal. Proceedings of sixth international symposium on environmental biotechnology and fourth international symposium on cleaner bioprocesses and sustainable development. Veracruz, México. 9-12 junio.
- González-Chávez, M.C., P. Harris, J. Dodd y A.A. Meharg. 2002b. Arsenate resistance in arbuscular mycorrhizal associations: Implications for phosphorus nutrition of plants. *New Phytol.* 155: 163-171.
- González-Chávez, M.C., J. D'Haen, J. Vangronsveld y J. Dodd. 2002c. Copper sorption and accumulation by the extraradical mycelium of three arbuscular mycorrhizal fungi isolated from the same polluted soil. *Plant Soil* 240: 287-297.
- González-Chávez, M.C., R. Carrillo-González, S. Wright y K. Nichols. 2004. Role of Glomalin, protein produced by hypha of arbuscular mycorrhizal fungi in the sequestration of potentially toxic elements. *Environ. Pollut.* 130: 317-323.
- Herman, D.C., J.F. Artiola y R.M. Millar. 1995. Removal of cadmium, lead, and zinc from soil by a rhamnolipid biosurfactant. *Environ. Sci. Technol.* 29: 2280-2285.
- Hetrick, D.B.A., G. Wilson y D.A. Figge. 1994. The Influence of mycorrhizal symbiosis and fertilizer amendments on establishment of vegetation in heavy metal mine spoil. *Environ. Pollut.* 86: 171-179.
- Hildebrandt, U., M. Kaldorf y H. Bothe. 1999. The zinc violet and its colonization by arbuscular mycorrhizal fungi. *J. Plant Physiol.* 154: 709-717.
- Jasper, D.A. 1994. Management of mycorrhizas in vegetation. pp. 211-219. *In: Robson, A.D., L.K. Abbott y N. Malajczuk (eds.). Management of mycorrhizas in agriculture, horticulture and forestry.* Kluwer. Dordrecht, The Netherlands.
- Jeffries, P., S. Gianinazzi, S. Perotto, K. Turnau y J.M. Barea. 2003. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biol. Fert. Soils* 17: 1-16.
- Jenkinson, D.S. y J.M. Ladd. 1981. Microbial biomass in soil: Movement and turnover. pp. 415-471. *In: Paul, E.A. y J.M. Ladd (eds.). Soil biochemistry.* Marcel Dekker. New York.
- Lambert, D.H. y H. Cole. 1980. Effects of mycorrhizae on establishment and performance of forage species in mine spoil. *Agron. J.* 72: 257-260.
- Lepp, N.W. 1992. Uptake and accumulation of metals in bacteria and fungi. pp. 227-298. *In: Adriano, D.C. (ed.). Biogeochemistry of trace metals.* Lewis Publisher. Boca Raton, FL.

- Leyval, C. y P. Binet. 1998. Effect of polyaromatic hydrocarbons in soil arbuscular mycorrhizal plants. *J. Environ. Qual.* 27: 402-407.
- Li, Y-M. y R.L. Chaney. 1998. Case studies in the field – Industrial sites: Phytostabilization of zinc smelter-contaminated sites: The Palmerton case. pp. 197-210. *In: Vangronsveld, J. y S.D. Cunningham (eds.). Metal-contaminated soils: In situ inactivation and phytoremediation.* R.G. Landes Company. Georgetown, TX.
- Maier, R. 1995. Biosurfactant-facilitated remediation of metal-contaminated soils. *Environ. Health Persp.* 103: 59-62.
- Pawlowska, T.E., J. Blaszowski y A. Rubling. 1996. The mycorrhizal status of plants colonizing a calamine spoil mound in southern Poland. *Mycorrhiza* 6: 499-505.
- Pfleger, F.L., E.L. Stewart y R.K. Noyd. 1994. Role of VAM fungi in mine land revegetation. pp. 47-82. *In: Pfleger, F.L. y R.G. Linderman (eds.). Mycorrhiza and plant health.* American Phytopathology Society. St. Paul, MN.
- Raskin, I., P.B.A. Kumar, S. Dushenkov y D.E. Salt. 1994. Bioconcentration of heavy metals by plants. *C. Opinion Biotech.* 5: 285-290.
- Retana, J., D.R. Parker, C. Amrhein y A.L. Page. 1993. Growth and trace element concentrations of five plants species grown in a highly saline soil. *J. Environ. Qual.* 22: 805-811.
- Sánchez-Viveros, G., R. Carrillo-González, A. Martínez-Garza y M.C. González-Chávez. 2004. Tolerancia adaptativa de tres hongos micorrízicos arbusculares al crecer en sustratos contaminados con As y Cu. *Rev. Int. de Contaminación Ambiental.* (En prensa.)
- Schat, H. y J.A.C. Verkleij. 1998. Biological interactions: The role for non-woody plants in phytoremediation: Possibilities to exploit adaptive heavy metal tolerance. pp. 51-65. *In: Vangronsveld, J. y S.D. Cunningham. (eds.). Metal-contaminated soils: In situ inactivation and phytoremediation.* R.G. Landes Company. Georgetown, TX.
- Sharples, J.M., A.A. Meharg, S.M. Chambers y J.W.G. Cairney. 1999. Arsenate sensitivity in ericoid and ectomycorrhizal fungi. *Environ. Toxicology Chem.* 18: 1848-1855.
- Shetty, K.G., B.A.D. Hetrick y D.A. Figge. 1994. Effects of mycorrhizae and other soil microbes on revegetation of heavy metal contaminated mine spoil. *Environ. Pollut.* 86: 181-188.
- Sizova, O.I., V.V. Kochetkov, S.Z. Validov, A.M. Boronin, P.V. Kosterin y Y.V. Lyubun. 2001. Use of rhizosphere bacteria in the phytoremediation of arsenical-contaminated soils. *Proceedings of the 6th International Conference on the Biogeochemistry of trace elements.* Guelph, Canada.
- Skladany, G.J. y F.B. Metting Jr. 1993. Bioremediation of contaminated soil. pp. 483-513. *In: Metting Jr., F.B. (ed.). Soil microbial ecology. Applications in agricultural and environmental management.* Marcel Dekker. New York.
- Smith, R.A.H. y A.D. Bradshaw. 1970. Reclamation of toxic metalliferous wastes using tolerant populations of grass. *Nature* 227: 376-377.
- Smith, S.E. y D.J. Read. 1997. *Mycorrhizal symbiosis.* Second Edition. Academic Press. Cambridge, UK.
- Sparling, G.P. 1985. The soil biomass. pp. 223-262. *In: Vughan, D. y E.T. Malcolm (eds.). Soil organic matter and biological activity.* Martinus Nijhoff Junk. Dordrecht, The Netherlands.
- Stomp, A.M., K.H. Han, S. Wilbert, M. Gordon y S.D. Cunningham. 1994. Genetic strategies for enhancing phytoremediation. *Recombinant DNA Technology II.* Ann. New York Acad. Sci. 721: 481-491.
- Tobin, J.M., B.L'homme y J.C. Roux. 1993. Immobilization protocols and effects on cadmium uptake by *Rhizopus arrhizus* biosorbents. *Biotechnol. Tech.* 7: 739-744.
- Torrens, J.L., D.C. Herman y R. Maier. 1998. Biosurfactant (rhamnolipid) sorption and the impact on rhamnolipid-facilitated removal of cadmium from various soils under saturated flow conditions. *Environ. Sci. Techn.* 32: 776-781.
- Turco, R.F. y M. Sadowsky. 1995. The microflora of bioremediation. pp. 87-102. *In: Bioremediation: Science and applications.* Special Publication 43. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Van der Lelie, D. 1998. Biological interactions: The role of soil bacteria in the bioremediation of heavy metal-polluted soils. pp. 31-91. *In: Vangronsveld, J. y S.D. Cunningham (eds.). Metal-contaminated soils: In situ inactivation and phytoremediation.* R.G. Landes Company. Georgetown, TX.
- Vangronsveld, J. 1998. Case studies in the field – Industrial sites: Phytostabilization of zinc-smelter contaminated site: The Lommel-Maatheid case. pp. 211-216. *In: Vangronsveld, J. and S.D. Cunningham (eds.). Metal-contaminated soils: In situ inactivation and phytoremediation.* R.G. Landes Company. Georgetown, TX.
- Vangronsveld, J. y S.D. Cunningham. 1998. Metal-contaminated soils. *In situ inactivation and phytoremediation.* R.G. Landes Company. Georgetown, TX.
- Volesky, B. 1997. *Biosorption of heavy metals.* CRC Press. Boca Raton, FL.
- Walton, B., E.A. Guthrie y A.M. Hoylman. 1994. Toxicant degradation in the rhizosphere. pp. 11-26. *In: Anderson, T. y R. Coast (eds.). Bioremediation through rhizosphere technology.* American Chemical Society. Washington, DC.
- Wenzel, W.W., D.C. Adriano, D. Salt y R. Smith. 1999. Phytoremediation: A plant-microbe-based remediation system. pp. 457-508. *In: Adriano, D.C., J.M. Bollag, W.T. Frankenberger Jr y R.C. Sims (eds.). Bioremediation of contaminated soils.* Agronomy 37. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Wilkins, D.A. 1991. The influence of sheathing (ecto-) mycorrhizas of trees on the uptake and toxicity of metals. *Agric. Ecosyst. Environ.* 35: 245-260.
- Wright, S. y A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198: 97-107.

CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL EN HOJAS DE NARANJO VALENCIA INJERTADO EN PORTAINJERTOS DE CÍTRICOS

Nutrient Concentration in Leaves of Valencia Orange Grafted on Citrus Rootstocks

Octavio Pérez-Zamora¹

RESUMEN

Durante 2001, se evaluaron 16 portainjertos de cítricos con el objetivo de caracterizar la concentración nutrimental en hojas de árboles de naranjo Valencia (*Citrus sinensis* L.) a ocho años de plantados en campo. Los tratamientos (portainjertos) incluyeron limones, citranges, mandarinos, lima ácida y trifoliados; como testigo se utilizó Naranjo agrio (*C. aurantium* L.). Se determinaron N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn y Cu. Se calcularon el cociente $[K/(Ca + Mg)]$ y el índice de Kenworthy con base en vigor del árbol, rendimiento, calidad de fruta y eficiencia de producción (kg m^{-3} de follaje). En Colima, 20% de los cítricos se establecen en suelos de textura migajón arcillosa y 50% en migajón arenosa. La concentración nutrimental dependió de la eficiencia o ineficiencia del portainjerto para absorber determinado nutrimento. Volkameriana (*Citrus volkameriana* Pasq.) tuvo menor absorción de Mg, mientras que Naranjo agrio fue el más ineficiente para absorber P. Cleopatra (*Citrus reshni* x Tan.) y Carrizo (*Poncirus trifoliata* (L.) Raf x *Citrus sinensis* L.) registraron la menor concentración de K. El cociente $[K/(Ca + Mg)]$ resultó indicador del tipo de portainjerto empleado. Macrofila (*Citrus macrophylla* Wester) tuvo el valor más alto y Carrizo el menor. Amblicarpa (*Citrus amblycarpa* Ochse) mostró valores de suficiencia nutrimental, no obstante su gran volumen de copa. El rendimiento de fruta se correlacionó con el vigor del árbol (diámetro de copa). El índice de balance nutrimental de Kenworthy fue N, 2.9%; P, 0.3%; K, 0.84%; Ca, 3.45%; Mg, 0.67%; Mn, 36 mg kg^{-1} ; y Cu, 17 mg kg^{-1} .

Palabras clave: *Citrus sinensis*, citranges, mandarino, trifoliados, suelo calcáreo, calidad de jugo.

¹ Campo Experimental Tecmán. Km 35 Carr. Colima-Manzanillo. 28100 Colima, México
(perez.octavio@inifap.gob.mx)

Recibido: Junio de 2003. Aceptado: Agosto de 2004.
Publicado en Terra Latinoamericana 23: 39-47.

SUMMARY

During 2001, 16 citrus rootstocks of sweet orange Valencia (*Citrus sinensis* L.) were evaluated to characterize the foliar nutrient concentration in orange trees eight years after planting. Treatments (rootstocks) were lemon, citrange, mandarin, lime, and trifoliates; the control treatment was sour orange (*Citrus aurantium* L.). Nitrogen, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, and Cu were determined. The $[K/(Ca+Mg)]$ quotient and Kenworthy index were calculated on the basis of tree vigor, yield, fruit quality, and yield efficiency (kg m^{-3} leaves). In Colima, Mexico, citrus (20%) are grown on clay loam soil and 50% on sandy loam soil. Nutrient concentrations depended on rootstock efficiency or inefficiency in absorbing a specific nutrient. Volkameriana (*Citrus volkameriana*, Pasq.) took less Mg, while sour orange was the least efficient in absorbing P. Cleopatra (*Citrus reshni* x Tan) and Carrizo (*Poncirus trifoliata* (L.) Raf x *Citrus sinensis* L.) had the lowest K concentration. The $[K/Ca+Mg]$ quotient was an indicator of the rootstock type used. Macrofila (*Citrus macrophylla* Wester) had the highest value and Carrizo the lowest. Amblicarpa (*Citrus amblycarpa* Ochse) showed values of nutrient sufficiency in spite of its large tree canopy. Yield was correlated with tree vigor (canopy diameter). Kenworthy index was N, 2.9%; P, 0.3%; K, 0.84%; Ca, 3.45%; Mg, 0.67%; Mn, 36 mg kg^{-1} ; and Cu, 17 mg kg^{-1} .

Index words: *Citrus sinensis*, citranges, mandarin, trifoliates, calcareous soil, juice quality.

INTRODUCCIÓN

En Colima, la naranja es una alternativa viable entre los cítricos, ya que tiene buen potencial productivo y calidad de jugo aceptable, aunque la calidad externa de la fruta no es muy buena; sin embargo, a diferencia del limón mexicano, no se ha caracterizado su comportamiento en diversos portainjertos en Calcisoles vérticos de textura migajón arcillosa (Pérez *et al.*, 2002, 2003).

El efecto del portainjerto en la concentración nutrimental del follaje, crecimiento, producción, tamaño y calidad de fruto del cultivar injertado está ampliamente documentado (Castle y Krezdorn, 1975; Roose *et al.*, 1989; Fallahi y Rodney, 1992). Las diferencias en el estado nutrimental entre portainjertos de cítricos se atribuyen a la habilidad del portainjerto para absorber agua y nutrientes, así como a diferencias físicas entre sistemas radicales (Castle y Krezdorn, 1975; Zekri y Parsons, 1989).

En suelos calcáreos de Florida, la producción, sin detrimento de la calidad, es 10 a 20% mayor de naranja injertada en Amblicarpa, que en Cleopatra (*C. reshni* Hort x Tan), (Castle *et al.*, 1993; Castle y Gmitter, 1999). Los mandarinos Sun Chu Sha (*C. reshni* Hort x Tan) y Shekwasha (*C. depressa* Hayata) se reportan como los portainjertos más tolerantes a clorosis férrica ocasionada por suelos calcáreos (Tucker *et al.*, 1995; Zekri, 1995; Goldschmidt y Spiegel-Roy, 1996; Alva y Tucker, 1999). Cleopatra causa que se acumule, en exceso, B, Ca y, en menor grado, Mg, mientras que K y N en hojas disminuyen en las hojas del injerto (Ferguson *et al.*, 1990).

Macrofila, portainjerto tipo limón, disminuye la concentración foliar de Ca en naranjos Valencia y Navel (*Citrus sinensis* L.) y toronjo, en comparación con naranjos agrio y trifoliado Rubidoux (*Poncirus trifoliata*); por otro lado, la concentración de Fe y Mn resultó mayor en Macrofila que en Naranja agrio y Rubidoux (Zekri, 1995). Un factor distintivo de Macrofila es su inhabilidad para absorber B (Ferguson *et al.*, 1990; Alva y Tucker, 1999).

Los portainjertos varían en habilidad para absorber Fe y los naranjos trifoliados y sus híbridos, citrumelo Swingle (*P. trifoliata* x *C. paradisi* L. Raf) y citrange Carrizo (*P. trifoliata* (L.) Raf. x *C. sinensis* L.) son más ineficientes que portainjertos tipo limón y mandarino para absorber ese nutriente (Zekri, 1995). Los trifoliados acumulan Mg foliar y son menos eficientes que limón rugoso para tomar N, pero son más eficientes que limón rugoso y naranja agrio para asimilar P (Ferguson *et al.*, 1990; Alva y Tucker, 1999). Los híbridos trifoliados C-32, C-35, Carrizo y Troyer son muy susceptibles a deficiencias de Zn y Mn (Castle *et al.*, 1993; Castle y Gmitter, 1999).

El objetivo del presente estudio fue caracterizar la concentración nutrimental de árboles de naranja injertados en portainjertos de cítricos establecidos en un Calcisol vértico de textura migajón arcillosa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Campo Experimental Tecmán, municipio de Tecmán, Colima; las coordenadas son 18° 57' 07" N y 103° 50' 30.5" O; la temperatura media anual es 26 °C y la precipitación anual de 730 mm; el terreno tiene una pendiente menor que 1% y 30 m de altitud; el suelo se clasificó como Calcisol vértico (FAO, 1991). Las principales características físicas y químicas del suelo se muestran en el Cuadro 1.

La conductividad eléctrica del agua de riego fue de 1.32 dS m⁻¹, con alto contenido de Ca²⁺, Na⁺, HCO₃⁻ y SO₄²⁻; la clasificación del agua para fines de riego fue C₃ S₁, o sea, de alto riesgo de salinidad.

Los portainjertos evaluados se muestran en el Cuadro 2. El testigo fue Naranja agrio. En todos los portainjertos se injertó naranja Valencia (*Citrus sinensis* L.), que es de maduración tardía. Los árboles injertados se establecieron en campo el 22 de diciembre de 1993; las distancias de plantación fueron de 8 x 4 m. La fertilización a partir del inicio de cosecha (1997) fue de 200-100-250 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente, la cual se continuó hasta el año 2001.

El volumen de copa se estimó por el método de Roose *et al.* (1989), con base en altura (m) y diámetro (m) del árbol. El rendimiento se obtuvo cosechando tres árboles en cada unidad experimental. Al cociente rendimiento/volumen de copa se le denominó eficiencia de producción (Roose *et al.*, 1989). Para evaluar calidad de jugo, se colectaron 25 frutos en tres árboles de la unidad experimental; las frutas se analizaron acorde con la metodología de Wardowski *et al.* (1979), mediante la cual, en el extracto de jugo, se determinaron los sólidos totales (°B) con refractómetro manual y la acidez titulable (25 mL de alícuota) se evaluó con una solución de NaOH (0.312 N) utilizando de tres a cuatro gotas de fenolftaleína como indicador; los ácidos en el jugo son ácido cítrico y pequeñas cantidades de ácidos málico, tartárico y succínico. Por ciclo, se efectuaron tres muestreos para detectar el punto de corte de la naranja e índice de madurez, el cual se tomó en cuenta para realizar la cosecha.

El análisis nutrimental del follaje se realizó con hojas colectadas en mayo de 2001. La muestra se obtuvo colectando hojas, en los cuatro puntos cardinales del árbol, en cada uno de los tratamientos; la muestra consistió en 25 hojas de brotes vegetativos,

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del suelo y de su extracto de saturación. Tecomán, Colima. 2001.

Parámetro	Suelo		Extracto de saturación		
	Profundidad (cm)		Parámetro	Profundidad (cm)	
	0 a 30	30 a 60		0 a 30	30 a 60
Textura	Franca [†]	Migajón arcillosa [†]	Extracto saturación		
Arena (%)	44.92	32.92	pH	8.2	8.2
Limo (%)	29.28	33.28	CE [‡] (dS m ⁻¹)	0.72	0.84
Arcilla (%)	25.8	33.80	Ca (me L ⁻¹)	3.76	3.95
pH agua (1:2)	8.5	8.5	Mg (me L ⁻¹)	1.98	2.37
Carbono orgánico (%)	1.24 M	0.70 P	Na (me L ⁻¹)	1.08	1.39
P Olsen (mg kg ⁻¹)	22.7 M	10.1 P	K (me L ⁻¹)	0.44	0.24
K (mg kg ⁻¹)	448.0 MR	290.0 R			
Ca (mg kg ⁻¹)	4831.0 R	5082.0 MR	CO ₃ ²⁻ (me L ⁻¹)	0.39	0.39
Mg (mg kg ⁻¹)	184.0 R	214.0 R	HCO ₃ ⁻ (me L ⁻¹)	2.98	2.58
Na (mg kg ⁻¹)	32.0	40.0	Cl ⁻ (me L ⁻¹)	1.71	2.09
Carbonatos (%)	12.38	12.38	SO ₄ ²⁻ (me L ⁻¹)	2.67	2.44
Fe (mg kg ⁻¹)	3.1 MP	2.3 MP	PSI [§]	0.00	0.00
Mn (mg kg ⁻¹)	9.4 M	6.0 Med P			
Zn (mg kg ⁻¹)	0.5 P	0.3 MP			
Cu (mg kg ⁻¹)	1.3 R	1.3 R			
N total (%)	0.11 M	0.08P			

[†] P = pobre; MP = muy pobre; M = mediano; R = rico; MR = muy rico; MedP = medianamente pobre. Clasificación de Laboratorio de Suelos, Aguas y Plantas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Bajío. [‡] conductividad eléctrica. [§] Porcentaje de sodio intercambiable.

Cuadro 2. Portainjertos evaluados en suelo Calcisol vértico de textura migajón arcillosa. Tecomán, Colima. México.

No.	Nombre común	Nombre científico	Tipo de cítrico
1	Volkameriana	<i>Citrus volkameriana</i> , Pasq	limón
2	Carrizo	<i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf x <i>C. sinensis</i> L.	citrange
3	Shekwasha	<i>Citrus depressa</i> Hayata	mandarino
4	Cleopatra	<i>Citrus reshni</i> Hort. x Tan	mandarino
5	Naranja agrio	<i>Citrus aurantium</i> L.	naranja
6	Sun Chu Sha	<i>Citrus reshni</i> Hort. x Tan	mandarino
7	Rangpur	<i>Citrus limonia</i>	lima ácida
8	Amblicarpa	<i>Citrus amblycarpa</i> Ochse	mandarino
9	Rangpur x trifoliado,	<i>Citrus limonia</i> x <i>trifoliata</i>	naranja trifoliado
10	Macrofila	<i>Citrus macrophylla</i> Wester;	limón
11	Willits	<i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf. x <i>C. sinensis</i> L.	citrange
12	Rusk	<i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf x <i>C. sinensis</i> L.	citrange
13	C-32	<i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf x <i>C. sinensis</i> L.	citrange
14	Rubidoux	<i>Poncirus trifoliata</i>	naranja trifoliado
15	Sunki x trifoliado	Sunki x <i>P. trifoliata</i>	naranja trifoliado
16	Morton	<i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf. x <i>C. sinensis</i> L.	citrange

de cinco y medio meses de edad; las hojas se lavaron con agua destilada y ácido clorhídrico diluido (1 N); se secaron a peso constante a 70 °C; se molieron en molino equipado con hojas de acero inoxidable, pasándose a través de malla de 2 mm; las muestras se volvieron a moler en molino de ciclón, cerniéndose por malla de 1 mm y se almacenaron en bolsas de plástico a 4 °C de temperatura. Para el análisis nutricional, 1 g de muestra se incineró en crisoles de porcelana a 600 °C durante 3 h, luego las cenizas se solubilizaron con HCl caliente (200 g L⁻¹). Para

remover interferencias aniónicas, se llevó a una solución final de 1 g L⁻¹ de lantano, La₂O₃.

Las muestras se analizaron por duplicado para Ca, Mg, K, Cu, Mn y Fe con técnica de espectrofotometría de absorción atómica (Horwitz, 1980). El P se determinó por el procedimiento de Walls y Gehrke (1974). El N se analizó por el procedimiento convencional kjeldahl. La concentración observada en los árboles del experimento se comparó con los requerimientos nutricionales de los cítricos reportados por Koo (1984).

El índice de Kenworthy se calculó como lo reportaron Kenworthy (1967) y Maldonado *et al.* (2001); la diferencia con las metodologías anteriores consistió en que en el presente trabajo, además del rendimiento y el coeficiente de variación, se utilizaron como restricción la calidad de fruta externa e interna, el vigor del árbol y la resistencia a las principales enfermedades actuales y potenciales (tristeza de los cítricos). El número total de árboles muestreados fue de 160. La relación $[K/(Ca + Mg)]$ se calculó con base en $cmol_c kg^{-1}$ (Gruncs *et al.*, 1970; Kidambi *et al.*, 1993).

Se utilizó un diseño de bloques al azar; cada tratamiento (portainjerto) se repitió cinco veces; la parcela experimental constó de cinco árboles y la unidad experimental, de los tres árboles centrales. Se efectuó análisis de varianza a los tratamientos, utilizando procedimientos de GLM con el paquete estadístico COHORT3 (CoHort Software, 1995) con la interacción tratamiento x bloque como término del error y la comparación de medias, utilizando Tukey (0.05); también se efectuaron análisis de regresión múltiple de rendimiento, K en hoja, calidad de jugo y diámetro de copa como variables dependientes con las variables de crecimiento del árbol y cociente $[K/(Ca + Mg)]$ como variables independientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de Nutrientes

En el Cuadro 3, se muestran las concentraciones nutrimentales foliares de naranjo Valencia. Los resultados tuvieron diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) en N, P, K, Mg y Mn. Los altos valores, con respecto a los niveles de suficiencia en cítricos de Fe, se debieron probablemente a la aplicación (anual) al follaje y suelo de quelatos de Fe; también se aplicaron quelatos de Zn. No obstante la presencia de $CaCO_3$ en el suelo, los portainjertos no mostraron deficiencias de N y P, como lo reportaron Obreza *et al.* (1998) y Paramasivam *et al.* (2001), ya que dichos valores estuvieron dentro del intervalo de óptimo a suficiente (Alva y Paramasivam, 1998; Alva y Tucker, 1999; Paramasivam *et al.*, 2001).

Nitrógeno. Rangpur por trifoliado mostró la mayor concentración de N y fue estadísticamente igual a la observada en los portainjertos sobresalientes Volkameriana, Carrizo, Amblicarpa, Macrofila y Sunki por trifoliado; el efecto en concentración nutrimental se atribuye a dilución del N en el follaje, ya que los portainjertos más rendidores tuvieron mayor volumen de copa (Figura 1). La concentración media de N en los tratamientos fue similar a la obtenida (2.5 a 2.7%) por Paramasivam *et al.* (2001) en suelos (Entisoles) de Florida fertilizados con

Cuadro 3. Concentración nutrimental¹ en hojas de naranjo 'Valencia' injertada en 16 portainjertos de cítricos. Tecomán, Colima, 2001.

Portainjerto	N	P	K	Mg	Ca:Mg	Mn
	----- % -----					
						mg kg ⁻¹
Volkameriana	3.09 abc [†]	0.31 bc	0.86 abc	0.51 b	6.63	44 a
Carrizo	2.87 abc	0.32 abc	0.61 d	0.81 a	4.25	26 b
Shekwasha	2.65 c	0.29 c	0.86 abc	0.75 ab	4.25	38 ab
Cleopatra	2.83 abc	0.32 bc	0.63 c	0.74 ab	4.35	33 ab
Naranjo agrio	2.67 bc	0.29 c	0.72 bc	0.54 ab	6.89	33 ab
Sun Chu Sha	2.98 abc	0.30 bc	0.92 abc	0.79 ab	4.35	34 ab
Rangpur	3.19 abc	0.32 abc	0.89 abc	0.69 ab	4.88	33 ab
Amblicarpa	2.92 abc	0.30 abc	0.91 abc	0.74 ab	4.70	33 ab
Rangpur x trifoliado	3.28 a	0.32 abc	0.81 bc	0.60 ab	5.70	39 ab
Macrofila	2.99 abc	0.29 c	1.15 a	0.67 ab	4.94	46 a
Willits	3.16 abc	0.34 a	0.86 abc	0.80 ab	4.09	25 b
Rusk	3.04 abc	0.30 abc	0.88 abc	0.79 ab	3.91	38 ab
C-32	2.80 abc	0.31 bc	0.70 bc	0.76 ab	4.37	38 ab
Rubidoux	3.26 abc	0.33 ab	0.96 ab	0.70 ab	5.24	25 b
Sunki x trifoliado	2.93 abc	0.32 abc	0.78 bc	0.73 ab	4.60	34 ab
Morton	2.97 abc	0.30 abc	0.84 bc	0.78 ab	4.47	27 b
Media	2.97	0.31	0.83	0.72	4.69	34
Tukey 0.05	0.32	0.02	0.29	0.29	No aplica	13

[†] Los valores de concentración son promedio de cinco repeticiones; en cada repetición se muestreó tres árboles.

¹ Valores con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$).

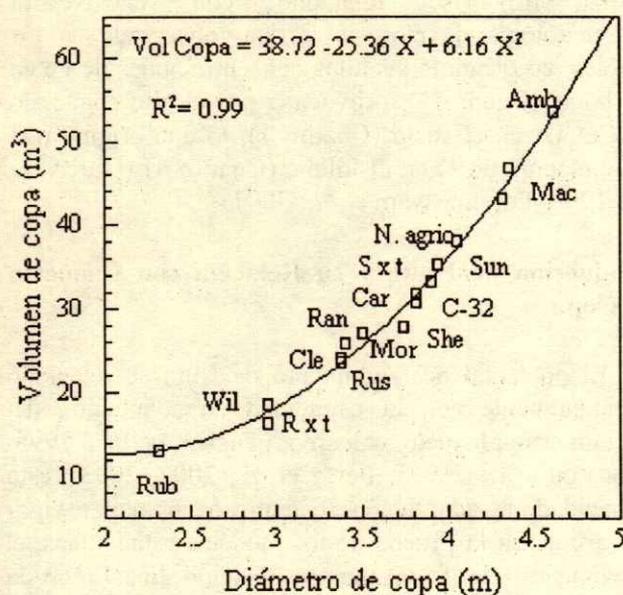


Figura 1. Relación entre el diámetro de copa y volumen de copa de árboles de naranja. Amb = Amblicarpa; Car = Carrizo; Cle = Cleopatra; N. agrio = Naranja agrio; Mac = Macrofila; Mor = Morton; Ran = Rangpur; Rub = Rubidoux; Rus = Rusk; R x t = Rangpur por trifoliado; S x t = Sunki por trifoliado; She = Shekwasha; Sun = Sun Chu Sha; Wil = Willits.

250 kg ha⁻¹ de N con lo que maximizaron la producción de fruta y mantuvieron la lixiviación de N-NO₃ en sólo 22 a 34 kg ha⁻¹ año⁻¹. Cleopatra, portainjerto reportado por Ferguson *et al.* (1990) como ineficiente para absorber N, mostró valores menores que los registrados en otros portainjertos, tendencia que fue similar para el mandarino Shekwasha.

Fósforo. Willits fue el portainjerto con la mayor concentración de P, aunque resultó estadísticamente igual al observado en los portainjertos sobresalientes Carrizo, Amblicarpa y Sunki por trifoliado. Naranja agrio resultó congruente con los resultados de otros investigadores, ya que se le reporta como el portainjerto más ineficiente para la absorción de P (Ferguson *et al.*, 1990; Castle y Gmitter, 1999); comportamiento similar al de Naranja agrio también se observó en Volkameriana y Macrofila.

Potasio. Macrofila, Sun Chu Sha y Amblicarpa tuvieron los valores más altos de K, que contrastaron con los observados en dos de los cinco portainjertos más sobresalientes, Carrizo y Sunki por trifoliado (Cuadro 3), los cuales tuvieron valores similares al registrado en el portainjerto con más pobre adaptación al suelo (Cleopatra). Las concentraciones de K en la mayoría de los tratamientos estuvieron dentro del

intervalo considerado como bajo (Ferguson *et al.*, 1990; Paramasivam *et al.*, 2001); sin embargo, dichas concentraciones foliares de K contrastaron con el contenido registrado en el suelo, que fue de muy rico a rico a las profundidades de 0 a 30 y de 30 a 60 cm, respectivamente (Cuadro 1), y con el valor de la relación [K/(Ca + Mg)] del suelo que fue óptima (0.02 y 0.8) a profundidades de 30 y 60 cm, respectivamente. Este resultado demostró que no existe relación entre el contenido de K en el suelo con la concentración foliar de dicho elemento, ya que ésta última depende más de la eficiencia del portainjerto para absorber K que del resultado del análisis químico del suelo (Ferguson *et al.*, 1990; Zekri, 1995).

Calcio. No se observaron diferencias estadísticas en ninguno de los tratamientos (Cuadro 3). Los intervalos de este nutrimento fueron menores que los reportados para naranja en otros estudios (Alva y Tucker, 1999; Maldonado *et al.*, 2001), no obstante que el suelo, en el horizonte superior, y el agua de riego contienen cantidades abundantes de Ca (Cuadro 1).

Magnesio. Al igual que para la absorción de N, P y K, los portainjertos respondieron de diferente manera a la absorción de Mg; Volkameriana, portainjerto tipo limón se reporta por absorber menos Mg que Naranja agrio y otros portainjertos; la mayor concentración de Mg se observó en el citrange Carrizo; esto tiene implicaciones en el cociente [K/(Ca + Mg)] de las hojas de naranja (Figura 1). Es de hacer notar que, en todos los tratamientos, los intervalos de Mg fueron superiores al nivel de suficiencia (Alva y Tucker, 1999).

Calcio/Magnesio. Este cociente fue inferior al reportado para naranja y otros cítricos (Ferguson *et al.*, 1990; Alva y Tucker, 1999; Maldonado *et al.*, 2001), lo que se atribuye a la mayor absorción de Mg con respecto a Ca y a la preferencia o restricción de absorción de K por los portainjertos; por ejemplo, Volkameriana presentó una disminución en la absorción de Mg, mientras que los citrangs (Carrizo, Willits, Rusk, Morton y C-32) acumularon la mayor concentración de Mg (Castle y Krezdorn, 1975; Ferguson *et al.*, 1990; Fallahi y Rodney, 1992).

Hierro. La sintomatología de deficiencia, observada en campo, de este nutrimento fue muy clara en todos los portainjertos, aun en los tolerantes a condiciones calcáreas; su efecto se manifestó en vigor del árbol, producción, así como en la eficiencia productiva; el bajo porte y bajo rendimiento de los portainjertos mostrados en la Figura 1 se debieron a la pobre adaptación de los árboles al suelo calcáreo y al

contenido muy pobre de Fe en el suelo (Cuadro 1). El no detectar diferencias estadísticas en la concentración de Fe se debió a la aplicación de quelatos de Fe a todos los árboles (Campbell, 1972; Castle *et al.*, 1993; Pérez *et al.*, 2002, 2003).

Manganeso. El contenido de Mn en el suelo fue de mediano y medianamente pobre (Cuadro 1); sin embargo, las plantas registraron concentraciones dentro del intervalo satisfactorio (25 a 100 mg kg⁻¹); dos portainjertos con pobre adaptación al suelo, Willits y Rubidoux, tuvieron los valores más bajos (Cuadro 3), en contraste, Macrofila fue congruente con lo reportado por Zekri (1995), ya que mostró mayor concentración de Mn foliar con respecto a otros portainjertos; los citrangeres Morton, Carrizo y Willits, así como el naranjo trifoliado Rubidoux, registraron los valores más bajos de Mn en hoja.

Cobre. Todos los tratamientos tuvieron valores mayores que los intervalos de suficiencia. Esto se debió, en parte, a la aspersión de fungicidas al follaje con base en Cu, lo que originó que los portainjertos no mostraran diferencias estadísticas. Las altas concentraciones de Cu se debieron al volumen asperjado a la copa del árbol, que produjo efecto de concentración de Cu en árboles poco adaptados al suelo (mismo volumen de agroquímico en menor área foliar). Árboles con mejor adaptación, mayor volumen de copa, a condiciones calcáreas, requirieron de volúmenes superiores de agroquímicos (Zekri y Parsons, 1989; Fallahi y Rodney, 1992). Independientemente de la causa, los altos valores de Cu en la hoja no afectaron el rendimiento ni la calidad de fruta, en los portainjertos más sobresalientes.

Relación [K/(Ca + Mg)]

En hojas de naranjo, el cociente [K/(Ca + Mg)] mostró valores que dependieron del portainjerto; el porcentaje de K en hoja se incrementó al aumentar el valor de [K/(Ca + Mg)] (Figura 2). De todos los portainjertos, Carrizo tuvo el valor más bajo de cociente [K/(Ca + Mg)]; esto indica que Carrizo tiene baja eficiencia de absorción de K o una alta tasa de translocación de este elemento de la hoja al fruto; la segunda situación es la más probable, de acuerdo con los datos registrados para concentración nutricional, calidad de fruto y jugo obtenida con este portainjerto (Roose *et al.*, 1989; Ferguson *et al.*, 1990; Fallahi y Rodney, 1992).

En el caso de Rangpur, Rangpur por trifoliado, Willits y Rubidoux, el valor más alto del cociente

[K/(Ca+Mg)] se relacionó con la severa sintomatología de clorosis férrica, observada en los árboles, no obstante las altas concentraciones de Fe en las hojas (Cuadro 3), provocada por el alto contenido de CaCO₃ en el suelo (Cuadro 1), lo que originó una acumulación de K en el follaje (Cuadro 4) (Obreza *et al.*, 1998; Paramasivam *et al.*, 2001).

Producción de Fruta y su Relación con Diámetro de Copa

El potencial de rendimiento de fruta se relacionó principalmente con la capacidad de adaptación del portainjerto al suelo calcáreo (Tucker *et al.*, 1995; Wheaton *et al.*, 1995; Pérez *et al.*, 2002, 2003); esta capacidad de adaptación se expresó en mayor vigor del árbol. En la prueba de los modelos estadísticos, el rendimiento de fruta mostró relación lineal con la eficiencia de producción (coeficiente de determinación de R² = 0.78) y con el producto de volumen de copa por la concentración de K en la hoja (R² = 0.59), mientras que, con el volumen de copa (R² = 0.71) y con el diámetro de copa (R² = 0.75), el modelo estadístico tuvo una relación cuadrática.

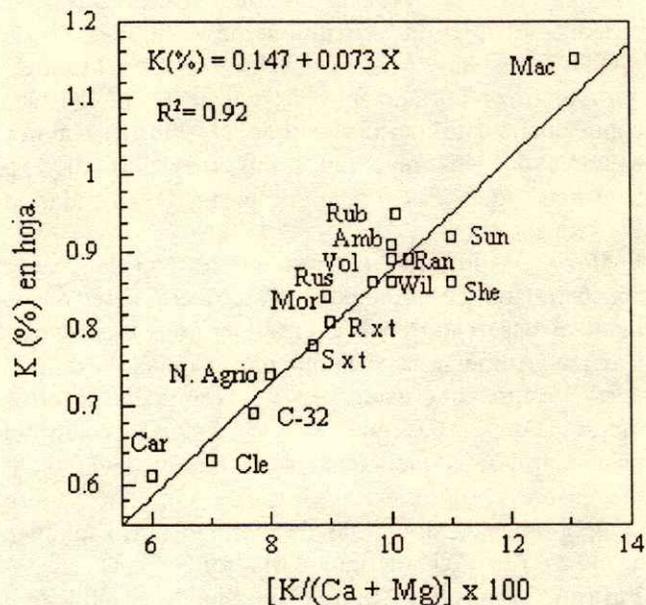


Figura 2. Relación entre K en la hoja en función del cociente [K/(Ca + Mg)]. Amb = Amblicarpa; Car = Carrizo; Cle = Cleopatra; N. agrio = Naranjo agrio; Mac = Macrofila; Mor = Morton; Ran = Rangpur; Rub = Rubidoux; Rus = Rusk; R x t = Rangpur por trifoliado; S x t = Sunki por trifoliado; She = Shekwasha; Sun = Sun Chu Sha; Vol = Volkameriana; Wil = Willits.

Cuadro 4. Valores estimados de Índices Kenworthy para naranja Valencia en el Valle de Tecomán, Colima en suelos de textura migajón arcillosa.

Nutrimiento	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Cu
	----- % -----			----- mg kg ⁻¹ -----			
Valle de Apatzingán [†]	2.8	0.21	1.57	4.72	0.49	55	11.5
Media	2.9	0.30	0.84	3.45	0.67	36	17
C.V. (%)	12.2	19.5	27.65	12.82	31.0	29.0	24.6

[†] Valores reportados para limón mexicano en el valle de Apatzingán (Maldonado *et al.*, 2001).

De las variables probadas, el diámetro de copa fue reportado el mejor por tener mayor relación con el rendimiento de fruta (Tucker *et al.*, 1995; Castle y Gmitter, 1999). El diámetro de copa expresó casi totalmente el volumen de copa ($R^2 = 0.99$), como se muestra en la Figura 1; en consecuencia, su relación con rendimiento es como sigue:

$$\text{Rendimiento de fruta (t ha}^{-1}\text{)} = 39.73 - 28.32 X + 5.78 X^2$$

Donde: X = diámetro de copa del árbol.

La relación (modelo estadístico) entre rendimiento y diámetro de copa se muestra en la Figura 3; en esta figura puede observarse, además del rendimiento en función del diámetro de copa, la eficiencia productiva de los portainjertos; por ejemplo, Sun Chu Sha tiene mayor diámetro de copa que Carrizo, Sunki por trifoliado, Naranja agrio y Shekwasha, pero menor rendimiento de fruta (menor eficiencia). En la práctica, los agricultores podrían emplear técnicas que incrementen el diámetro de copa como medio para aumentar el rendimiento y la eficiencia de producción de naranja; en tales prácticas de manejo, que inciden en el diámetro de copa, se encuentran dosis, épocas y fuentes de fertilizantes, manejo del agua de riego y podas.

Calidad de Fruta y Jugo

No se observaron diferencias estadísticas para volumen de jugo entre portainjertos; la concentración nutricional de K en hoja no tuvo relación con el tamaño de fruto ni con el porcentaje de jugo como lo han reportado Castle y Krezdorn (1975), Roose *et al.* (1989) y Fallahi y Rodney (1992).

Naranja agrio es el portainjerto de referencia para calidad (Castle y Gmitter, 1999; Jackson, 1999). Como era de esperar, los frutos de Naranja agrio tuvieron un contenido de azúcar aceptable ($P < 0.05$) y buena acidez (> 0.7); en contraste, los portainjertos tipo limón Volkameriana y Macrofila tuvieron la

menor cantidad de azúcares y acidez, lo cual fue congruente con lo reportado en la literatura (Jackson, 1999), sin embargo, el cociente SST/acidez (valores mayores que 10) de éstos en el resto de los portainjertos fue aceptable para naranja de jugo (Jackson, 1999).

Índices de Balance Kenworthy

Los índices de balance de Kenworthy para naranja Valencia, estimados en el presente estudio, se muestran en el Cuadro 4. El valor índice de N fue igual al reportado por Maldonado *et al.* (2001) para limón mexicano en suelos calcáreos de Apatzingán, y a la concentración que maximizó el rendimiento de naranja en suelos calcáreos de Florida (Tucker *et al.*, 1995; Alva y Tucker, 1999); para K, Ca y Mn, los índices resultaron inferiores a los de limón mexicano:

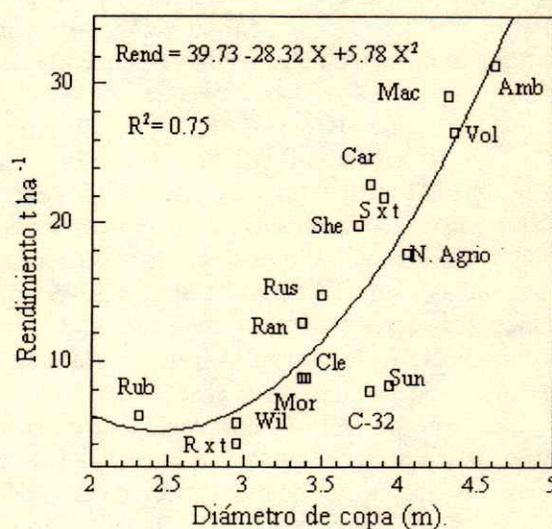


Figura 3. Rendimiento de fruta en 2001 en función del diámetro de copa de árboles de naranja. Amb = Amblicarpa; Car = Carrizo; Cle = Cleopatra; N. agrio = Naranja agrio; Mac = Macrofila; Mor = Morton; Ran = Rangpur; Rub = Rubidoux; Rus = Rusk; R x t = Rangpur por trifoliado; S x t = Sunki por trifoliado; She = Shekwasha; Sun = Sun Chu Sha; Vol = Volkameriana; Wil = Willits.

en contraste, fueron superiores para P, Mg y Cu. Estas diferencias se deben al tipo de portainjerto empleado, condiciones climáticas del sitio, así como a factores específicos de manejo (tipo, época, frecuencia y forma de fertilización); sin embargo, resultan de utilidad por que en la región no se cuenta con indicadores apropiados de la nutrición de naranja Valencia, en especial con diferentes tipos de portainjertos.

CONCLUSIONES

- Los suelos Calcisol vértico, migajón arcilloso, plantados con cítricos son calcáreos ($> 12.38\%$ CaCO_3), pH alcalino (8.5), pobres en N, P, Fe, Mn y Zn; muy pobres en carbono orgánico, contenido alto de Mg y de mediano a pobre en K; sin embargo, la relación $[\text{K}/(\text{Ca} + \text{Mg})]$ es óptima para el crecimiento de los cítricos. Las propiedades físico-químicas del suelo afectaron negativamente el crecimiento, vigor, rendimiento y la calidad de fruto, así como la concentración nutrimental foliar de los árboles de naranja.

- Los portainjertos mostraron diferencias en absorción nutrimental; Naranja agrio fue el menos eficiente para P, mientras que Volkameriana (tipo limón) registró la menor concentración de Mg. Todos los portainjertos fueron inferiores al nivel de suficiencia para K y, de ellos, Carrizo y Cleopatra tuvieron los niveles de suficiencia más bajos; también se observaron diferencias en concentraciones de Mn y los cítricos mostraron las menores concentraciones foliares.

- La relación entre K en el follaje y el cociente $[\text{K}/(\text{Ca} + \text{Mg})]$ en hojas de naranja fue lineal ($R^2 = 0.92$). Macrofila tuvo el valor más alto de $[\text{K}/(\text{Ca} + \text{Mg})]$ y concentración de K, mientras que en Carrizo y Cleopatra fue lo opuesto. Esto se relacionó con acumulación de K en portainjertos severamente afectados por clorosis férrica y con una alta tasa de translocación de K de la hoja al fruto en portainjertos (Carrizo) con buena adaptación al suelo calcáreo.

- El rendimiento de fruta se correlacionó con el vigor del árbol (adaptación al suelo calcáreo); las variables volumen de copa y diámetro de copa podrían emplearse como indicadores de rendimiento; sin embargo, el diámetro de copa es más fácil de medir que el volumen de copa.

- En naranja Valencia no se cuenta con índices de balance nutrimental para el estado de Colima; los índices resultaron iguales que para limón mexicano en el caso de N, pero fueron diferentes para P, K, Ca,

Mg, Mn y Cu. Esto podría deberse a las diferentes necesidades nutrimentales de naranja con respecto al limón, al tipo de portainjerto empleado y a condiciones climáticas de la región.

LITERATURA CITADA

- Alva, A.K. y S. Paramasivam. 1998. Nitrogen management for high yield and quality of citrus in sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1335-1342.
- Alva, A.K. y D.H. Tucker. 1999. Soils and nutrition. pp. 59-71. *In: Timmer, L.W. y L.W. Duncan (eds.). Citrus health management. The American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN.*
- Campbell, C.W. 1972. Rootstock effects on tree size and yield of "Tahiti" lime. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 85: 332-334.
- Castle, W.S. y F.G. Gmitter. 1999. Rootstock and scion selection. pp. 21-24. *In: Timmer, L.W. y L.W. Duncan (eds.). Citrus health management. The American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN.*
- Castle, W.S. y A.H. Krezdorn. 1975. Effects of citrus rootstocks on root distribution and leaf mineral content of "Orlando" tangelo trees. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 100: 1-4.
- Castle, W.S., D.P.H. Tucker, A.H. Krezdorn y C.O. Youtsey. 1993. Rootstocks for Florida citrus. Publication SP-42. University of Florida. Gainesville, FL.
- CoHort Software. 1995. CoStat Manual 5.0. Minneapolis, MN.
- Fallahi, E. y D.R. Rodney. 1992. Tree size, yield, fruit quality, and leaf mineral nutrient concentration of "Fairchild" mandarin on six rootstocks. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 117: 28-31.
- FAO (Food and Agricultural Organization). 1991. Soil resources: An explanatory note to FAO World Resources Map at 25 000 scale. *World Soil Resources Rep.* 66. Rome, Italy.
- Ferguson, L., N. Sakovich y M.L. Roose. 1990. California citrus rootstocks. Publication 21477. University of California. Davis, CA.
- Goldschmidt, E.E. y P. Spiegel-Roy. 1996. *Biology of citrus.* Cambridge University Press. Cambridge, Great Britain.
- Grunces, D.L., P.R. Stout y J.R. Brownell. 1970. Grass tetany of ruminants. *Adv. Agron.* 22: 331-374.
- Jackson, L.K. 1999. Citrus cultivation. pp. 17-21. *In: Timmer, L.W. y L.W. Duncan (eds.). Citrus health management. The American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN.*
- Horwitz, E. 1980. *Official methods of analysis.* 13th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC.
- Kenworthy, A.L. 1967. Plant analysis and interpretation of analysis for horticultural crops. pp. 59-76. *In: Soil testing and plant analysis. Part II. Soil Science Society of America. Madison, WI.*
- Kidambi, S.P., A.G. Matches, T.P. Karnes y J.W. Keeling. 1993. Mineral concentrations in forage sorghum grown under two harvest management systems. *Agron. J.* 85: 826-833.
- Koo, R.C.J. 1984. Recommended fertilizer and nutritional sprays for citrus. Bulletin 536D. Agricultural Experiment Station, University of Florida. Gainesville, FL.
- Maldonado T., R., J.D. Etchevers-Barra, G. Alcántar-González, J. Rodríguez A. y M.T. Colinas L. 2001. Estado nutrimental del limón mexicano en suelos calcimórficos. *Terra* 19: 163-174.

- Obreza, A.T., A.K. Ashok y D.V. Calvert. 1998. Citrus fertilizer management on calcareous soils. Document CH086. University of Florida. Gainesville, FL.
- Paramasivam, S., A.K. Alva, A. Fares y K.S. Sajwan. 2001. Estimation of nitrate leaching in an Entisol under optimum citrus production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 914-921.
- Pérez-Zamora, O., V. Medina U. y S. Becerra R. 2002. Crecimiento y rendimiento de naranja Valencia injertada en 16 portainjertos de cítricos establecidos en suelo calcimórfico y calidad de jugo. *Agrociencia* 36: 137-148.
- Pérez-Zamora, O., S. Becerra R. y V.M. Medina U. 2003. Selección de portainjertos para naranja "Valencia" en suelos calcimórficos. *Terra* 21: 47-55.
- Roose, M.L., D.A. Cole, D. Atkin y D.R. Kupper. 1989. Yield and tree size of four citrus cultivars on 21 rootstocks in California. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 114: 678-684.
- Tucker, D.P.H., A.K. Alva, L.K. Jackson y T.A. Wheaton. 1995. Nutrition of Florida citrus trees. *Coop. Ext. Serv. Publ.* SP169. University of Florida. Gainesville, FL.
- Walls, L.L. y C.W. Gehrke, 1974. The automatic method for the determination of directly available P_2O_5 in fertilizer. *J. Assoc. Off. Anal. Chemists* 57: 787-790.
- Wardowski, W., J. Soule, W. Grierson y G.W. Westbrook. 1979. Florida quality test. Bulletin 188. Florida Cooperative Ext. Service. Inst. of Food and Agric. Sci. University of Florida, Gainesville, FL.
- Wheaton, T.A., J.D. Whitney, W.S. Castle, R.P. Muraro, H.W. Browning y D.P. Tucker. 1995. Citrus scion and rootstock, topping height, and tree spacing affects tree size, yield, fruit quality, and economic return. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 120: 861-870.
- Zekri, M. 1995. Nutritional deficiencies in citrus trees: Iron, zinc and manganese. *Citrus Ind.* 76: 16-17.
- Zekri, M. y L.R. Parsons. 1989. Growth and root hydraulic conductivity of several citrus rootstocks under salt and polyethylene glycol stresses. *Physiol. Plant* 77: 99-106.

CRECIMIENTO Y ESTADO NUTRIMENTAL DE PLÁNTULAS DE TOMATE EN SOLUCIONES NUTRITIVAS CON DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE CALCIO Y POTENCIAL OSMÓTICO

Growth and Nutrient Status of Tomato Seedlings in Nutrient Solutions with Different Calcium Concentrations and Osmotic Potential

O.G. Villegas-Torres^{1†}, P. Sánchez-García², G.A. Baca-Castillo², M.N. Rodríguez-Mendoza², C. Trejo², M. Sandoval-Villa² y E. Cárdenas-Soriano³

RESUMEN

Se realizó un experimento en invernadero para evaluar el efecto de la concentración de calcio y el potencial osmótico de la solución nutritiva en el crecimiento y estado nutricional de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), híbrido Gabriela. Se estudiaron tres concentraciones de Ca²⁺ (30, 45 y 60%) con relación al total de los cationes y tres potenciales osmóticos (-0.072, -0.092 y -0.112 MPa) de la solución nutritiva. Se usó un diseño completamente al azar con un arreglo factorial completo de tratamientos con tres repeticiones. Se midieron área foliar, producción de materia seca de plántula en raíz, tallo y hojas, además, concentración y acumulación de nutrimentos en cada uno de sus órganos. Con 60% de calcio en la solución nutritiva, la producción de la materia seca de la raíz se incrementó 41.3% con respecto de la producida por las plántulas nutridas con 45%. Con 30% de calcio en la solución se favoreció la concentración de fósforo (23.80%), potasio (30.95%) y magnesio (27.27%), y la acumulación de fósforo (33.33%) y magnesio (26.31%) en las plántulas. La concentración de calcio en las plántulas fue significativamente superior (48.72%) cuando se nutrieron con 60% de este nutrimento en la solución nutritiva que con 30% y 45%. El contenido de calcio y el potencial osmótico de la solución nutritiva tuvieron efectos significativos en la concentración de nutrimentos en la raíz, tallo y hojas de las plántulas de tomate.

Palabras clave: solución nutritiva de Steiner, híbrido Gabriela, *Lycopersicon esculentum*.

¹ Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, ² Instituto de Recursos Naturales, ³ Instituto de Fitosanidad, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

[†] Autor responsable (voscar@colpos.mx)

Recibido: Junio de 2003. Aceptado: Agosto de 2004.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 23: 49-56.

SUMMARY

A greenhouse experiment was conducted to evaluate the effect of calcium concentration and the osmotic potential of the nutrient solution on growth and nutrient status of Gabriela hybrid tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Three calcium concentrations (30, 45, and 60%) as a percentage of the total of cations and three osmotic potentials (-0.072, -0.092, and -0.112 MPa) of the nutrient solution were used. A completely randomized design with a factorial array of treatments with three replicates was used. Leaf area, seedling dry matter weight of roots, stems and leaves, and nutrient accumulation and concentration in each organ were determined. Nutrient solution with 60% calcium increased seedling root dry weight 41.3% compared with that produced by the nutrient solution with 30 and 45% calcium. The nutrient solution with 30% calcium increased phosphorus (24%), potassium (31%) and magnesium (27%) concentration and seedlings phosphorus (33%) and magnesium (26%) accumulation in seedlings. Calcium concentration was higher (49%) when they were fed 60% calcium than when fed 30 or 45%. Calcium content and osmotic potential of the nutrient solution had a significant effect on the nutrient concentration in root, stem, and leaves of tomato seedlings.

Index words: Steiner's nutrient solution, hybrid Gabriela, *Lycopersicon esculentum*.

INTRODUCCIÓN

La producción de plántulas en charolas de poliestireno o polietileno, con turba y en condiciones de invernadero, es una demanda de las empresas agrícolas, ya que se incrementa su calidad en comparación con las producidas en almácigos con suelo y a cielo abierto.

La plántula es la primera fase y la más sensible en el proceso de producción de especies hortícolas y su crecimiento y el estado nutricional de la misma están directamente relacionados con precocidad, rendimiento, tamaño y número de frutos (Klapwijk, 1986; Basoccu y Nicola, 1995; Marković *et al.*, 1997). Además, las plántulas con contenido mayor de materia seca son más resistentes al trasplante y se adaptan fácilmente (Cornillón, 1999).

Con la nutrición pueden modificarse las características morfológicas y el crecimiento de las plántulas. La mayoría de las soluciones nutritivas recomendadas se han obtenido mezclando los nutrientes en diferentes proporciones y al azar, y sembrando posteriormente un cultivo; la mezcla de nutrientes donde el cultivo se desarrolló mejor se recomienda como una solución nutritiva específica para dicho cultivo. Esta forma de recomendar una solución nutritiva como específica no garantiza que exista otra solución en la cual se desarrolle mejor el cultivo (De Rijck y Schrevens, 1998). La investigación de las soluciones nutritivas puede ser sistemática, lo cual permite evaluar todas las combinaciones posibles (Steiner, 1961).

El funcionamiento normal del organismo vegetal ocurre con una determinada relación de cationes y aniones en la solución nutritiva; el crecimiento de los órganos aéreos de las plantas y el desarrollo del sistema radical dependen del equilibrio fisiológico de la solución nutritiva (Yágodin, 1986). En este sentido, las características de la solución nutritiva que más influencia tienen en el crecimiento, rendimiento y en la calidad de los productos vegetales de interés antropogénico son: la relación mutua de cationes ($K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}$), la relación mutua de aniones ($NO_3^- + H_2PO_4^- + SO_4^{2-}$), la concentración total de iones y el pH (Steiner, 1961).

La solución nutritiva universal consiste de: NO_3^- , 12 me L⁻¹; $H_2PO_4^-$, 1 me L⁻¹; SO_4^{2-} , 7 me L⁻¹; K^+ , 7 me L⁻¹; Ca^{2+} , 9 me L⁻¹; y Mg^{2+} , 4 me L⁻¹, cuando el potencial osmótico es -0.072 MPa y el pH es 6.5 (Steiner, 1984). Sin embargo, las necesidades nutricionales de los vegetales dependen de factores como: especie, variedad, etapa fenológica (Steiner, 1973, 1984; Carpena *et al.*, 1987) y ambiente físico en que se desarrolla la planta, el cual afecta la tasa de absorción y la distribución de nutrientes dentro de la misma, además de la tasa de crecimiento (Adams, 1999).

Con base en los criterios de Steiner (1984) para las soluciones nutritivas, puede modificarse la

relación porcentual de cualquier ion, manteniendo las relaciones mutuas entre cationes y entre aniones y la cantidad total de iones. Tal modificación debe hacerse dentro de ciertos límites de concentración relativa de los iones involucrados. De otra manera, la interacción entre los mismos puede influenciar fuertemente la absorción y la distribución o función de algún nutriente en la planta y, con ello, inducir deficiencias o toxicidades y, en consecuencia, modificar negativamente su crecimiento (Schwarz, 1995). Con relación al calcio, el antagonismo con K^+ , Mg^{2+} y NH_4^+ puede disminuir sustancialmente su absorción, dependiendo de la concentración relativa en la solución nutritiva, pero su absorción es estimulada por NO_3^- ó $H_2PO_4^-$ (Fried y Shapiro, 1979; Jones *et al.*, 1991).

Una propiedad fisicoquímica inherente a las soluciones es el potencial osmótico, el cual depende de la cantidad de solutos disueltos (Aguilera y Martínez, 1996). El incremento de la concentración absoluta de los nutrientes en la solución disminuye el potencial osmótico de la misma, lo cual puede provocar una absorción menor de agua (Ehret y Ho, 1986a) y nutrientes por la planta (Steiner, 1973). Por el contrario, si se aplica una cantidad menor de nutrientes en la solución que los requeridos por la planta, pueden inducirse deficiencias nutricionales (Ehret y Ho, 1986b). En un potencial osmótico menor (-0.21 MPa), las plantas absorben más K, a expensas del calcio, y existe una fuerte preferencia por el $H_2PO_4^-$ y, en menor medida, por el NO_3^- , ambos a expensas de la absorción de SO_4^{2-} (Steiner, 1973; Schwarz, 1995). No se reportan cambios en el crecimiento de las plantas de tomate cuando la diferencia en el potencial osmótico es menor que -0.02 MPa (Steiner, 1961).

Sin minimizar la importancia de los macronutrientes en el desarrollo y crecimiento de las plantas, el calcio es de especial interés, ya que está involucrado en muchos procesos bioquímicos y morfológicos en las plantas y tiene relación con desórdenes fisiológicos en frutales y hortalizas (Millaway y Wiersholm, 1979). La mayoría de las funciones del calcio como componente estructural de macromoléculas están relacionadas con su capacidad de coordinación, por la cual provee enlaces intermoleculares estables pero reversibles, con predominancia en las paredes celulares y la membrana celular (Marschner, 2002); por consiguiente, es esencial mantener la integridad de las mismas (Tzoutzoukou y Bouranis, 1997). El calcio es un

mensajero en la transducción de señales externas (Owen, 1988; Poovaiah y Reddy, 1993). Una concentración alta de calcio estimula la actividad de la enzima α -amilasa en la germinación de las semillas de cereales (Marschner, 2002). El calcio está implicado en el funcionamiento del floema (Eckardt, 2001) y en la formación de la membrana celular durante la mitosis (Marmé, 1983), reduce la tasa de senescencia de las plantas y la maduración del fruto de tomate (Gerasopoulos y Chebli, 1999), regula la expresión de ciertos genes (Pandey *et al.*, 2000), activa hormonas del crecimiento vegetal, modifica selectivamente el transporte de cationes a través de la membrana, está involucrado en el movimiento de la hoja de *Mimosa*, transporte de auxinas, abscisión, senescencia, secreción de protones mediado por auxinas, alteraciones ultraestructurales en la membrana, daños a la membrana y aflojamiento, fototaxis en *Chlamydomonas*, movimiento de cloroplastos en *Mougeotia*, afecta la actividad de las enzimas piruvato kinasa, lipasa alcalina, fosfolípido acil-hidrolasa, glutamato dehidrogenasa, NAD kinasa y el transporte microsomal de Ca^{2+} (Marmé, 1983).

Las carencias de calcio se manifiestan en una capacidad menor de síntesis de proteínas en la planta y desarrollo radical: se forman raíces oscuras, cortas y fraccionadas, influyendo directamente en la absorción de otros elementos; correlativamente, se nota en las hojas una clorosis marcada, principalmente en las jóvenes; poco crecimiento de los tallos y las hojas, produciéndose, además, muerte en el meristemo; las plantas crecen y se desarrollan menos (Rodríguez, 1996).

El objetivo del presente trabajo consistió en evaluar el efecto de la concentración relativa de calcio y del potencial osmótico de la solución nutritiva sobre el crecimiento y estado nutricional de las plántulas de tomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó del 8 de abril al 16 de mayo de 2002, en un invernadero con temperaturas promedio de 38 °C de día y 12 °C de noche. Se utilizó tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), híbrido Gabriela, de crecimiento indeterminado y de buen vigor. Las semillas se sembraron en charolas de polietileno negro de 200 cavidades. Se colocó una semilla por cavidad, a una profundidad aproximada de 5 mm. Se utilizó como sustrato turba Sogemix®.

Los tratamientos se diseñaron a partir de modificaciones a la solución nutritiva universal de Steiner (1984); en ésta, las concentraciones de NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} son (en me L⁻¹): 12, 1, 7, 7, 9 y 4, respectivamente, cuando el potencial osmótico es de -0.072 MPa. El total de aniones son 20 me L⁻¹ y el de cationes, 20 me L⁻¹. En términos de porcentaje, de los aniones, el NO_3^- representa 60%; H_2PO_4^- , 5%; y SO_4^{2-} , 35%. De los cationes, el K^+ representa 35%; Ca^{2+} , 45%; y Mg^{2+} , 20%.

Se consideraron tres concentraciones de Ca^{2+} con respecto al total de cationes: 30% (6 me L⁻¹), 45% (9 me L⁻¹) y 60% (12 me L⁻¹); y tres niveles de potencial osmótico: -0.072, -0.092 y -0.112 MPa. El procedimiento para obtener la concentración de nutrientes con el respectivo potencial osmótico de la solución nutritiva fue como se describe a continuación (con base en el propuesto por Steiner, 1984).

(1) Se modificó la concentración de Ca^{2+} con base en la relación $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, 7:9:4 (en me L⁻¹). Cuando la concentración de Ca^{2+} fue 9 me L⁻¹, la suma de las concentraciones de $\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$ fue 11 me L⁻¹ (7 + 4 me L⁻¹, respectivamente). Con la concentración de Ca^{2+} de 6 me L⁻¹, $\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$ fue 14 me L⁻¹ (para mantener la concentración total de cationes en 20 me L⁻¹). Se procedió a una regla de tres: $\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$ fue 11 me L⁻¹, K^+ fue de 7 me L⁻¹; $\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$ fue 14 me L⁻¹, K^+ fue 8.91 me L⁻¹ (14*7/11). El mismo procedimiento se siguió con Mg^{2+} : $\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$ fue 11 me L⁻¹, Mg^{2+} fue de 4 me L⁻¹; $\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$ fue 14 me L⁻¹, Mg^{2+} fue de 5.09 me L⁻¹ (14*4/11). Con el procedimiento anterior, se obtuvo la concentración de cada uno de los cationes, cuando Ca^{2+} fue de 6 me L⁻¹ (se siguieron los mismos pasos con calcio de 12 me L⁻¹) y manteniendo la relación $\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$ (7:4) de la solución universal de Steiner (1984): K^+ , 8.91 me L⁻¹; Ca^{2+} , 6 me L⁻¹; y Mg^{2+} , 5.09 me L⁻¹ (total de cationes, 20 me L⁻¹).

(2) Una vez obtenida la nueva concentración de cada uno de los cationes, se procedió a ajustar la solución de acuerdo con el potencial osmótico seleccionado; para ello, se consideraron, también, las concentraciones de los aniones de la solución universal de Steiner (1984). La nueva solución obtenida fue (en me L⁻¹): NO_3^- , 12; H_2PO_4^- , 1; SO_4^{2-} , 7; K^+ , 8.9; Ca^{2+} , 6; y Mg^{2+} , 5.09. Las concentraciones de los iones anteriores se transformaron a milimoles (para obtener empíricamente el potencial osmótico de la solución nutritiva), lo cual se consiguió al dividir los miliequivalentes entre el número de valencia del

respectivo ion: NO_3^- , 12; H_2PO_4^- , 1; SO_4^{2-} , 3.5; K^+ , 8.9; Ca^{2+} , 3; y Mg^{2+} , 2.5; posteriormente, se sumaron los milimoles de todos los iones: 30.9 mmol. Esta cantidad se multiplicó por -0.0024 para obtener el potencial osmótico (en MPa) de la solución nutritiva: $30.9 \times -0.0024 = -0.074$ MPa. Para ajustar el potencial osmótico de la solución nutritiva obtenida (-0.074 MPa) a la deseada (-0.072 , -0.092 ó -0.112 MPa), se obtuvo el factor de conversión: potencial osmótico deseado entre potencial osmótico obtenido = $-0.072/-0.074 = 0.969$. Este factor se multiplicó por la concentración (en mmol) de cada uno de los iones: NO_3^- , 11.63; H_2PO_4^- , 0.97; SO_4^{2-} , 3.39; K^+ , 8.63; Ca^{2+} , 2.91; y Mg^{2+} , 2.47. Para comprobar el ajuste de la solución nutritiva a la presión osmótica deseada, se suman nuevamente los mmol modificados de cada uno de los iones, el resultado se multiplica por -0.0024 : $29.997 \times -0.0024 = -0.072$ MPa. Finalmente, para expresar las concentraciones de los iones en me L^{-1} , se multiplican los mmol por la valencia del respectivo ion: NO_3^- , 11.63; H_2PO_4^- , 0.97; SO_4^{2-} , 6.78; K^+ , 8.63; Ca^{2+} , 5.82; y Mg^{2+} , 4.93. El procedimiento anterior se realizó para cada uno de los tratamientos, de manera que se determinó la concentración de los iones con el correspondiente potencial osmótico (obtenido empíricamente) de la solución nutritiva. En los tratamientos se mantuvieron constantes las relaciones porcentuales entre los aniones.

Los tratamientos consistieron en nueve soluciones nutritivas (Cuadro 1) resultantes de la combinación de las tres relaciones de Ca^{2+} :cationes (a expensas de la relación $\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$) y los tres potenciales osmóticos. A pesar de que las concentraciones absolutas de cada uno de los iones son diferentes, las relaciones porcentuales entre aniones y cationes se mantienen.

El arreglo de tratamientos fue factorial completo 3^2 , con tres repeticiones por tratamiento. El diseño de distribución en el invernadero fue completamente al azar. Los primeros 17 días después de la siembra (dds) se regó con agua destilada. Del día 18 al día 39 después de la siembra, se regó con la solución nutritiva correspondiente a cada tratamiento (Cuadro 1).

Las soluciones nutritivas se prepararon con sales grado reactivo de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 , K_2SO_4 , KH_2PO_4 y MgSO_4 , y agua destilada. El pH se ajustó a 5.5 con H_2SO_4 1N. En todas las soluciones nutritivas, las concentraciones de los micronutrientes fueron (mg L^{-1}): Fe, 3; B, 0.5; Mn, 0.5; Zn, 0.05; Cu, 0.045 y Mo, 0.01. El Fe se proporcionó como Fe-EDTA del producto comercial Librel®. Las plántulas se regaron diariamente a las 9:00 h y las 15:00 h.

A 39 dds se determinaron el área foliar con un integrador de área foliar (modelo LI-3000, LI-COR, Lincoln, NE), el peso de materia seca de raíz, tallo y hojas después de haber permanecido estos órganos en una estufa con circulación forzada de aire a una temperatura de 70 °C durante 72 h, y la concentración de nutrientes de raíz, tallo y hojas. El N total se determinó con el método microkjeldahl; el P, K, Ca y Mg se analizaron por el método de digestión convencional (Alcántar y Sandoval, 1999) y la cuantificación se realizó por espectrometría de emisión y plasma acoplada e inducida (AES - ICP) (Kalra, 1998). El análisis de varianza de las variables de respuesta se realizó para los factores principales y su interacción utilizando el Sistema de Análisis Estadístico para Windows, Versión 6.10 (SAS Institute, 1994).

Cuadro 1. Composición química de las soluciones nutritivas.

Tratamiento	Iones y concentración						PO [†]
	NO_3^-	H_2PO_4^-	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	
	me L ⁻¹						MPa
1	11.63	0.97	6.78	8.63	5.82	4.93	-0.072
2	14.86	1.24	8.67	11.02	7.43	6.30	-0.092
3	18.09	1.51	10.55	13.42	9.05	7.67	-0.112
4	12.00	1.00	7.00	7.00	9.00	4.00	-0.072
5	15.33	1.28	8.94	8.94	11.50	5.11	-0.092
6	18.67	1.55	10.89	10.89	14.00	6.22	-0.112
7	12.39	1.03	7.23	5.22	12.39	3.00	-0.072
8	15.84	1.32	9.24	6.72	15.84	3.84	-0.092
9	19.28	1.61	11.25	8.18	19.28	4.67	-0.112

[†] PO = potencial osmótico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Área Foliar y Producción de Materia Seca

Algunos criterios de calidad de plántula que pueden considerarse son el área foliar, porque determina el potencial de la actividad fotosintética (Klapwijk, 1986) y la producción de biomasa, como un indicador del crecimiento vegetal (Urrestarazu *et al.*, 1999). Estas variables no fueron modificadas significativamente ($P \leq 0.05$) por la concentración de Ca^{2+} en la solución nutritiva. Al considerar a cada uno de los órganos de la plántula por separado, se observó que sólo la raíz sufrió cambios significativos ($P \leq 0.05$): con 60% de Ca^{2+} en la solución nutritiva, la producción de materia seca de este órgano se incrementó 41.3% con respecto de la producida por las plántulas nutridas con 45% (Cuadro 2). Estos resultados contrastan con lo reportado por Tapia y Gutiérrez (1997) quienes mencionaron que, en plántulas de tomate cv. Michigan, también de crecimiento indeterminado, hojas, tallos y raíces contribuyeron de manera similar al peso de materia seca total de la plántula.

Los niveles de potencial osmótico evaluados no tuvieron efecto significativo ($P \leq 0.05$) en el área foliar, ni en la producción de materia seca de la plántula, ni en cada uno de sus órganos (Cuadro 2). Esto difiere con lo reportado para la variedad Humaya, en la cual la materia seca de la plántula se incrementó significativamente (12.7%) al reducir el potencial osmótico de la solución nutritiva de -0.073 a -0.097 MPa (Lara, 1998). Lo anterior puede atribuirse

Cuadro 2. Producción de materia seca de raíz (MSR) de plántulas de tomate por efecto de la concentración de Ca^{2+} y potencial osmótico (PO) de la solución nutritiva.

Factor	MSR mg plántula ⁻¹
Ca^{2+} (%)	
30	54.0 ab [†]
45	44.6 b
60	62.9 a
PO (MPa)	
-0.072	58.9 a
-0.092	52.9 a
-0.112	49.7 a
$\text{Ca}^{2+} \times \text{PO}$	ns
CV (%)	18.3

[†] Promedios seguidos de la misma letra en columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). ns, diferencias no significativas (Tukey, $P \leq 0.05$). CV = coeficiente de variación.

a la respuesta diferencial de las especies y variedades de una misma especie de plantas al potencial osmótico de la solución nutritiva (Urrestarazu *et al.*, 1999).

La concentración "ideal" de calcio en la solución nutritiva para la producción de tomate, y la mayoría de las especies hortícolas, es de 45% cuando el potencial osmótico es de -0.072 MPa (Steiner, 1984); sin embargo, en el híbrido Gabriela podría utilizarse 30%, debido a que el efecto de las concentraciones de calcio evaluadas no fue estadísticamente diferente ($P \leq 0.05$). También existe la alternativa de usar potenciales osmóticos de -0.072, -0.092 y -0.112 MPa, puesto que estos niveles no tuvieron influencia significativa ($P \leq 0.05$), ni su interacción con Ca^{2+} , en la producción de materia seca de la plántula, ni de ninguno de sus órganos, en particular.

Concentración y Acumulación de Nutrientes

El análisis de los resultados se basó en el hecho que durante la nutrición de las plantas, en la solución que contiene la mezcla de elementos, el papel esencial no lo juega la concentración absoluta de cada nutriente, sino la relación mutua entre ellos (Yágodin, 1986). En este sentido, en el experimento las concentraciones absolutas de los iones fueron distintas, pero la relación porcentual mutua entre aniones se mantuvo constante; por consiguiente, se espera el efecto similar de éstos en los nueve tratamientos (Cuadro 1) y, por lo tanto, las diferencias observadas en las variables se debieron a la concentración de calcio, con la correspondiente relación porcentual mutua de cationes ($\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), y el potencial osmótico de las soluciones nutritivas.

La concentración de calcio en la solución nutritiva tuvo efecto significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración y acumulación de nutrientes en las plántulas de tomate (Cuadro 3). Con 30% de calcio en la solución, se favoreció la concentración de fósforo (23.80%), potasio (30.95%) y magnesio (27.27%), y la acumulación de fósforo (33.33%) y magnesio (26.31%). La concentración de calcio en las plántulas fue significativamente superior (48.72%) cuando se nutrieron con 60% de este nutriente en la solución nutritiva que con 30 y 45%.

El potencial osmótico de la solución nutritiva tuvo efecto significativo en la concentración de nutrientes de la plántula de tomate (Cuadro 3). La concentración de nitrógeno y fósforo fue superior (8.98 y 23.80%, respectivamente) con el potencial

Cuadro 3. Concentración y acumulación de nutrimentos en plántulas de tomate por efecto de la concentración de Ca^{2+} y potencial osmótico (PO) de la solución nutritiva.

Factor	g kg^{-1}					mg plántula $^{-1}$				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
Ca $^{2+}$ (%)										
30	90.5 a ¹	13.1 a	54.6 a	39.5 b	27.6 a	3.9 a	0.6 a	2.3 a	1.7 b	1.2 a
45	83.6 a	9.7 b	42.1 b	38.2 b	21.4 b	3.2 a	0.4 b	1.7 a	1.5 b	0.8 b
60	82.7 a	10.7 b	42.2 b	58.4 a	23.0 b	4.0 a	0.5 ab	2.0 a	2.8 a	1.1 ab
PO (MPa)										
-0.072	79.5 b	10.0 b	46.0 a	44.5 a	23.7 a	3.5 a	0.5 a	2.0 a	2.0 a	1.0 a
-0.092	86.5 ab	10.6 b	44.2 a	43.7 a	23.1 a	3.8 a	0.5 a	2.0 a	2.0 a	1.0 a
-0.112	90.8 a	13.0 a	48.7 a	47.8 a	25.2 a	3.8 a	0.6 a	2.0 a	2.0 a	1.1 a
Ca $^{2+}$ x PO	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	10.3	16.9	18.2	23.0	15.6	21.9	25.0	27.0	31.8	25.9

¹Promedios seguidos de la misma letra, dentro de cada columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = no significativas (Tukey, $P \leq 0.05$). CV = coeficiente de variación.

osmótico de -0.112 MPa. Los datos anteriores corresponden con lo reportado por Schwarz (1995) quien mencionó que un potencial osmótico bajo de la solución nutritiva favorece la absorción de fosfato y nitrato.

La interacción de los dos factores, concentración de Ca^{2+} y potencial osmótico de las soluciones nutritivas, no tuvo efecto estadísticamente significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración y en la acumulación de los nutrimentos considerados (Cuadro 3).

El efecto de la concentración de calcio y potencial osmótico de la solución nutritiva en la concentración de nutrimentos en la raíz, tallo y hojas se muestra en el Cuadro 4. El contenido de calcio en la solución tuvo efecto significativo ($P \leq 0.05$) en la concentración de nutrimentos en los órganos de las plántulas. En raíz, se incrementó el fósforo (33.33%) y el potasio (56.52%) cuando la concentración de calcio en la solución fue de 30%, mientras que la concentración de calcio se incrementó (60%) cuando la solución nutritiva tuvo 60% de este nutrimento. En tallo, la concentración de calcio se incrementó de manera lineal con el contenido del mismo en la solución nutritiva. En hojas, la concentración de fósforo y magnesio se incrementó (42.85 y 57.14%, respectivamente) con 30% de calcio en la solución nutritiva; el incremento de calcio fue 39.53% cuando el contenido de este nutrimento en la solución nutritiva fue de 60%.

El potencial osmótico de la solución nutritiva tuvo efecto significativo en la concentración de nutrimentos en los órganos de las plántulas (Cuadro 4). Con -0.112 MPa se incrementó la

concentración de nitrógeno (11.53%) y fósforo (33.33%) en la raíz, la de fósforo (42.85%) en tallo, mientras que los niveles de potencial osmótico evaluados no tuvieron efecto estadísticamente diferente ($P \leq 0.05$) en la concentración de nutrimentos de las hojas.

Se manifestó una tendencia de concentración de calcio: raíz < tallo < hojas. Lo anterior podría deberse a la forma de transporte del calcio en el interior de la plántula, ya que este elemento presenta transporte unidireccional de raíz a hojas siguiendo el flujo transpiratorio (Millaway y Wiersholm, 1979).

Es importante destacar que, a pesar de las diferencias en las concentraciones de los nutrimentos en raíz, tallo y hojas, no hubo diferencia estadística en la producción de materia seca de la plántula, ni en área foliar.

El estado nutricional de la plántula es de gran importancia si se considera que esta característica tiene relación directa con la capacidad productiva de las plántulas (Weston y Zandstra, 1989); sin embargo, los requerimientos varían con la especie y variedad. En el híbrido de tomate Humaya, de crecimiento indeterminado, en el momento del trasplante (40 dds), la materia seca de vástago fue de 215.7 mg plántula $^{-1}$ y la concentración de nutrimentos (en g kg^{-1}) de 27.7, 3.2, 46.8, 25.6, y 11.3 para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente (Lara, 1998); mientras que la materia seca de vástago en el híbrido Gabriela (39 dds) fue de 423.7 mg plántula $^{-1}$ y la concentración de nutrimentos (en g kg^{-1}) de 28.4, 4.0, 16.4, 25.1 y 7.7 para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente (cuando la concentración de Ca^{2+} en la solución nutritiva fue de 60%).

Cuadro 4. Concentración de nutrimentos en los órganos de las plántulas de tomate por efecto de la concentración de Ca²⁺ y potencial osmótico (PO) de la solución nutritiva.

Factor	N	P	K	Ca	Mg
----- g kg ⁻¹ -----					
Raíz					
Ca ²⁺ (%)					
30	27.7 a [†]	3.6 a	17.4 a	7.0 b	9.0 a
45	27.0 a	2.9 b	11.3 b	7.9 b	7.5 a
60	25.7 a	3.3 b	11.5 b	11.8 a	8.4 a
PO (MPa)					
-0.072	24.7 b	3.0 b	13.5 a	8.9 a	8.8 a
-0.092	26.8 ab	3.1 b	13.3 a	8.6 a	8.2 a
-0.112	28.8 a	3.7 a	13.5 a	9.1 a	7.9 a
Ca ²⁺ x PO	ns	ns	*	ns	ns
CV (%)	9.1	17.5	15.3	21.8	19.9
Tallo					
Ca ²⁺ (%)					
30	29.0 a	4.2 a	18.6 a	8.8 c	7.5 a
45	26.7 a	3.5 a	17.1 a	11.2 b	6.9 a
60	26.8 a	3.5 a	16.6 a	15.9 a	7.5 a
PO (MPa)					
-0.072	26.2 a	3.2 b	15.9 a	11.7 a	6.8 b
-0.092	27.2 a	3.6 b	17.5 a	11.5 a	7.2 ab
-0.112	29.2 a	4.4 a	18.9 a	12.7 a	7.8 a
Ca ²⁺ x PO	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	12.29	17.26	22.31	14.64	11.37
Hojas					
Ca ²⁺ (%)					
30	33.8 a	5.2 a	21.5 a	23.7 c	11.8 a
45	29.6 a	3.8 b	16.7 b	26.7 b	7.9 b
60	30.0 a	4.6 ab	16.1 b	34.2 a	7.8 b
PO (MPa)					
-0.072	28.6 a	4.1 b	18.1 a	26.0 b	9.0 ab
-0.092	32.2 a	4.1 b	16.5 a	28.0 ab	7.9 b
-0.112	32.7 a	5.4 a	19.8 a	30.7 a	10.6 a
Ca ²⁺ x PO	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	19.0	14.3	17.4	8.0	15.6

[†]Promedios seguidos de la misma letra, dentro de cada columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). ns = no significativa (Tukey, $P \leq 0.05$). CV = coeficiente de variación.

CONCLUSIONES

- Con 60% de calcio en la solución nutritiva, la producción de la materia seca de la raíz se incrementó 41.03% con respecto de la producida por las plántulas nutridas con 45%.

- Con 30% de calcio en la solución, se favoreció la concentración de fósforo (23.80%), potasio (30.95%) y magnesio (27.27%), y la acumulación de fósforo (33.33%) y magnesio (26.31%). La concentración de calcio en las plántulas fue significativamente superior (48.72%) cuando se nutrieron con 60% de este

nutrimento en la solución nutritiva que con 30% y 45%.

- El contenido de calcio y el potencial osmótico de la solución nutritiva tuvieron efectos significativos en la concentración de nutrimentos en la raíz, tallo y hojas de las plántulas de tomate.

LITERATURA CITADA

- Adams, P. 1999. Plant nutrition demystified. *Acta Hort.* 481: 341-344.
- Aguilera-Contreras, M. y R. Martínez-Elizondo. 1996. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. 4a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Alcántar-González, G. y M. Sandoval-Villa. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Basoccu, L. y S. Nicola. 1995. Supplementary light and pretransplant nitrogen effects on tomato seedling growth and yield. *Acta Hort.* 396: 313-319.
- Carpena-Artes, O., A. Masaguer-Rodríguez y M.J. Sarro-Casillas. 1987. Evaluación de los contenidos minerales de raíz, tallo y hoja de plantas de tomate como índices de nutrición. *Ann. Edafología Agrobiol.* 46: 117-127.
- Cornillón, P. 1999. Fertirrigation and transplant production. *Acta Hort.* 487: 133-137.
- Demarty, M., C. Morvan y M. Thellier. 1984. Calcium and the cell wall. *Plant Cell Environ.* 7: 441-448.
- De Rijck, G. y E. Schrevens. 1998. Comparison of the mineral composition of twelve standard nutrient solutions. *J. Plant Nutr.* 21: 2115-2125.
- Eckardt, N.A. 2001. A calcium-regulated gatekeeper in phloem sieve tubes. *Plant Cell* 13: 989-992.
- Ehret, D.L. y L.C. Ho. 1986a. Translocation of calcium in relation to tomato fruit growth. *Ann. Bot. (London)* 58: 679-688.
- Ehret, D.L. y L.C. Ho. 1986b. Effects of osmotic potential in nutrient solution on diurnal growth of tomato fruit. *J. Exp. Bot.* 37: 1294-1302.
- Fried, M. y R.E. Shapiro. 1979. Soil plant relationships in ion uptake. *Ann. Rev. Phytopathol.* 17: 97-122.
- Gerasopoulos, D. y B. Chebli. 1999. Effects of pre- and postharvest calcium applications on the vase life of cut gerberas. *J. Hort. Sci. Biotech.* 74: 78-81.
- Jones Jr., J.B., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook. Micro-Macro Publishing. Athens, GA.
- Kalra, P.Y. 1998. Handbook of reference methods for use in plant analysis. CRC Press. Washington, DC.
- Kirkby, E.A. y D.J. Pilbeam. 1984. Calcium as a plant nutrient. *Plant Cell Environ.* 7: 397-405.
- Klapwijk, D. 1986. Production of tomato transplants in The Netherlands. *Acta Hort.* 190: 505-510.
- Lara-Herrera, A. 1998. Soluciones nutritivas para cuatro etapas fenológicas del jitomate. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Marković, V., M. Djurovka y Ž. Ilin. 1997. The effect of seedling quality on tomato yield, plant and fruit characteristics. *Acta Hort.* 462: 163-167.

- Marné, D. 1983. Calcium transport and function. pp. 599-625. *In*: Göttingen, A.P. y M.H. Zimmermann (eds.). Encyclopedia of plant physiology. New Series. Volume 15B. Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- Marschner, H. 2002. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic Press. London, England.
- Millaway, R.M. y L. Wiersholm. 1979. Calcium and metabolic disorders. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 10: 1-28.
- Neill, S.J., R. Desikan y J.T. Hancock. 2003. Nitric oxide signaling in plants. *New Phytol.* 159: 11-15.
- Owen, J.H. 1988. Role of abscisic acid in a Ca^{2+} second messenger system. *Physiol. Plant* 72: 637-641.
- Pandey, S., S.B. Tiwari, K.C. Upadhyaya y S.K. Sopory. 2000. Calcium signaling: Linking environmental signals to cellular functions. *Crit. Rev. Plant Sci.* 19: 291-318.
- Poovaiah, B.W. y A.S.N. Reddy. 1993. Calcium and signal transduction in plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* 12: 185-211.
- Rodríguez-Suppo, F. 1996. Fertilizantes: Nutrición vegetal. AGT Editor. Distrito Federal, México.
- SAS Institute. 1994. The SAS system for Windows. Release 6.10. Cary, NC.
- Schwarz, M. 1995. Soilless culture management. Advanced series in Agricultural Sciences 24. Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- Steiner, A.A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil* 15: 134-154.
- Steiner, A.A. 1973. The selective capacity of tomato plants for ions in a nutrient solution. pp. 43-53. *In*: Proceedings of Thrid International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands.
- Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. pp. 633-649. *In*: Proceedings of Sixth International Congress on Soilless Culture. International Society for Soilless Culture. Lunteren, The Netherlands.
- Tapia, M.L. y V. Gutiérrez. 1997. Distribution pattern of dry weight, nitrogen, phosphorus, and potassium through tomato ontogenesis. *J. Plant Nutr.* 20: 783-791.
- Tobias, R.B., W.S. Conway, C.E. Sams, K.C. Gross y B.D. Whitaker. 1993. Cell wall composition of calcium-treated apples inoculated with *Botrytis cinerea*. *Phytochemistry* 32: 35-39.
- Tzoutzoukou, C.G. y D.L. Bouranis. 1997. Effect of preharvest application of calcium on the postharvest physiology of apricot fruit. *J. Plant Nutr.* 20: 295-309.
- Urrestarazu, M., M. Guzmán, A. Sánchez, M.C. Salas y F.A. Lorente. 1999. Effect of evolution in the increase the nutrient solution electrical conduction on quality parameters of tomato seedlings. *Acta Hort.* 487: 213-218.
- Weston, L.A. y B.H. Zandstra. 1989. Transplant age and N and P nutrition effects on growth and yield of tomatoes. *HortScience* 24: 88-90.
- Yágodin, B.A. 1986. Agroquímica. Trad. al español por R. Rincón-Zabaco y F. Vargas-Salazar. Tomo I. Mir. Moscú. Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.

CONCENTRACIÓN DE CARBONO EN DIFERENTES TIPOS DE VEGETACIÓN DE LA SIERRA NORTE DE OAXACA

Carbon Concentration in Different Vegetation Types in the Northern Oaxaca Sierra

C. Figueroa-Navarro¹, J.D. Etchevers-Barra¹, A. Velázquez-Martínez^{1†} y M. Acosta-Mireles²

RESUMEN

La concentración y la acumulación de carbono en los principales componentes del bosque mesófilo (árboles, arbustos más hierbas y hojarasca) y sistemas agrícolas permanentes establecidos en condiciones de ladera, es un tema que se ha estudiado poco en México y en el mundo. En la presente investigación, se midió y se comparó la concentración de carbono en los componentes de diferentes tipos de vegetación [bosque de liquidámbar (*Liquidambar* sp.), aile (*Alnus* sp.) y encino (*Quercus* sp.), cafetales (*Coffea* sp.), *acahuales* y pastizales naturales] predominantes en la Sierra Norte de Oaxaca, México. Se colectaron muestras de fustes de árboles, ramas más hojas, arbustos más hierbas y hojarasca que se analizaron para establecer su concentración de carbono. Los fustes de las especies dominantes en el bosque mesófilo contenían 49.6% de carbono. *Alnus* y encino fueron las especies con la mayor y la menor concentración de carbono (51.3 y 47.3%, respectivamente), porcentajes estadísticamente diferentes. En hojas y ramas, la concentración promedio de carbono de las especies arbóreas fue de 51.2%. La más alta (52.8%) correspondió a *Alnus* y la más baja (49.5%) al encino, valores que fueron significativamente diferentes. La concentración de carbono promedio en los arbustos más hierbas y hojarasca colectados en los bosques y *acahuales* (47.0%), cafetales (41.4%) y hierbas de las praderas (34.6%) difirieron entre sí. En contraste, el porcentaje de carbono promedio en la hojarasca de todos los sistemas bosques y *acahuales* fue igual, con un promedio de 44.7%. Los resultados de este trabajo indican que los componentes de las vegetaciones

dominantes en paisajes de ladera presentan una concentración de carbono que no es la misma en todos los casos, lo cual debe ser considerado cuando se estime el tamaño de los almacenes de carbono para esa condición.

Palabras clave: vegetación de ladera, captura de carbono, *acahuales*.

SUMMARY

Carbon concentration and accumulation in the main components of the mountain rainforest (trees, shrubs, weeds, and litter) and in permanent agricultural systems located on hilly landscapes have been scarcely studied in Mexico and elsewhere. The objective of the present study was to determine carbon concentration in main forest components in different vegetation types [liquidambar forest (*Liquidambar* sp.), alder (*Alnus* sp.) and oak forest (*Quercus* sp.), coffee plantations (*Coffea* sp.), *acahuales* (vegetation related to slash and burn practices), and native grasslands] in the Sierra of Northern Oaxaca, Mexico, and to perform a comparison among them. Bole wood, crown (branches and leaves), shrubs plus herbs, and litter samples were collected and analyzed to establish the carbon concentration. Average bole carbon concentration of the dominant species was 49.6%. Alder and oak presented the highest and lowest carbon concentrations (51.3% and 47.3%, respectively), and these were significantly different. Average carbon concentration in the crowns of all tree species was 51.2%. The highest percentage of carbon was found in alder (52.8%) and the lowest in oak (49.5%). The average carbon percentage in shrubs plus herbs collected from forests and *acahuales* (47.0%), coffee tree plantations (41.4%) and grasslands (34.6%) were significantly different. In contrast, the mean carbon concentration of litter of all the systems forests and *acahuales* was 44.7%. These results indicated that in hilly landscapes the components of the dominant vegetation types contain a carbon concentration that is particular to each case and must be considered when carbon stocks are estimated.

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, estado de México.

[†] Autor responsable (alejvela@colpos.mx)

² Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 56230 Chapingo, estado de México.

Index words: vegetation on hills, carbon sequestration, acahuales.

INTRODUCCIÓN

La captura y el secuestro de carbono se han convertido en temas que son parte de la agenda ambiental global. Tal es el caso de su inserción en la agenda del cambio climático, fenómeno provocado por el aumento de gases de efecto invernadero, en especial el dióxido de carbono, en la atmósfera (Gay y Martínez, 1995). Los sistemas vegetales tienen la capacidad para capturar el carbono atmosférico y convertirlo en moléculas orgánicas mediante la fotosíntesis (Sedjo, 1990; Perry, 1994); pero, al mismo tiempo que los vegetales capturan carbono de ese reservorio, también lo liberan por los procesos naturales de respiración, declinación y muerte (Watson y Casper, 1984). De esta manera, las plantas participan activamente en el ciclo global del carbono. Cuando la tasa de captura por las plantas, o por el suelo o el mar, es mayor que la de liberación, este elemento se acumula temporalmente en cualquiera de esos medio. Si tal acumulación ocurre por periodos prolongados, el proceso se denomina secuestro de carbono (Sedjo, 1990). La capacidad de secuestrar carbono varía en función de la naturaleza del ecosistema y sus componentes (Olson *et al.*, 1983). Se estima que la biosfera terrestre contiene aproximadamente 560 Pg de C (Pg = petagramos = 10^{15} g) en biomasa y mantillo, y 1100 a 1400 Pg de C en el sistema radicular y en el suelo (Campos *et al.*, 1993).

El carbono almacenado en los reservorios de los ecosistemas terrestres cambia como consecuencia de las transformaciones naturales o inducidas que éstos experimentan, como son la erosión y el cambio de uso de la tierra. Diferentes metodologías se han empleado para estimar el carbono almacenado en esos ecosistemas (Emanuel *et al.*, 1984; Solomon, 1986; Andrasko, 1990; Post *et al.*, 1990). Dicho carbono es función de la concentración de este elemento en las plantas, la biomasa, los distintos sistemas de uso de suelo, la profundidad del suelo y la densidad aparente (Woomer y Palm, 1998).

En México, se han realizado pocos estudios de captura de carbono. Entre éstos puede mencionarse el de De Jong *et al.* (1999), quienes determinaron contenido de carbono en un intervalo de 147 a 504 Mg ha⁻¹ en ecosistemas forestales de clima templado, incluyendo zonas de pastizal y de cultivo.

Por su parte, Masera (1995) propuso una ecuación para estimar la captura unitaria de carbono (en Mg ha⁻¹ año⁻¹) en un ecosistema forestal con manejo:

$$Ct = \int \frac{(Cv + Cd + Cs + Cp)}{T + \sum Cf}$$

Donde: Ct representa la captura unitaria de carbono; Cv es el carbono contenido en la vegetación; Cd es el contenido de carbono en la materia orgánica en descomposición; Cs es el contenido de carbono en el suelo; Cp es el contenido de carbono en productos forestales; Cf es igual al carbono ahorrado por no utilizar combustibles fósiles y T representa el tiempo. En los estudios mencionados, el contenido de carbono de la vegetación o de los ecosistemas se estimó sin que los autores midiesen directamente la concentración de este elemento en los componentes estructurales del mismo.

Por su parte, Acosta *et al.* (2001) desarrollaron una metodología para calcular el carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera de la Sierra Norte de Oaxaca. Los sistemas con mayor contenido de carbono en ese componente, según estos autores, son los bosques de liquidámbar de la región Mazateca, los bosques de encino en la región Cuicateca y un acahual de 10 años en la región Mixe con 103, 52 y 33 Mg ha⁻¹.

En el caso de las estimaciones preliminares hechas por Acosta *et al.* (2001) para esos sistemas forestales dominantes en la Sierra Norte de Oaxaca, al igual que en los casos previos, no se midió la concentración de carbono de los árboles, ni de los componentes principales. Los autores emplearon el supuesto que 50% de la biomasa, cifra propuesta por el IPCC (2001), es carbono. Como estos sistemas están dominados por especies poco frecuentes en otras latitudes, se sospechaba que el factor de conversión pudiese ser diferente. Las masas boscosas a que se refiere este estudio incluyen bosques nativos, como inducidos, vegetación de regeneración o *acahuales*, plantaciones de café bajo sombra y pastizales.

El objetivo de esta investigación fue medir y comparar la concentración de carbono en tronco, ramas y hojas de árboles de especies dominantes en masas boscosas de tres regiones de la Sierra Norte de Oaxaca, en los arbustos más hierbas que crecen en el sotobosque y en la hojarasca acumulada sobre el suelo, además, de la parte aérea de pastizales naturales de la zona, a fin de conocer, de manera más precisa, la

magnitud de los reservorios de carbono de estos sistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se encuentra dentro de la zona de interés del Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL) (Acosta *et al.*, 2002), que comprende los extremos norte y sur de la Sierra Norte del estado de Oaxaca (16° 45' y 18° 30' N y 94° 45' a 97° 00' O), el conjunto montañoso más alto del nororiente de ese Estado. La Sierra Norte está conformada por la Sierra Zapoteca o Sierra Juárez, al Este por la Sierra Mixe, y en la vertiente Norte por la Chinantla Alta o Sierra Mazateca.

Para dar mayor exactitud a los cálculos preliminares de la cantidad de carbono que se asocia con cada tipo de vegetación y sus componentes, hechos inicialmente por Acosta *et al.* (2001), se procedió a medir la concentración de carbono en los tipos de vegetación dominante en la zona y en los componentes de cada sistema estudiados por estos autores.

Los tipos de vegetación dominantes seleccionados para realizar esta investigación fueron:

(a) **Bosque de liquidámbar (*Liquidambar* sp.).** Este tipo de vegetación es típico del bosque mesófilo de montaña; si bien, el liquidámbar es la especie dominante, en general se presenta en asociaciones con otras especies arbóreas, arbustivas y herbáceas, como los helechos arborescentes.

(b) **Bosque de aile (*Alnus* sp.).** Se llamó bosque de aile a aquella vegetación de bosque mesófilo de montaña dominada por esta especie arbórea, y que aparece comúnmente después del desmonte que se hace en el sistema roza-tumba-quema para establecer cultivos.

(c) **Acahual.** Esta vegetación de carácter secundario se desarrolla típicamente en terrenos sometidos a un manejo de roza-tumba-quema, durante el periodo de

descanso que sigue al ciclo de producción de granos (en general, dos a tres años). Se caracteriza por la presencia de varias especies de árboles, arbustos y hierbas. Entre las especies arbóreas hay una ligera predominancia de aile, liquidámbar y encino, que abundan en la región. La edad de los acahuales varía en función del régimen de explotación que el productor practica. Los acahuales incluidos en este estudio tenían un intervalo de edad entre dos y 10 años.

(d) **Bosque de encino (*Quercus* sp.).** La vegetación original denominada bosque de encino fue un bosque de pino-encino, pero debido al aprovechamiento hecho de la primera especie, la composición florística ha pasado a ser dominada por el encino.

(e) **Bosque de pino (*Pinus* sp.).** Este tipo de vegetación está constituido por relictos de árboles de pino (explotados anteriormente).

(f) **Cafetales (*Coffea* sp.).** Plantas de café; principalmente variedades criollas, cultivadas bajo sombra de *Inga* sp., un sistema agrícola permanente común en las partes bajas, más cálidas, de las laderas. En este trabajo, esas formaciones se trataron como sistemas forestales.

(g) **Pastizal.** Finalmente como un elemento de comparación, se incluyó a esta forma de sistema semi-permanente de vegetación. En éstas predominan las gramíneas nativas.

Cada tipo de vegetación forestal (que incluye al café) se estudió tomando en consideración sus componentes mayores: árboles, arbustos más hierbas y hojarasca. En el Cuadro 1, se muestra como se agruparon los tipos de vegetación iguales, provenientes de las tres regiones.

Las especies arbóreas dominantes que se seleccionaron para determinar el porcentaje de carbono fueron: *Clethra hartwegii* Britt., *Rapanea myricoides* (Schl.) *Alnus* sp., *Liquidambar macrophylla* Oerst., *Inga* sp., *Coffea arabica*, *Quercus* sp. y *Pinus* sp.

Cuadro 1. Material colectado de la zona de estudio.

Por bosque de origen	Por tipo de manejo		Por edad del acahual
	Cultivo	Pradera	
Bosque de aile	Cafetal de la región Mazateca	Pradera de la región Mazateca	Acahual de dos años
Bosque de aile de 10 años	Cafetal de la región Mixe	Pradera de la región Cuicateca	Acahual de siete años
Bosque de liquidámbar			Acahual de 10 años
Bosque de encino			
Bosque de pino			

Las muestras de los árboles mayores que 10 cm de diámetro se colectaron después de derribarlos y haber registrado su peso fresco en campo. Con anterioridad, se les había medido el diámetro normal (DN), la altura (H) y la cobertura de copa (Acosta *et al.*, 2002). Del fuste de cada árbol, se tomaron siete rodajas (de aproximadamente 5 cm de espesor cada una), con el propósito de obtener una media representativa de la humedad (75 °C durante 48 h) para calcular el peso seco y su porcentaje carbono (Figura 1). La copa del árbol se dividió en cuatro partes y se obtuvo una muestra de las hojas y ramas de cada una de ellas. Los árboles más pequeños, mayores que 5 cm, pero menores que 10 cm de DN, se transportaron enteros al laboratorio.

La toma de muestras de arbustos más hierbas se realizó en dos cuadros de 1 m² ubicados en cinco parcelas de 100 m² (25 x 4 m) en cada uso del suelo. Estas parcelas se habían seleccionado previamente para estudios relacionados por Acosta *et al.* (2002). Toda la vegetación menor que 2.5 cm de DN y las hierbas presentes en los cuadros de 1 m² se colectaron manualmente. En el bosque de pino, la muestra se colectó en parcelas circulares de 1000 m². Dentro de estos perímetros se delimitaron cuadros de 1 m² orientados a partir del centro de cada sitio a 5.64 m, uno hacia el norte, otro a 60° al sudeste, el tercero a la misma distancia del centro, pero a 60° al sudoeste.

El muestreo de la hojarasca se hizo en parcelas pequeñas de 0.25 m² insertas en el centro del cuadrado de 1 m² empleado para colectar las muestras de

arbustos más hierbas. La hojarasca incluyó toda la capa de material que se acumulaba hasta la superficie del suelo mineral.

Las muestras y todos los materiales anteriormente señalados se molieron utilizando un molino con malla de 1 mm. Antes de la medición del carbono, la muestra molida se secó en estufa a 75 °C por 24 h para remover cualquier resto de humedad. Posteriormente, una pequeña cantidad (*ca.* 5 mg) se colocó en la cámara del analizador de carbono (TOC 5050 AC Total Organic Carbon Analyser, Shimadzu).

El diseño experimental empleado para el análisis de los resultados fue completamente al azar. Los resultados se sometieron a un análisis de varianza y, posteriormente, a una prueba de comparación de rangos múltiples (SAS Institute, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La concentración media de carbono de las probetas colectadas en los fustes de las especies forestales dominantes en el bosque húmedo de montaña fue de 49.6%, con un intervalo de 47.3 y 51.3% (Cuadro 2). La desviación estándar asociada a estas medias de las especies fue 0.9 a 1.5. Considerando que las partes del tronco analizadas fueron diferentes y las probables diferencias en edades de los árboles de donde provenían las muestras, el error estándar se consideró bajo (1.37).

El porcentaje de carbono en el fuste de aile y encino [las especies con mayor y menor concentración de carbono promedio en el tronco (51.3 y 47.3%, respectivamente)] fue significativamente diferente. El porcentaje de carbono del resto de las especies fue

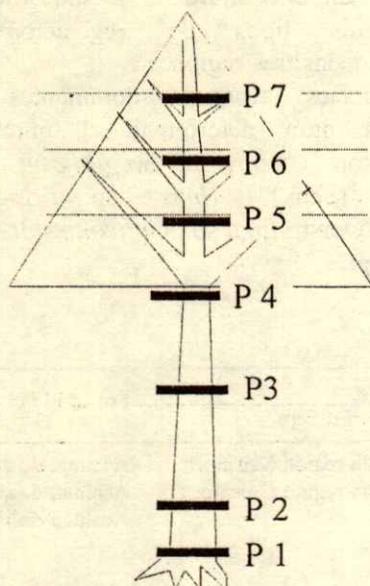


Figura 1. Selección de probetas en el árbol.

Cuadro 2. Concentración de carbono por especie arbórea en probetas.

Especie	Concentración media de carbono por especie	Valor máximo	Valor mínimo	Desviación estándar
		%		S
Aile	51.30 a [†]	52.27	50.61	1.53977
Inga	50.36 b	52.54	49.05	1.57088
Liquidámbar	49.67 b	53.78	47.58	1.29508
Clethra	49.63 b	50.73	47.20	1.29360
Rapanea	49.49 b	50.39	47.56	0.97215
Encino	47.26 c	48.08	46.42	1.57974
Media general	49.62	51.30	48.07	1.37520

[†] Medias con diferente letra difirieron significativamente entre si, Tukey (P = 0.05).

igual, pero difirió del de ambas condiciones extremas. A pesar de las diferencias indicadas, se considera que la variación de la concentración de carbono de este grupo de especies caducifolias, típicas de bosque tropical lluvioso y clima cálido, fue baja si se toma en cuenta que presentan ritmos de crecimiento, forma de hábitat, relaciones simbióticas y sotobosque asociados muy diferentes entre sí (Gómez-Pompa y Vázquez-Yanes, 1981).

La concentración promedio de carbono, los valores máximo, mínimo y las desviaciones estándares en las hojas y ramas de todas las especies arbóreas fue de 51.2%, con un intervalo de 49.5 a 52.8% C (Cuadro 3). La desviación estándar de los datos (1.38) no se consideró elevada.

La concentración de carbono en las ramas y hojas de las especies típicas de bosque tropical de zona lluviosa y clima cálido fue mayor que la encontrada en las rodajas de los troncos en todos los casos.

Lo anterior se atribuyó a que en las hojas se inicia el proceso de fotosíntesis (absorción de CO₂), siendo estos órganos sitios con elevada concentración de carbohidratos. En las ramas se realiza la diferenciación y elongación de los meristemas que darán origen a los órganos reproductivos o vegetativos, lo que origina que el carbono se almacene en forma de carbohidratos o compuestos de reserva (Watson y Casper, 1984). En contraste, en el fuste, la mayoría del carbono es celulosa y lignina.

La mayor concentración de carbono en ramas y hojas de estas especies (52.8%) correspondió al aile y la más baja al encino (49.5%), siendo entre ambos diferencia significativa. La desviación estándar, asociada a las medias de este componente, fue de 0.89 a 2.45, la que se considera baja, si se toma en cuenta

Cuadro 3. Concentración de carbono arbórea en hojas y ramas, por especie.

Especie	Concentración media de carbono por especie	Valor máximo	Valor mínimo	Desviación estándar
		%		S
Aile	52.84 a [†]	54.08	51.56	1.42397
Rapanea	52.62 a	53.85	50.66	2.44940
Inga	51.16 b	51.76	50.04	1.22581
Clethra	50.84 bc	51.40	50.11	0.89579
Liquidámbar	50.16 d	50.64	49.56	1.19236
Encino	49.54 e	51.36	48.75	1.08097
Media general	51.19	52.18	50.11	1.37805

[†] Medias con diferente letra difirieron significativamente entre sí, Tukey (P = 0.05).

que durante la colecta de hojas y ramas no se hizo distinción de edad, grosor o posición en la copa de las mismas. Lo anterior sugiere que si bien se podría recomendar la regeneración del bosque con aile, sería preferible la regeneración del bosque mesófilo de montaña con todo sus elementos, entre los que se incluyen las especies analizadas en este trabajo, a excepción de Inga; ya que esto permitirá un aprovechamiento de otros bienes no maderables, como la presencia de orquídeas, helechos arbórescentes y palmillas.

En el Cuadro 4, se presentan los porcentajes medios de carbono, grados de concentración y la desviación estándar en los arbustos más hierbas y en la hojarasca que se colectaron en los bosques, acahuals y cafetales, así como en las hierbas de los pastizales.

El porcentaje promedio de carbono en los arbustos más hierbas de bosques y acahuals fue mayor (47.0%) que el de los cafetales (41.4%) y que el de las hierbas de las praderas (34.6%), aunque no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los dos últimos grupos (Cuadro 4). Esto se debe a que la composición botánica en los arbustos más hierbas provenientes de bosques, con excepción del bosque de pino, fue similar y propia del bosque mesófilo de montaña (Acosta *et al.*, 2001, 2002). El porcentaje de carbono en los arbustos más hierbas colectados en los cafetales fue menor que el de las muestras de este componente obtenidas en los bosques, lo cual puede explicarse por las continuas labores de limpia que se realizan en el café, que impiden que esta vegetación alcance un mayor grado de lignificación (Woomer y Palm, 1998). Los resultados anteriores concuerdan con los datos presentados por estos últimos autores, quienes mencionaron que el contenido de carbono total en los sistemas bosques maduros y vegetación secundaria (donde se incluyen los acahuals) de Brasil, Indonesia, Perú y Camerún, es considerablemente mayor que en las tierras de sistemas agroforestales (café asociado con Inga), cultivos, pastos y praderas.

Aun cuando es posible obtener un beneficio directo por la actividad de pastoreo, no habría que descartar permitir que las praderas se convirtiesen en acahuals, ya que los beneficios económicos y ambientales que pueden obtenerse por el secuestro de carbono, a mediano plazo, pudiesen ser mayores que el mantener la pradera. Habría que considerar también los beneficios de la producción futura de madera.

Cuadro 4. Concentración de carbono en los tipos de vegetación.

Tipo de vegetación	Concentración media de carbono	Valor [†]		Desviación estándar
		Máx.	Min.	
-----%-----				
Arbustos más hierbas de bosques y acahuales				
Acahual de 10 años	48.4 a [†]	50.5	46.2	1.16
Bosque de aile de 10 años	47.6 a	48.5	46.7	0.66
Acahual de 2 años	47.5 a	48.5	46.1	0.88
Acahual de 7 años	47.2 a	48.5	43.8	1.52
Bosque de pino	46.8 a	48.5	45.4	1.56
Bosque de ile s	46.8 a	47.7	45.2	0.86
Bosque de liquidámbar	44.9 a	49.0	41.5	2.17
Concentración Media	47.0	48.7	45.0	
Arbustos más hierbas de cafetales				
Cafetal Mazateca	41.9 b	44.6	35.3	2.72
Cafetal Mixe	40.9 b	48.4	36.7	3.59
Concentración Media	41.4	46.5	36.0	
Hierbas de praderas				
Pradera Cuicateca	37.5 c	42.4	29.4	4.70
Pradera Mazateca	31.7 c	38.6	25.1	5.30
Concentración Media	34.6	40.5	27.3	
Hojarasca de bosques y acahuales				
Bosque de pino	48.5 a	51.3	42.9	3.26
Acahual de 7 años	46.5 a	49.1	43.9	2.04
Bosque de liquidámbar	44.6 a	48.2	39.3	2.72
Bosque de aile	44.1 a	48.3	37.2	3.50
Bosque de encino	43.6 a	48.8	37.7	3.62
Acahual de 10 años	43.0 a	48.5	37.9	3.13
Acahual de 2 años	42.3 a	46.4	37.4	3.05
Concentración Media	44.7	48.7	39.5	
Hojarasca de cafetales				
Cafetal Mazateca	42.3 a	47.1	35.9	3.51
Cafetal Mixe	42.3 a	46.8	37.2	3.04
Concentración Media	42.3	47.0	36.6	
Concentración media	42.0	46.3	36.9	

[†] Max. = máximo; Min. = mínimo. [†] Grupo de medias en la prueba de Tukey

El porcentaje de carbono en las hierbas de los pastizales presentó un amplio intervalo (25.1 a 42.4%) con una desviación estándar asociada a las medias de 4.70 y 5.30 (Cuadro 4). Esto se debió, probablemente a que, en el momento de realizar la colecta, no se identificó la composición florística, ni se determinó la edad de las especies colectadas (Acosta *et al.*, 2002). Los bajos porcentajes de carbono en estos materiales pueden atribuirse a que las hierbas son cortadas periódicamente por el pastoreo de los animales y, en ocasiones, quemadas para fomentar la producción de brotes tiernos, lo cual impide su envejecimiento y, por ende, la acumulación de este elemento.

En el caso de la hojarasca no hubo diferencias significativas entre el porcentaje de carbono en

aquella que se colectó en los bosques y los cafetales (Cuadro 4), aunque hubo una ligera tendencia a presentar porcentajes medios de carbono más elevados en los bosques y acahuales y menores en los cafetales (44.7 y 42.3%, respectivamente). Los bosques incluidos dentro de este estudio se componen de especies caducifolias que, al tirar sus hojas cada año, contribuyen a que exista una amplia capa de hojarasca con diferentes grados de descomposición. La acumulación de carbono en la materia orgánica puede ser afectada por la cobertura y en el tipo de vegetación; ambos influyen en la humedad relativa y la temperatura en el medio (Gómez-Pompa y Vázquez-Yanes, 1981; Waring y Schlesinger, 1985). La composición química de la capa de hojarasca afecta la tasa de descomposición y la liberación de nutrimentos y CO₂. Una capa de mantillo ácido (como el de las coníferas, pH ácido < 6) tardará más tiempo en ser descompuesta que una capa de mantillo con un pH relativamente más alto (pH > 6), como la proveniente de bosque de latifoliadas (Pritchett, 1986). En general, la materia orgánica proveniente de la hojarasca de los bosques de pino tiende a ser más ácida que aquella proveniente de bosques de latifoliadas, en virtud de su alto contenido de ligninas (Pritchett, 1986), por lo que la tasa de descomposición es más lenta, a pesar de encontrarse en una zona cálida, lo que explicaría que las concentraciones de carbono sean más altas.

Con los valores promedio de la concentración de carbono en arbustos más hierbas y de hojarasca de todos los sistemas analizados se formaron tres grupos afines de especies. El porcentaje de carbono en estos grupos se comparó entre sí. Los tres grupos que se establecieron fueron: (1) **Bosque nativo**, que incluye al bosque de aile, bosque de aile de 10 años, bosque de liquidámbar y bosque de encino; (2) **Microcuena**, dentro de esta agrupación se realizó una subdivisión con la finalidad de ver el efecto del manejo; las clases fueron: **Cafetales**, que incorpora el cafetal de la región Mazateca y el de la región Mixe, y **Praderas**, que incluye la pradera de la región Mazateca y la pradera de la región Cuicateca; y (3) **Edad de acahuales**, que incluye al acahual de dos años, acahual de siete años y acahual de 10 años.

Las concentraciones de carbono más altas se presentaron en los acahuales. Las praderas presentaron las concentraciones más bajas en todo el estudio, lo que concuerda con los datos presentados por Woomer y Palm (1998) y De Jong *et al.* (1999). Los acahuales son bosques secundarios que presentan

una amplia mezcla de especies, por lo general demandantes de luz y de rápido crecimiento que permiten la formación temprana de un reservorio de carbono (Gómez-Pompa y Vázquez-Yanes, 1981), mientras que los bosques acumulan carbono rápidamente en edades tempranas y tienden al equilibrio conforme avanza la edad de la masa (Mooney, 1972; Waring y Schlesinger, 1985; Perry, 1994). A los bosques del estudio no se les calculó la edad, sin embargo, el grado de desarrollo de los mismos indicaba que eran bosques maduros.

CONCLUSIONES

- La concentración de carbono de los fustes de especies dominantes en el bosque tropical de zona lluviosa de la Sierra Norte de Oaxaca varió entre 47.3 (encino) y 51.3% (aile), con una media de 49.6%, siendo las diferencias entre estas especies significativas. La concentración media de carbono en ramas y hojas de las especies de este tipo de bosque fue mayor que la de los fustes (51.2%). Los valores mínimos y máximos en este caso (50.1 y 52.8% C) correspondieron a las mismas especies anteriores. Se concluye que el porcentaje de carbono en la biomasa de las especies forestales de este tipo de bosque es, en general, muy parecida al de los bosques de zonas templadas y el porcentaje de 50, empleado para realizar cálculos de acumulación de carbono en las masas forestales no influirá grandemente en las estimaciones.

- El porcentaje promedio de carbono en las hierbas más arbustos de los cafetales fue menor (41.4%) que el de los bosques (47.0%), pero ambos resultaron significativamente superiores al porcentaje de carbono en las hierbas de las praderas (34.6%). En contraste, la concentración de este elemento en la hojarasca de los diferentes tipos de bosque y en los cafetales fue prácticamente la misma (promedio 43%), aunque la desviación estándar en este último caso fue muy amplia. La hojarasca de pino tenía 48.5%, mientras que el cafetal sólo 42.3%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo y al Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Instituto de Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados, instituciones en las que se realizó el presente estudio.

LITERATURA CITADA

- Acosta, M., K. Quednow, J. Etchevers y C. Monreal. 2001. Un método para la medición de captura del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. In: Memoria del Congreso Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18 al 20 de Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 11 p. (CD ROM y www.iufro.org/iufro/publications/ws13_papeles1.pdf)
- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, J.D. Etchevers-Barra y A. Velázquez-Martínez. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Andrasko, K. 1990. Global warming and forests: An overview of current knowledge. *Unasylva* 41: 3-11.
- Campos, M., R.N. Sampson y O.R. Maser. 1995. Greenhouse gases mitigation analyses in the forestry and agriculture sectors. *Interciencia* 20(6): 423-425.
- De Jong, B.H., M.A. Cairns, P.K. Haggerty, N. Ramírez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, M. González-Espinosa, I. March-Mifsut. 1999. Land-Use change and carbon flux between 1970s and 1990s in central highlands of Chiapas, Mexico. *Environ. Manage.* 23: 373-385.
- Emanuel, W.R., G.G. Killough, W.M. Post y H.H. Shugart. 1984. Modeling terrestrial ecosystems in the global carbon cycle with shifts in carbon storage capacity by land-use change. *Ecology* 65: 970-983.
- Gay, C. y J. Martínez. 1995. Mitigation of emissions of greenhouse gases in Mexico. *Interciencia* 20: 336-342.
- Gómez-Pompa, A. y C. Vázquez-Yanes. 1981. Successional studies of a rain forest in Mexico. pp. 246-266. In: West, D.C., H.H. Shugart y D.B. Botkin (eds.). *Forest succession. Concepts and application*. Springer-Verlag, New York.
- IPCC (Intergovernmental Panel of Climatic Change). 2001. Summary for policymakers. A report of working group I of the Intergovernmental Panel of Climatic Change (<http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>. Julio - 31 - 2001).
- Maser, O.R. 1995. Carbon mitigation scenarios for Mexican forests: Methodological considerations and results. *Interciencia* 20: 388-395.
- Mooney, H.A. 1972. The carbon balance of plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 3: 315-346.
- Olson, J.S., J.A. Watts y L.J. Allison. 1983. Carbon in live vegetation of major world ecosystems. ORNL-5862. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TN.
- Perry, D.A. 1994. *Forest ecosystems*. Johns Hopkins University Press. Baltimore, MD.
- Post, W.M., T.H. Peng, W.R. Emanuel, A.W. King, V.H. Dale y D.L. DeAngelis. 1990. The global carbon cycle. *Am. Scientist* 78: 310-326.
- Pritchett, W.L. 1986. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa. México, D.F.
- SAS Institute Inc. 1999. SAS Online Doc. Version 8. CD-ROM. Cary, NC.
- Sedjo, A.R. 1990. The global carbon cycle. Are forests the missing sink? *J. For.* 88: 33-34.
- Solomon M., A. 1986. Transient response of forests to CO₂-induced climate change: Simulation America Modeling Experiments in Eastern North. *Occologia* 68: 567-579.

- Waring, H.R. y W.H. Schlesinger. 1985. *Forest Ecosystems. Concepts and management*. Academic Press. Orlando, FL.
- Watson, M.A. y B.B. Casper. 1984. Morphogenetic constraints on patterns of carbon distribution in plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 15: 233-258.
- Woomer, P.L. y C.A. Palm. 1998. An approach to estimating system carbon stocks in tropical forests and associated land uses. *Commonw. For. Rev.* 77: 181-190.

INOCULACIÓN DEL TRIGO var. PAVÓN CON *Azospirillum* spp. y *Azotobacter beijerinckii* Inoculation of Wheat var. Pavon with *Azospirillum* spp. and *Azotobacter beijerinckii*

M.M. García-González¹, R. Farías-Rodríguez², J.J. Peña-Cabriales³ y J.M. Sánchez-Yáñez^{2†}

RESUMEN

La respuesta positiva del trigo (*Triticum aestivum* L.) a la inoculación con bacterias benéficas de raíz (BBR), como: *Azospirillum* y *Azotobacter*, se basa en que estas BBR transforman los exudados radicales (ER) del trigo en sustancias promotoras del crecimiento vegetal (SPCV). Los objetivos de este trabajo fueron: 1) analizar la dinámica de colonización de *Azospirillum* spp. y *Azotobacter beijerinckii* en las raíces del trigo, y 2) determinar la respuesta del trigo a la inoculación con *Azospirillum* spp. y *Az. beijerinckii* a la dosis 80 kg ha⁻¹ de N como urea (reducida al 50%). Para ello, semillas de trigo se inocularon de forma individual o se mezclaron con las BBR: *Azospirillum* spp. y *Az. beijerinckii* en un suelo agrícola no esterilizado. Las variables-respuesta para medir el efecto de inoculación de las BBR fueron: peso fresco y seco con 80 kg ha⁻¹ de N como urea. Los resultados sugieren que tanto *Azospirillum* spp., como *Az. beijerinckii* transformaron los exudados radicales en SPCV, esto favoreció un aumento en la absorción de la urea en las raíces, y la gramínea alcanzó un peso seco similar al del trigo fertilizado sólo con 100% de urea, sin inocular. La aplicación de las BBR en trigo es una alternativa para reducir y optimizar la dosis del FN.

Palabras clave: rizobacterias, urea, absorción radical, peso seco.

¹ Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. 64000 Monterrey, Nuevo León, México.

² Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Ed. B-1, Ciudad Universitaria, 58030, Morelia, Michoacán, México.

[†] Autor responsable (syanez@zeus.umich.mx)

³ CINVESTAV, Unidad Irapuato. Irapuato, Guanajuato, México.

Recibido: Septiembre de 2001. Aceptado: Octubre de 2004.
Publicado en Terra Latinoamericana 23: 65-72.

SUMMARY

The positive response of wheat (*Triticum aestivum* L.) to inoculation with beneficial root bacteria (BRB) like *Azospirillum* and *Azotobacter* is based on the fact that these BRB are able to transform root exudates of wheat into growth promoting plant substances (SPCV). The objectives of this research were: 1) to analyze the colonization of *Azospirillum* spp. and *Azotobacter beijerinckii* in the root system of wheat, 2) to determine the response of wheat to the inoculation with *Azospirillum* spp. and *Az. beijerinckii* at a dosage of 80 kg ha⁻¹ N as urea (reduced to 50%). Therefore, seeds were inoculated individually or they were mixed with the BRB *Azospirillum* spp. y *Az. beijerinckii* in a non-sterilized soil. Fresh and dry weight with 80 kg ha⁻¹ N as urea were the response variables to measure the effect of BRB inoculation. Results suggest that *Azospirillum* spp. as well as *Az. beijerinckii* transform the root exudates in SPCV, which stimulated an increase in the absorption of urea in the root system. Wheat reached a dry weight similar to that of wheat fertilized only with 100% urea, without inoculation. Application of BRB in wheat is an alternative to reduce and to optimize the doses of FN.

Index words: rhizobacteria, urea, radical absorption, dry weight.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se reporta que la respuesta positiva del trigo (*Triticum aestivum* L.) a la inoculación con bacterias benéficas de raíces (BBR) se debe a que estas bacterias aumentaron la capacidad de absorción radical del trigo por el FN: *Azospirillum* (Bashan y Levanony, 1998; Jacoud *et al.*, 1999), *Azotobacter* (Asghar *et al.*, 2002), *Az. beijerinckii* (Chelius y Triplett, 2000), *Bacillus* (Gutiérrez-Manero *et al.*, 2001), *Pseudomonas* (Valdivia-Urdiales *et al.*, 1999), *Paenibacillus* (Chanway *et al.*, 2000), *Clostridium* (Gasoni *et al.*, 2001), *Burkholderia*

(Baldani *et al.*, 2000) y otras como las entéricas (Elbeltagy *et al.*, 2000). Esto se basa en la posible conversión de sus exudados radicales (ER) en sustancias promotoras de crecimiento vegetal (SPCV) como: auxina, citocinina, etc (Reis *et al.*, 2000). Esta conversión de productos de raíz en SPCV es una propiedad bioquímica de las BBR (Dos Reis *et al.*, 2000), lo que explica el incremento en peso fresco y seco del trigo inoculado con esas BBR (Kurek y Jaroszuk-Scisel, 2003). Se reporta que estas rizobacterias aumentan su capacidad de absorción radical, cuando se reduce la dosis del FN aplicado a la gramínea (Tran Van *et al.*, 2000; Whitmore, 2000).

Sin embargo para pronosticar un posible efecto positivo de BBR sobre el trigo y otras gramíneas, es necesario que se induzca una rápida germinación de la semilla y luego la colonización de su raíz, para estimular el crecimiento de la gramínea (Rodelas *et al.*, 1999; Nandakumar *et al.*, 2001). Puesto que en la espermósfera-rizósfera (ESR) se inicia la excreción de compuestos orgánicos al suelo, que atraen a las BBR para su posible transformación en SPCV (Pérez-Moreno y Ferrera-Cerrato, 1996; Benizri *et al.*, 2001), de ahí que la rizósfera de la gramínea es clave en este proceso, que posteriormente se refleja en el rendimiento de planta, a dosis reducida de FN (Riggs *et al.*, 2001). Los objetivos de este trabajo fueron: 1) analizar la dinámica de la colonización de las raíces del trigo por especies de *Azospirillum* y *Azotobacter beijerinckii*; 2) determinar la respuesta del trigo a la inoculación con BBR con la dosis reducida a 50% de FN ó 80 kg de N ha⁻¹ como urea.

MATERIALES Y MÉTODOS

Origen de las BBR y Semillas de Trigo

Las especies de *Azospirillum lipoferum*, *A. brasilense* y *Az. beijerinckii* pertenecen a la colección microbiana del Laboratorio de Microbiología Industrial y del Suelo de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México. El Instituto de Investigaciones Agrícolas y Forestales (INIFAP), Saltillo, Coahuila donó las semillas de trigo de la variedad Pavón.

Marcaje de las BBR

Para registrar y detectar la colonización de *A. lipoferum* en la espermósfera-rizósfera (ESR) del trigo y en el suelo no esterilizado sin raíces, se usó la resistencia de esta BBR a cloranfenicol (Parke-Davis) y eritromicina (Abbot, Lab), cada uno en concentración de 50 µg mL⁻¹ adicionadas estériles por filtración (Milipore, Gelman, Co) al agar nutritivo; a este medio de recuperación de *A. lipoferum* se le denominó ALL. Para estimar la colonización de *A. brasilense* en el ESR del trigo, se empleó el agar nutritivo, al que se le agregó una mezcla de cefalosporina 50 µg mL⁻¹ (Glaxo, Lab) y cloranfenicol (Lakside, Lab) 200 µg mL⁻¹. A este medio de cultivo para la recuperación de *A. brasilense* se le llamó AAB. Para evitar el crecimiento de hongos en ALL y AAB, se agregó 0.1 g L⁻¹ de cicloheximida. En el caso de *Az. beijerinckii* no fue necesario ningún antibiótico, pues la inoculación de la semilla de trigo se realizó y se mantuvo en esterilidad en invernadero; esta prueba se realizó para estimar la colonización de *Az. beijerinckii* en ausencia de competencia natural, en la rizósfera de trigo con el objetivo de comparar su colonización con la de *Azospirillum* spp. en trigo en suelo no esterilizado.

Condiciones del Crecimiento Vegetal

Se usó el sistema semihidropónico de jarras de Leonard con 4 kg de suelo agrícola no esterilizado de: textura arcillosa limosa, 5.3% de materia orgánica, 0.26% de N, 11.1% de humedad y un pH de 7.4. El trigo se irrigó con la solución nutritiva de White para plantas con la siguiente composición: K₂HPO₄ 1M, 1mL; KH₂PO₄ 1M, 1mL; MgSO₄·7H₂O 1M, 1mL; CaCl₂·2H₂O 1M, 1mL; KCl, 0.09 g; FeSO₄ trazas; pH 7.0, agua destilada, 1000 mL y una solución de elementos menores: ácido bórico, 2.6 g; ZnSO₄·7H₂O, 0.22 g; NaMoO₄, trazas; en 1000 mL de agua destilada y 1.0 mL de ésta por cada 1000 mL de la solución nutritiva de White, ajustada a pH 7.0 (García *et al.*, 1995).

Inoculación de Trigo con las BBR

Las especies de *Azospirillum* y *Az. beijerinckii* se crecieron en un matraz de 250 mL, con 100 mL de caldo nutritivo (Bioxon) y se incubaron

individualmente en agitación a 250 rpm/24 h/30°C. Se centrifugaron a 3000 rpm/15 min. Se eliminó el sobrenadante, el cual se filtró con una membrana milipore 0.2 μ (Gelman, Co), para aplicar a las semillas de maíz y trigo colocadas en algodón humedecido esterilizado en caja de petri.

Por otro lado, el paquete celular de las BBR se lavó dos veces con solución salina (NaCl 0.85% p/v), luego esta suspensión se ajustó a una concentración de 3×10^3 UFC mL⁻¹, puesto que se realizaron ensayos previos con concentraciones mayores y menores de las BBR, para determinar la densidad celular requerida para detectar su respuesta a los ER del trigo. La densidad celular que se empleó se ajustó con el tubo No. 1 del nefelómetro de Mac Farland, por ello se tomó 1.0 mL con la concentración de cada BBR para inocular las semillas del trigo, excepto en aquellas inoculadas con la mezcla de las dos especies de *Azospirillum* (0.5 mL de c/u), luego se sembraron cuatro semillas de trigo por jarra; cuando germinaron se dejaron dos y la superficie se cubrió con aserrín esterilizado.

Se empleó un diseño experimental de bloques al azar con seis tratamientos y cuatro repeticiones cada uno: a) trigo sin inocular y 160 kg de N ha⁻¹, en forma de urea (control relativo); b) trigo inoculado con *A. lipoferum* y 50% de FN como urea (80 kg N ha⁻¹) c) trigo inoculado con *A. brasilense* y 80 kg de N ha⁻¹ como urea; d) trigo inoculado con la mezcla de las dos especies de *Azospirillum* y a 80 kg de N ha⁻¹ como urea; e) trigo inoculado con *Az. beijerinckii* con 80 kg de N ha⁻¹ como urea y f) trigo sin inocular, ni urea (control absoluto). Las diferencias entre tratamientos se obtuvo por comparación de medias de Tukey. Las jarras de Leonard se mantuvieron en invernadero durante 15 y 30 días. La solución nutritiva de White para plantas sirvió también para mantener la humedad del suelo constante a 60% de su capacidad de campo, previa medición hecha en el mismo período en suelo utilizado para el trigo sin sembrar, por la técnica conocida para medir la capacidad de campo del suelo (Whitmore, 2000). La muestra se secó al sol, se tamizó con una malla de 2 mm, se pasó a un vaso de precipitado de 50 mL y se determinó volumétricamente la cantidad de suelo necesario para llenar un anillo de hule, se colocó el anillo de hule en el plato con su correspondiente identificación, en el anillo se agregó el suelo sin llenar hasta el borde superior, el anillo se

colocó en un recipiente y se agregó agua en exceso por afuera de la muestra, sin derramarla el agua se dejó a saturación en el suelo, en reposo de 10 a 14 h, se eliminó el exceso de agua con una pipeta y se colocó el plato dentro de la olla, se cerró, se aplicó la presión de aire de 0.3 Atm, (0.3 kg cm⁻²), luego se purgó hasta el momento en que el manómetro marcó cero. El suelo del anillo se pasó a un frasco previamente tarado, se pesó en una balanza, después se llevó a horno a temperatura de 105 a 110 °C, hasta peso constante se sacó, se pesó y se realizó cálculo el por ciento de humedad a capacidad de campo, según Valdivia-Urdiales *et al.* (1999).

Variables-Respuesta

A 15 y 30 días después de la siembra, se midió el peso fresco y seco (60 °C/72 h) del trigo completo (parte aérea y radical). Se consideraron la altura de la parte aérea y la longitud de la hoja, pues se reporta que la inoculación de gramíneas con BBR influye sobre la fenología de la planta (Tran Van *et al.*, 2000).

Recuperación de *A. brasilense* del Trigo

Se intentó reaislar *A. brasilense* y *A. lipoferum* de las raíces del trigo con los medios de cultivo selectivos de recuperación (ALL y AAB) señalados en Marcaje de las BBR. Para esto, las raíces de la planta se lavaron con agua corriente, se les eliminó el suelo adherido, luego las raíces se desinfectaron superficialmente con etanol a 96% por 15 min, después con hipoclorito de sodio a 10% por 5 min. Posteriormente, estas raíces se lavaron siete veces con agua destilada esterilizada. Se trituraron en un mortero con solución salina esterilizada. Del triturado de raíces se tomó 0.1 mL para sembrar en AAB y en AAL. Ambos medios de cultivo de recuperación de las especies de *Azospirillum* se incubaron por cinco días a 30 °C. La detección de colonias de *A. lipoferum* y *A. brasilense* se basó en la resistencia de *A. lipoferum* a cloranfenicol y eritromicina, así como por la tolerancia de *A. brasilense* a cefalosporina y en el crecimiento que mostraron en AAL y AAB: colonias redondas mucoides incoloras de 5 mm de diámetro, además, se incluyeron algunas pruebas bioquímicas para diferenciar entre ambas especies de *Azospirillum* (Riggs *et al.*, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1, se muestra la dinámica de la colonización de cada una de las BBR durante la germinación y la formación de las raíces del trigo, donde se observa que no existe diferencia en la manera en la que cada BBR invadió el sistema radical del trigo, con un período de adaptación de tres días y una fase de crecimiento de las BBR, que sugiere la utilización de los exudados orgánicos de la semilla al germinar, así como la de los compuestos orgánicos que posteriormente se liberaron al desarrollarse la raíz del trigo, como se reporta en la literatura (Benizri *et al.*, 2001). Es posible que estos se hayan usado como fuente de carbono y energía para el crecimiento de las BBR en la rizósfera del trigo, como se observó desde el tercer día hasta el sexto, cuando las BBR alcanzaron su máxima densidad (Dashti *et al.*, 2000).

En general, se reporta que esta dinámica de colonización de BBR en la ESR de gramíneas es necesaria para que, en el caso del trigo, se observe una respuesta favorable a la inoculación con BBR (Shishido y Chanway, 2000; Singh *et al.*, 2003), lo que se apoyó en la recuperación de *A. brasilense* del interior de las raíces del trigo. Ello sugiere que la BBR puede invadir la raíz, como lo hacen las bacterias endófitas en otras gramíneas (Muthukumarasamy *et al.*, 1999; Sturz y Nowak, 2000; Yanni y Rizk, 2001). Esta característica bioquímica de *A. brasilense* fue confirmada por su crecimiento dependiente de la riqueza nutricional de los ER del trigo, atribuible a ciertos ácidos orgánicos que sólo esta gramínea libera (Christiansen-Weniger *et al.*, 1992). De ahí la importancia de la composición química de los ER, como inductores de colonización por BBR en gramíneas es clave, para que *A. brasilense* se asocie íntimamente a su sistema rizosférico (Bashan y Levanony, 1998); en parte esto también explica la exigencia nutricional de *A. brasilense* por los ER del trigo como una característica distintiva de esta especie, que no se reporta en *A. lipoferum* (García *et al.*, 1995). Esto se comprobó cuando *A. brasilense* se inoculó en el suelo sin raíces, sin esterilizar donde no sobrevivió más de tres días como lo muestra la Figura 2, ello aunado a la competencia y depredación de los microorganismos nativos del suelo, antagónicos a las especies de *Azospirillum*, que impidieron su persistencia en ese ambiente. En la literatura se reporta que la respuesta positiva del trigo a la inoculación con las BBR depende de la rapidez con que éstas dominen

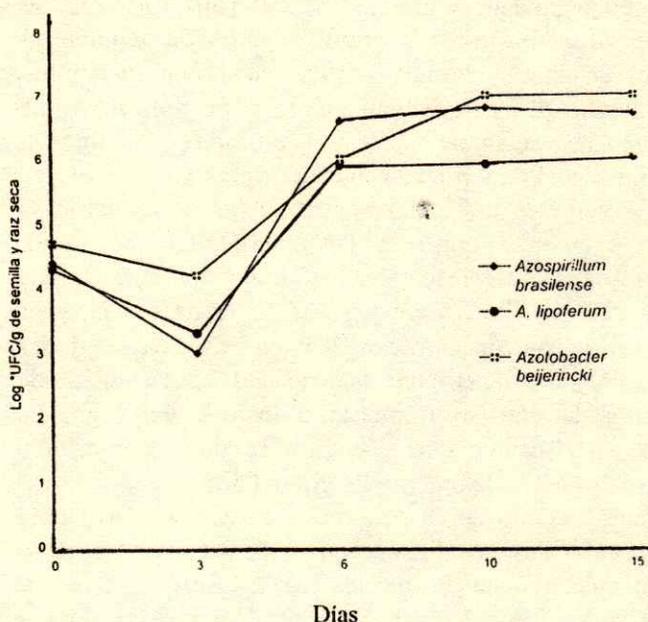


Figura 1. Dinámica de colonización de la espermatósfera-rizósfera (ESR) de trigo var. Pavón por bacterias benéficas de raíz. *UFC= Unidades formadas de colonias.

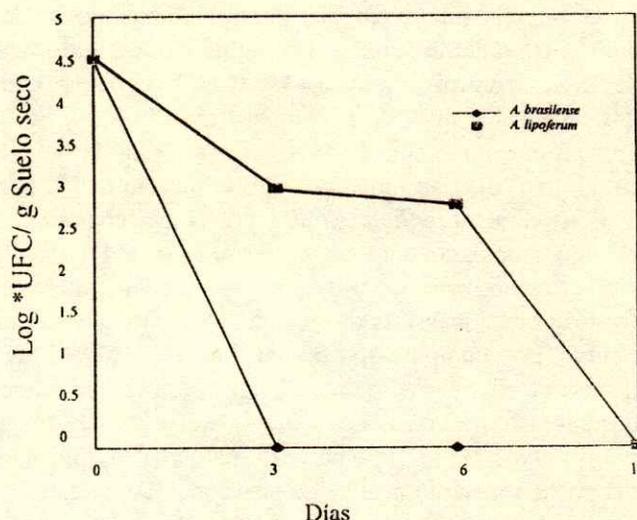


Figura 2. Supervivencia de especies de *Azospirillum lipoferum* y *A. brasilense* en suelo no esterilizado, sin raíces. *UFC= Unidades formadas de colonias.

exclusivamente la zona de germinación de la semilla, al igual que las raíces cuando se hayan desarrollado (Bashan y Levanony, 1998; Jacoud *et al.*, 1999). Lo anterior explica por qué, en el caso del ensayo que se describe, *A. brasilense* se detectó durante la germinación de la semilla, en el periodo del desarrollo radical, e incluso en el interior de las raíces maduras

Cuadro 1. Respuesta del trigo (*Triticum aestivum* L. var. Pavón) a la inoculación con bacterias benéficas de raíz, 15 días después de la siembra.

Tratamientos trigo inoculado y/o fertilizado	Altura de la planta	Longitud de hoja
	----- cm -----	
1 Con <i>Azospirillum lipoferum</i> (A.l) y 80 kg ha ⁻¹ de urea	3.0 d	23.8 d
2 Con <i>A. brasilense</i> (A.b.) y 80 kg ha ⁻¹ de urea	3.0 d	22.7 cd
3 Con <i>Azotobacter beijerinckii</i> y *80 kg ha ⁻¹ de urea (en esterilidad)	3.1 d	22.0 c
4 Con mezcla A.l-A.b. y 80 kg ha ⁻¹ de urea	3.0 d	22.6 cd
5 Con 160 kg ha ⁻¹ urea, sin inocular (control relativo)	3.2 d	21.7 c
6 No inoculado, sin urea (control absoluto)	2.5 c	19.5 b

Los valores son el promedio de ocho plantas. Letras iguales sin diferencia estadística significativa entre tratamientos, según Tukey ($P < 0.01$), CV. 17%.

del trigo (Sturz y Nowak, 2000). En oposición a lo reportado sobre *A. lipoferum*, que sobrevivió el doble del tiempo que *A. brasilense* en el suelo sin raíces. Ello sugiere que *A. lipoferum* no fue dependiente de los ER del trigo (James, 2000), se cree que *A. lipoferum* utilizó lentamente su reserva energética para prolongar su persistencia en el suelo no esterilizado, una característica fisiológica poco común en las BBR (Kurek y Jaroszuk-Scisel, 2003). Estos resultados apoyan que los ER del trigo fueron atractivos para las BBR usadas de acuerdo con el tipo de crecimiento de la raíz observado en el trigo inoculado, en comparación con el aspecto del sistema radical en la parte coronaria y por la cantidad de raíces secundarias detectadas del trigo sin inocular (Gasoni et al., 2001).

En el Cuadro 1, se muestra que las BBR causaron un efecto similar sobre la altura de la planta, comparada con la respuesta del trigo que se fertilizó con 160 kg ha⁻¹ de urea, pero que no se inoculó. Mientras que con respecto a la longitud de la hoja, *A. lipoferum* con 50% de la dosis causó un mejor efecto que el trigo con la dosis máxima de urea pero sin inocular, en tanto que *A. brasilense* y 50% de la dosis de urea, la mezcla A.l-A.b a la misma dosis y *Az. beijerinckii* con 50% de urea en esterilidad causaron un efecto similar en la respuesta de trigo con la dosis máxima de urea y sin inocular. Esto sugiere que las BBR causaron un efecto estimulador en la absorción radical de urea (Yanni y Rizk, 2001). Existe evidencia en la literatura que apoya que las BBR inoculadas en trigo, así como en arroz, avena, maíz, sorgo y otras gramíneas (Dos Reis et al., 2000; Pan et al., 2002), ejercen un efecto positivo sobre su crecimiento, porque cuando las BBR utilizan los compuestos orgánicos excretados por las raíces del trigo como fuente de carbono y energía, los transforman en sustancias que pueden estimular una mayor absorción radical del FN. En el caso específico del trigo de este ensayo hubo un mayor aprovechamiento de la

urea aplicada (Hegazi et al., 1981; Boddey et al., 1986; Shishido y Chanway (2000).

En el Cuadro 2, se observa que el trigo inoculado con las BBR alcanzó un crecimiento similar al que se registró cuando la gramínea se fertilizó exclusivamente con 160 kg de N como urea (dosis 100%), pero que no se inoculó. En contraste con el incremento en peso seco del trigo inoculado con BBR y 80 kg ha⁻¹ de N como urea (dosis 50% de la dosis recomendada), esto indica que 160 kg ha⁻¹ de N como urea es un exceso de N, que no favorece el incremento en peso del trigo, puesto que fue inferior al peso del trigo inoculado con las BBR.

Por este efecto positivo, estas rizobacterias se venden comercialmente para la producción de gramíneas en el campo (Reis et al., 2001; Posada-Campos et al., 2002).

Si se compara la respuesta del trigo usado como control relativo: sin inocular pero con la dosis de urea a 100% (160 kg ha⁻¹ de N), no se registró diferencia estadística significativa en relación con el trigo inoculado con las BBR.

En este experimento, se detectó una diferencia estadística significativa en la respuesta de la gramínea a la inoculación con las BBR, lo que sugiere la posible conversión de los ER de gramíneas en SPCV específicas para cada BBR, puesto que *Azospirillum* ejerció un efecto positivo sobre el peso seco de la raíz del trigo, que *Az. beijerinckii* probablemente no utilizó para estimular un incremento en peso seco. Se reporta que esto depende de la transformación de exudados de ER en sustancias estimuladoras de crecimiento vegetal, por lo que el peso seco de la raíz del trigo inoculada con esta BBR no fue estadísticamente diferente al trigo fertilizado con la dosis máxima de urea y que no se inoculó como lo muestra el análisis.

El incremento en el peso seco del trigo, inoculado con las especies de *Azospirillum*, indica una mejor

Cuadro 2. Respuesta del trigo (*Triticum aestivum* L. var. Pavón) a la inoculación con bacterias benéficas de raíz, 30 días después de la siembra.

Tratamiento trigo inoculado y/o fertilizado	Altura de la planta	Longitud de hoja	Longitud de raíz	Peso fresco	Peso seco
	cm			g	
1 Con <i>Azospirillum lipoferum</i> (A.l) y 80 kg ha ⁻¹ de urea	10.0 d	25.1 d	17.2 a	8.8 c	7.6 c
2 Con <i>A. brasilense</i> (A.b.) y 80 kg ha ⁻¹ de urea	8.1 c	26.0 d	47.8 d	11.0 d	9.6 d
3 Con <i>Azotobacter beijerinckii</i> y 80 kg ha ⁻¹ de urea	8.2 c	25.0 d	17.0 a	6.0 b	5.4 a
4 Con mezcla A.l.-A.b. y 80 kg ha ⁻¹ de urea	7.5 b	25.7 d	43.4 c	7.5 b	6.0 b
5 Con 160 kg ha ⁻¹ de urea sin inocular (control relativo)	7.8 b	25.8 d	22.3 a	5.5 a	5.0 a
6 No inoculado y sin urea (control absoluto)	4.1 a	22.6 b	39.3 b	5.0 a	4.5 a

Los valores son el promedio de ocho plantas. Letras iguales sin diferencia estadística significativa entre tratamientos según Tukey ($P < 0.01$). CV. 17%.

Cuadro 3. Tiempo de germinación de semillas de gramíneas.

Semillas [†]	*Ácido indol acético (50 ppm)	Filtrado libre de células <i>Azotobacter beijerinckii</i>	Filtrado libre de células <i>Azospirillum lipoferum</i>	Filtrado libre de células <i>A. brasilense</i>	Agua
	días				
Trigo	4-5 dc	4-5 dc	3-4 d	4-5 dc	6-7 a
Maíz	5-6 bc	5-6 bc	5-6 bc	6 bc	7-8 a

[†] Promedio de 100 semillas por tratamiento. Letras iguales sin diferencia estadística significativa ($P < 0.01$) según Tukey.

absorción radical de la urea, mayor que la registrada en el trigo inoculado con *Az. beijerinckii* en esterilidad. Además de la posible interacción específica por los ER de las raíces de la variedad Pavón y las especies de *Azospirillum* (Bashan y Levanony, 1998). Se reporta que las BBR estimularon la proliferación de pelos radicales en el trigo, como se ha observado en otras plantas (Chanway *et al.*, 2000; Bent *et al.*, 2001) y ello aumentó el área de exploración de la raíz para captar el N de la urea (Muthukumarasamy *et al.*, 2002), como se reporta en otros trabajos sobre inoculación de BBR: en maíz (Riggs *et al.*, 2001), en trigo (Chanway *et al.*, 2000) y en arroz (Tran Van *et al.*, 2000).

La posible síntesis de SPCV por BBR se apoyó en un ensayo realizado en la esterilidad, que se muestra en el Cuadro 3, en el cual es evidente que los filtrados libres de células con base en *A. lipoferum*, *A. brasilense* y *Az. beijerinckii* causaron un efecto similar sobre el tiempo de germinación de las semillas de trigo y maíz al observado con el ácido indolacético 50 mg L⁻¹ como lo muestra el análisis estadístico, en el cual, en general, no se observó diferencia estadística significativa, excepto en el caso de las semillas que

fueron únicamente tratadas con agua. Al respecto se reporta que las BBR producen sustancias estimuladoras de la germinación a partir de los exudados de las semillas (Asghar *et al.*, 2002).

Los resultados de la respuesta positiva del trigo a la inoculación con las especies de *Azospirillum* spp. y *Az. beijerinckii* con 50% de la dosis de fertilización nitrogenada, fue estadísticamente similar a la determinada en el trigo sin inocular, pero al cual se le aplicó la máxima dosis del FN. Lo anterior sugiere que estas BBR transformaron los exudados radicales del trigo en sustancias promotoras del crecimiento vegetal, para que el cultivo vegetal absorba sin dificultad la dosis reducida a 50% del FN (Whitmore, 2000; Riggs *et al.*, 2001). Este efecto estimulador de crecimiento que se detectó desde el inicio de la germinación del trigo, se reporta que se mantiene en las primeras etapas del desarrollo radical del trigo (Jacoud *et al.*, 1999), como se observó en este experimento y que fue similar a lo observado en *Az. paspali* cuando coloniza e influye en el crecimiento de raíces de *Paspalum notatum* (Chelius y Triplett, 2000). Estos resultados demuestran la importancia de las BBR para el desarrollo saludable de gramíneas, con un régimen de FN reducida y controlada.

CONCLUSIÓN

- Estos resultados sugieren que ambos géneros *Azospirillum* y *Azotobacter* de BBR pueden ser una alternativa para la producción de trigo, con un esquema de ahorro de FN, que permita mantener la fertilidad del suelo, sin causar contaminación ambiental.

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Internacional de Energía Atómica de la FAO-ONU, Viena, Austria. Research contract MEX 302-DI-MEX-7944 y a la CIC de la UMSNH por el proyecto 2.7 (2003). A Beatriz Noriega Gamboa por su paciencia en la corrección de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Asghar, H.N., Z.A. Zahir, M. Arshad y A. Khaliq. 2002. Relationship between in vitro production of auxins by rhizobacteria and their growth-promoting activities in *Brassica juncea* L. Biol. Fert. Soils 35: 231-237.
- Baldani, V.L.D., J.I. Baldani y J. Döbereiner. 2000. Inoculation of rice plants with the endophytic diazotrophs *Herbaspirillum seropedicae* and *Burkholderia* spp. Biol. Soils 30: 485-491.
- Bashan, Y. y H. Levanony. 1998. Interaction between *Azospirillum brasilense* and wheat root cells during early stages of root colonization. pp. 166-173. In: Klingmuller, W. (ed.) *Azospirillum* IV. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Benizri, E., E. Baudion y A. Guckert. 2001. Root colonization by inoculated plant growth-promoting rhizobacteria. Biocontrol Sci. Tech. 11: 557-574.
- Bent, E., S. Tuzun, C.P. Chanway y S. Enebak. 2001. Alterations in plant growth and in root hormone levels of lodgepole pines inoculated with rhizobacteria. Can. J. Microbiol. 47: 793-800.
- Chanway, C.P., M. Shishido, J. Nairn, S. Jungwirth, J. Markham, G. Xiao y F.B. Holl. 2000. Endophytic colonization and field responses of hybrid spruce seedlings after inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria. For. Ecol. Manage. 133: 81-88.
- Chelius, M.K. y E.W. Triplett. 2000. Prokaryotic nitrogen fixation: Model system for the analysis of a biological process. Horizon Scientific Press. Wymondham, UK.
- Christiansen-Weniger, C., A.F. Groneman y J.A. Van Veen. 1992. Associative N₂ fixation and root exudation of organic acids from wheat cultivars of different aluminum tolerance. Plant Soil 139: 167-174.
- Dashti, N., B. Prithiviraj, R.K. Hynes y D.L. Smith. 2000. Root and rhizosphere colonization of soybean (*Glycine max* L. Merr.) by plant-growth-promoting rhizobacteria at low root zone temperatures and under short-season conditions. J. Agron. Crop Sci. 185: 15-22.
- Dos Reis Jr, F.B., V.M. Reis, S. Urquiaga y J. Döbereiner. 2000. Influence of nitrogen fertilization on the population of diazotrophic bacteria *Herbaspirillum* spp. and *Acetobacter diazotrophicus* in sugar cane (*Saccharum* spp.). Plant Soil 219: 153-159.
- Elbeltagy, A., K. Nishioka, H. Suzuki, T. Sato, Y. Sato, H. Morisaki, H. Mitsu y K. Minamisawa. Isolation and characterization of endophytic bacteria from wild and traditionally cultivated rice varieties. Soil Sci. Plant Nutr. 46: 617-629.
- García G., M.M., J.M. Sánchez-Yañez, J.J. Peña-Cabriales y P.E. Moreno-Zacarias. 1995. Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la inoculación con bacterias fijadoras de nitrógeno. Terra 13: 71-80.
- Gasoni, L., J. Cozzi, K. Kobayashi, V. Yossen, G. Zumelzu, S. Babbitt y N. Kahn. 2001. Yield response of lettuce and potato to bacterial and fungal inoculants under field conditions in Cordoba (Argentina). J. Plant Dis. Protection 108: 530-535.
- Gutiérrez-Manero, F.J., B. Ramos-Solano, A. Probanza, J. Mehouchi, F.R. Tado y M. Talon. 2001. The plant-growth-promoting rhizobacteria *Bacillus pumilus* and *Bacillus licheniformis* produce high amounts of physiologically active gibberellins. Physiol. Plant 111: 206-211.
- Jacoud, C., D. Job, P. Wadoux y R. Bally. 1999. Initiation of root growth stimulation by *Azospirillum lipoferum* CRT1 during maize seed germination. Can. J. Microbiol. 45: 339-342.
- James, E.K. 2000. Nitrogen fixation in endophytic and associative symbiosis. Field Crop Res. 65: 197-209.
- Kurek, E. y J. Jaroszek-Scisiel. 2003. Growth promotion by *Pseudomonas fluorescens* strains and their interactions with *Fusarium culmorum* under various soil conditions. Biol. Control 26: 48-56.
- Muthukumarasamy, R., G. Revathi y C. Lakshminarasimhan. 1999. Diazotrophic associations in sugar cane cultivation in South India. Trop. Agric. 76: 171-178.
- Muthukumarasamy, R., G. Revathi, S. Seshadri y C. Lakshminarasimhan. 2002. *Gluconacetobacter diazotrophicus* a promising diazotrophic endophyte in tropics. Current Sci. 83: 137-145.
- Nandakumar, R., S. Babu, R. Viswanathan, J. Sheela, T. Raguchander y R.A. Samiyappan. 2001. A new bio-formulation containing plant growth promoting rhizobacterial mixture for the management of sheath blight and enhanced grain yield in rice. Biocontrol 46: 493-510.
- Pan, B., J.K. Vessey y D.L. Smith. 2002. Response of field grown soybean to co-inoculation with the plant growth promoting rhizobacteria *Serratia proteamaculans* or *Serratia liquefaciens*, and *Bradyrhizobium japonicum* pre-incubated with genistein. Eur. Agron. 17: 143-153.
- Pérez-Moreno, J. y R. Ferrera-Cerrato. 1996. Avances de Investigación de la Sección de Microbiología de Suelos. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Estado de México.
- Posada-Campos, S., C.J. Ramírez, J.J. Peña-Cabriales, R. Fariás-Rodríguez y J.M. Sánchez-Yañez. 2002. Aislamiento y

- efecto de inoculación de maíz con bacterias benéficas de raíz. *Cuatro Vientos* 30: 24-28.
- Reis, V.M., J.I. Baldani, V.L.D. Baldani y J. Döbereiner. 2000. Biological dinitrogen fixation in gramineae and palm trees. *Crit. Rev. Plant Soil* 19: 227-247.
- Riggs, P.J., M.K. Chelius, A.L. Iniguez, S.M. Kaeppler y E.W. Triplett. 2001. Enhanced maize productivity by inoculation with diazotrophic bacteria. *Aust. J. Plant Physiol.* 28: 829-836.
- Rodelas, B., J. González-López, C. Pozo, V. Salmerón y M.V. Martínez-Toledo. 1999. Response of faba bean (*Vicia faba* L.) to combined inoculation with *Azotobacter* and *Rhizobium leguminosarum* bv. *Viciae*. *Appl. Soil Ecol.* 12: 51-59.
- Sánchez-Yáñez, J.M. 1998. Effect of bacteria and humic acids on the yield of wheat under irrigated. International Atomic Energy Agency. The use of isotopic technique for optimizing the efficient use of nitrogen fertilizer in wheat under irrigated in consequence to reduce environmental pollution. Research contract D1-MEX-7944. Technical Report FAO. Vienna, Austria, pp: 7-14.
- Shishido, M. y C.P. Chanway. 2000. Colonization and growth promotion of outplanted spruce seedlings pre-inoculated with plant growth-promoting rhizobacteria in the greenhouse. *Can. J. For. Res.* 30: 845-854.
- Singh, U.P., B.K. Sarma y D.P. Singh. 2003. Effect of plant growth-promoting rhizobacteria and culture filtrate of *Sclerotium rolfsii* on phenolic and salicylic acid contents in chickpea (*Cicer arietinum*). *Curr. Microbiol.* 46: 131-140.
- Sturz, A.V. y J. Nowak. 2000. Endophytic communities of rhizobacteria and the strategies required to create yield enhancing associations with crops. *Appl. Soil Ecol.* 15: 183-190.
- Tran Van, V., O. Berge, S. Ngoko, J. Balandreu y T. Heulin. 2000. Repeated beneficial effect of rice inoculation with a strain of *Burkholderia vietnamiensis* on early and late yield components in low fertility sulphate acid soils of Vietnam. *Plant Soil* 218: 273-284.
- Valdivia-Urdiales, B., J.M. Fernández-Brondo y J.M. Sánchez-Yáñez. 1999. Efecto de la inoculación de *Pseudomonas putida* y *Glomus* sp. sobre trigo. *Rev. Lat-Amér. Microbiol.* 41: 214-217.
- Whitmore, A.P. 2000. The biological management of soil fertility project. *Neth. J. Agric. Sci.* 48: 115-122.
- Yami, Y.G. y R.Y. Rizk. 2001. Root colonization by inoculated plant growth-promoting rhizobacteria. *Biocontrol Sci. Tech.* 11: 557-574.

FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO EN UNA PRADERA DE TRÉBOL HUBBA/BALLICO DE CORTE O DE PASTOREO

Biological Nitrogen Fixation in a Cut or Grazed Hubba Clover/Ryegrass Sward

J. Delgadillo-Martínez^{1‡}, R. Ferrera-Cerrato¹, A. Galvis-Spínola¹, A. Hernández-Garay² y M.A. Cobos-Peralta²

RESUMEN

Se comparó el manejo (corte *versus* pastoreo por ovinos) en una asociación de trébol hubba (*Melilotus albus*)-ballico perenne (*Lolium perenne*) en la producción de materia seca (MS) y fijación biológica de N₂ atmosférico. Se realizaron cuatro ciclos de corte pastoreo. Con manejo por corte se mejoró la producción de MS acumulada en los cuatro ciclos (11.4 t ha⁻¹ de MS con 35.06% de trébol hubba) en comparación con el pastoreo (9.6 t ha⁻¹ de MS con 37.30% de trébol hubba). La fijación de N₂ por rizobios en simbiosis con trébol hubba fue similar en corte que en pastoreo; pero, la población de bacterias fijadoras de N₂ de vida libre en la rizosfera de ballico fue mayor en pastoreo que en corte.

Palabras clave: *Melilotus albus*, *Lolium perenne*, praderas asociadas, leguminosas, gramíneas, fijación de nitrógeno, *Rhizobium*.

SUMMARY

The influence of sheep grazing or cutting on dry matter (DM) yield and biological N₂ fixation in a plant association composed of hubba clover (*Melilotus albus*) and perennial ryegrass (*Lolium perenne*) was evaluated. Four cutting or grazing cycles were carried out. During these four experimental cycles, DM was higher in the cutting treatment (11.4 t ha⁻¹ containing 35.06% hubba clover) than in the grazing treatment (9.6 t ha⁻¹, containing 37.30% hubba clover). N₂ symbiotic fixation was similar in both cutting and grazing treatments. However, the population of N₂ fixing bacteria of the rhizosphere of ryegrass was higher in the grazing treatment than in the cutting treatment.

¹ Instituto de Recursos Naturales, ² Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México.

[‡] Autor responsable (juliandm@colpos.mx)

Recibido: Enero de 2002. Aceptado: Septiembre de 2004.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 23: 73-79.

Index words: *Melilotus albus*, *Lolium perenne*, associated swards, legumes, gramineae, nitrogen fixation, *Rhizobium*.

INTRODUCCIÓN

El ciclo global del nitrógeno está constituido por cinco fases primarias: mineralización, nitrificación, desnitrificación, fijación biológica e inmovilización. La actividad humana ha influido en la mayoría de los procesos que componen estas fases; en especial, la fijación del abundante y estable N₂ molecular, que representa 79% de la atmósfera en formas aprovechables para los cultivos (Echegaray-Alemán, 1995). De importancia agropecuaria es la contribución de rizobios que fijan N₂ atmosférico [hasta 200 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N (Bolger *et al.*, 1995)] de manera simbiótica en nódulos de la mayoría de las plantas de la familia *Fabaceae*. Estas cantidades pueden sustituir, en parte, la fertilización química nitrogenada; pero, para que el ingreso de N₂ sea de tal magnitud, deben de cumplirse condiciones favorables para la leguminosa y sus microsimbiontes (Dear *et al.*, 1996), como: temperatura, pH, humedad, contenido de N-inorgánico, Fe, Co, Mo y P en el suelo (Ofosu-Budu *et al.*, 1992; Hardarson, 1993). Además, las gramíneas mantienen en su rizosfera un hábitat ideal para la proliferación de bacterias de vida libre fijadoras de N₂ atmosférico. Entre los géneros conocidos con esta función están: *Azospirillum*, *Bacillus*, *Beijerinckia*, *Azotobacter* y *Pseudomonas* (Echegaray-Alemán, 1995). La fijación de N₂ por estos microorganismos puede ser de 10 a 90 kg ha⁻¹ año⁻¹ en gramíneas cuyos exudados radicales y las condiciones ambientales favorezcan a estas bacterias (Chanway *et al.*, 1990).

En praderas asociadas (leguminosas y gramíneas), la fijación simbiótica de N₂ atmosférico depende de la proporción de las leguminosas (Matches, 1989; Burton y DeVane, 1992; Ledgard y Steele, 1992; Fothergill y Davies, 1993). El pastoreo de ovinos o bovinos reduce la fijación de N₂ en comparación con equinos y caprinos (Gong *et al.*, 1996; Del Pozo *et al.*,

1996). Algunos autores concuerdan en que el pastoreo favorece la fijación simbiótica de N_2 atmosférico (Sandford *et al.*, 1995) y otros indican que el pastoreo la reduce o inhibe (Saunders, 1984; Ledgard y Steele, 1992; Wheeler *et al.*, 1997), en comparación con el manejar las praderas asociadas por corte. Debido a esta polémica, el presente trabajo se planteó para indicar los efectos en producción de materia seca y fijación biológica de N_2 atmosférico debido a estos tipos de manejo en una pradera de trébol hubba con ballico perenne, evaluando, a su vez, la función de los microorganismos de vida libre fijadores de N_2 atmosférico asociados a la rizosfera de ballico, de los cuales existe poca información en praderas de leguminosas-gramíneas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Campo Montecillo del Colegio de Postgraduados, ubicado a $19^{\circ} 27' 30''$ N y $98^{\circ} 54' 14''$ O, y 2241 m de altitud. Trece días antes de la siembra, se realizó un muestreo para la determinación de características químicas iniciales del suelo. Se determinó pH en agua 1:2 suelo/agua (7.9), conductividad eléctrica (0.42 dS m^{-1}), K intercambiable [23.5 mg kg^{-1} de suelo seco (Mehlich, 1984)] y P-Olsen [29 mg kg^{-1} de suelo seco (Olsen y Dean, 1965)].

Se estableció una asociación de trébol hubba (*Melilotus albus*) y ballico perenne (*Lolium perenne*) en condiciones de riego. El trébol hubba se inoculó con seis cepas de *Rhizobium meliloti*. Las cepas Cp1 y Cp89, pertenecientes a la colección Microbiana Internacional del Área de Microbiología del Colegio de Postgraduados y las cepas Cpmex173, Cpmex176, Cpmex177, Cpmex178 y Cpmex179 provenientes de suelos de Nochistlán, Oaxaca. Se realizaron cortes de homogeneización de la altura de las plantas a 30 cm, a 90 y 130 días después de la siembra (dds). A 160 dds iniciaron los ciclos de corte/pastoreo, los cuales fueron cuatro. El área de cada unidad experimental fue de 125 m^2 . Se incluyeron dos tratamientos con cinco repeticiones: 1) aprovechamiento por corte, realizando éste aproximadamente a 15 cm de altura y 2) aprovechamiento por pastoreo, el cual fue rotativo con un día de ocupación y 20 días de descanso. Se pastorearon borregos criollos con un peso entre 23 y 44 kg estableciendo una asignación de forraje de 10 a 12%. Se utilizó cerco eléctrico para delimitar las unidades experimentales en este tratamiento.

Variables Evaluadas

Producción de materia seca vegetal. Un día antes y un día después de realizar el corte/pastoreo de la pradera, se tomó una muestra (tres repeticiones por unidad experimental) del forraje presente, con la utilización de un cuadro de alambón de 0.25 cm^2 arrojado al azar dentro de la unidad experimental. Con este material se formó una muestra compuesta por tratamiento. Se separó el material vegetal fresco para pesarlo y determinar la composición botánica de la pradera. El material separado se secó a 75°C en horno con extracción de aire (Salvis, Modelo Thermocenter 100X) durante 48 h. Se sacó del horno y se pesó. Se determinó el peso seco del forraje ofrecido (antes del corte/pastoreo) y residual (después del corte/pastoreo); además, se calculó el forraje aprovechado, siendo éste el resultado de sustraer el forraje residual al ofrecido.

Fijación simbiótica de N atmosférico en trébol hubba. Se determinó la reducción de acetileno (Lee *et al.*, 1977) en raíces de trébol hubba (cinco plantas de cada tratamiento) un día antes de cada ciclo de corte/pastoreo. Para determinar la cantidad de acetileno/etileno, se utilizó un cromatógrafo de gases (Varian 2440 con detector de ionización de flama y columna de 2 m de largo y 1/8 de pulgada de diámetro, empacada con Porapak N). Además, las raíces utilizadas en esta determinación se lavaron con agua corriente para luego separar, contar y pesar el número de nódulos no-senescentes. Se calculó la reducción de acetileno por planta (fijación total) y por gramo de nódulos secados a 70°C durante 48 h (fijación específica).

Población de bacterias de vida libre fijadoras de N atmosférico en rizosfera de ballico. En los cuatro ciclos de corte/pastoreo, se determinó el tamaño de la población de bacterias de vida libre fijadoras de N_2 atmosférico por el método del número más probable (NMP). Para esto, se realizaron diluciones decimales del suelo rizosférico y éstas se sembraron por quintuplicado en tubos de ensayo con tapón de algodón (Pochon y Tardeux, 1962), que contenían 2 mL del medio de cultivo con fuente combinada de carbono [Solución A: 0.8 g de K_2HPO_4 , 0.2 g de KH_2PO_4 , 0.1 g de NaCl, 0.028 g de $Na_2\text{-Fe-EDTA}$, 0.025 g de $Na_2MoO_4 \cdot H_2O$, 0.025 g de extracto de levadura, 5 g de manitol, 0.5 mL de lactato de sodio a 60%, 900 mL de agua destilada y 2 mL de una solución alcohólica de azul de bromotimol a 0.5%.

Solución B: 0.2 g de $MgSO_4 \cdot H_2O$, 0.06 g de $CaCl_2$ y 100 mL de agua destilada. Cada solución se ajusta a pH 7, se esterilizan por separado a 18 lbs plg^{-2} durante 18 min. Una vez tibias, se mezclan y se les adiciona 5 μg de biotina, 19 μg de ácido *p*-aminobenzoico y 40 μg de actidiona (Rennic, 1981). Se incubaron los tubos a 27 °C por 72 h. Se consideraron positivos los tubos en los que el medio de cultivo cambió de color azul turquesa a amarillo o a azul rey y negativos los tubos en los que el medio de cultivo no cambió de color. Los cálculos de NMP se realizaron de acuerdo con las tablas de Alexander (1982).

Análisis estadístico. El experimento se ajustó a un modelo completamente al azar con dos tratamientos y cinco repeticiones y se analizó mediante la prueba de Tukey de comparación de medias con 5% de significancia, en el programa de cómputo SAS, Versión 6.12 (SAS Institute, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de Materia Seca Vegetal

La pradera produjo más fitomasa total al aprovecharse por corte que por pastoreo ($P > 0.05$), siendo 11.4 t ha^{-1} de materia seca (MS) con 35.06% de trébol hubba y 9.6 t ha^{-1} de MS con 37.30% de trébol durante los cuatro ciclos en corte y pastoreo, respectivamente. Asimismo, la producción de trébol hubba fue similar ($P < 0.05$) al aprovechar la pradera por corte que por pastoreo, 4.0 y 3.7 t ha^{-1} de MS, respectivamente. Pero, la producción de ballico fue mayor ($P > 0.05$) al aprovecharla por corte con 7.4 t ha^{-1} de MS que por pastoreo con 6.0 t ha^{-1} de MS. Jiménez y Martínez (1985) mencionaron que, en comparación con el corte, cuya eficiencia de aprovechamiento es de hasta 97%, en pastoreo se produce menor cantidad de forraje, pues su eficiencia de aprovechamiento es de 60% o menor. Sin embargo, la producción mayor en corte que en pastoreo pudo deberse a que la asignación de forraje de 10 a 12% inhibió el rebrote vigoroso del trébol; ya que Sanford *et al.* (1995) reportaron que, en una pradera de *Trifolium subterraneum* asociada a *Arctotheca calendula*, la producción de forraje en pastoreo fue de 11.8 y en corte de 7.8 t ha^{-1} de MS. Esto lo atribuyeron a que, en el tratamiento de pastoreo, la carga animal fue 25% menor que la recomendada, por lo que el contenido de la leguminosa no fue menor que 30% durante el ciclo de experimentación. Además, indicaron que en pastoreo se afectó el área

foliar residual de la leguminosa menos que en corte, por lo que en pastoreo se presentó un rebrote más vigoroso. En el presente trabajo, el trébol hubba fue afectado por las defoliaciones en ambos tratamientos, ya que el contenido de esta leguminosa se redujo de 67 a 12% en corte y de 88 a 5% en pastoreo (Figura 1).

Fijación Simbiótica de N_2 en Trébol Hubba

La fijación de N_2 atmosférico por rizobios en simbiosis con trébol hubba, promedio de los cuatro ciclos, fue similar ($P < 0.05$) en corte que en pastoreo, con 1.83 y 1.36 nmol de C_2H_4 producidos $planta^{-1} h^{-1}$, respectivamente. Wheeler *et al.* (1997) mencionaron que la fijación de N_2 atmosférico en praderas de *Trifolium spp./ballico* perenne fue mayor en corte con 65 kg ha^{-1} de N que en pastoreo con 35 kg ha^{-1} de N e indicaron que con la asignación de 10%, el pastoreo redujo la persistencia de la leguminosa en la pradera. Por lo contrario, Unkovich *et al.* (1998) mencionaron que pastoreos intensos (16 borregos ha^{-1}) fuerzan el consumo del pasto, y no sólo el de las leguminosas, por lo que aumenta el rebrote de las leguminosas y la fijación de N_2 atmosférico de éstas, en comparación con pastoreos menos intensos (8 borregos ha^{-1}) y con corte. Sandford *et al.* (1995) mencionaron que la fijación de N_2 atmosférico por *Trifolium subterraneum* aumenta con la intensidad de pastoreo, hasta un límite en el que el sobrepastoreo inhibe el rebrote y la fijación de N_2 atmosférico. En el presente trabajo, la fijación de N_2 atmosférico se relacionó ($R^2 = 0.98$) con el porcentaje de trébol hubba en la pradera (Figura 1), por lo que, al reducirse la persistencia de la leguminosa en la pradera, se inhibió la fijación simbiótica de N_2 atmosférico en ambos tratamientos. Lo anterior indica que el trébol hubba no soportó el corte a 15 cm de altura, ni el pastoreo con asignaciones de 10 a 12% y, con esto, la fijación de N_2 atmosférico también se redujo. Kishinevski *et al.* (1992) reportaron el efecto del corte en la reducción de la fijación simbiótica de N_2 atmosférico en *Trifolium alexandrinum* y mencionaron que la inoculación con *Rhizobium trifoli* provocó un aumento de 39% de la materia seca al primer corte en comparación con los tratamientos sin inocular; pero, en cortes sucesivos, la producción de materia seca fue similar en tratamientos inoculados y no-inoculados. Sin embargo, Bolger *et al.* (1995) y Peoples *et al.* (1995) consideraron que la fijación de N_2 atmosférico es afectada principalmente por la humedad del suelo

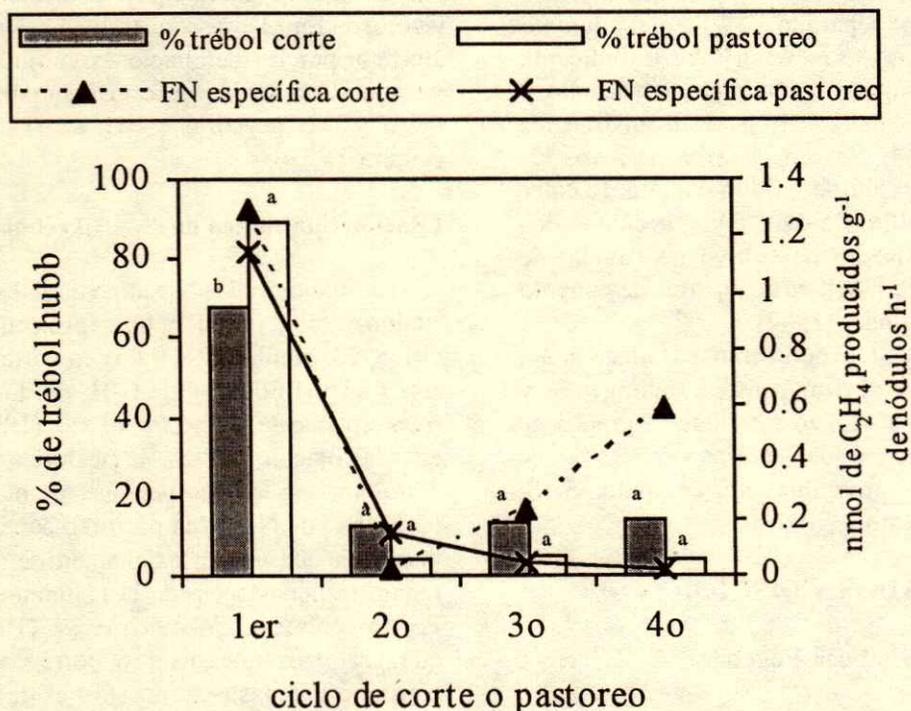


Figura 1. Contenido de trébol hubba y fijación específica de N_2 atmosférico en una pradera asociada de trébol hubba y ballico perenne (promedio de cinco repeticiones). FN = fijación simbiótica de N_2 atmosférico. Letras distintas en columnas del mismo ciclo indican diferencias estadísticas entre corte y pastoreo (Tukey, $\alpha = 0.05$).

y no por factores de la planta, lo cual no es el caso de los resultados del presente trabajo, ya que la pradera se manejó con riegos y los suelos siempre tuvieron humedad adecuada.

El número de nódulos fue similar en ambos tratamientos; en promedio de los cuatro ciclos se presentaron 38.9 y 36.7 nódulos planta⁻¹ en corte y pastoreo, respectivamente. El número de nódulos no presentó descensos marcados (Figura 2) durante los cuatro ciclos de corte/pastoreo en comparación con lo ocurrido con la fijación simbiótica de N_2 atmosférico. Lo anterior indica que los nódulos se formaron, pero después del primer ciclo de experimentación no fueron efectivos.

La fijación específica de N_2 atmosférico (producción de C_2H_4 planta⁻¹ h⁻¹ dividida entre el peso seco de los nódulos de la planta) se redujo drásticamente en el segundo ciclo de corte/pastoreo (Figura 2).

Bacterias de Vida Libre Fijadoras de N_2 Atmosférico en Rizosfera de Ballico

En el tratamiento de pastoreo se presentó mayor ($P > 0.05$) número de microorganismos de vida libre fijadores de N_2 , en comparación con el tratamiento de corte del segundo al cuarto ciclo de corte/pastoreo. En el primer ciclo, la población fue similar ($P < 0.05$) en ambos tratamientos (Cuadro 1).

Ghani-Nugroho y Kuwatsuka (1992) mencionaron que la aplicación de materia orgánica al suelo incrementa el número de microorganismos de vida libre fijadores de N_2 . El tamaño de esta población microbiana estuvo correlacionado ($R^2 = 0.75$) con la cantidad de N_2 fijado por leguminosas, sólo cuando la materia orgánica aplicada tiene una relación C/N mayor que 51. Cuando se aplican materiales orgánicos con más N, la respuesta es variable.

Cuadro 1. Población de bacterias de vida libre fijadoras de N₂ atmosférico en rizosfera de raygras perenne asociado a trébol hubba.

Ciclo de corte/pastoreo	Corte [†]			Pastoreo		
	Li	media	Ls	Li	media	Ls
	----- NMP X 10 ³ bacterias de vida libre fijadoras de N ₂ g ⁻¹ de suelo seco -----					
1er	5.12	^x 16.90 a	55.70	4.48	^x 14.80 b	48.84
2o	0.71	^y 2.35 b	7.75	3.81	^x 12.60 b	41.58
3o	0.32	^y 1.07 b	3.53	6.75	^x 22.30 a	73.59
4o	0.29	^y 0.98 b	3.23	6.71	^x 22.15 a	74.28

[†] Li = límite inferior y Ls = límite superior del NMP con 95% de confianza. Promedio de cinco repeticiones con la misma letra (a,b) en la misma columna o con el mismo subíndice (^{x,y}) en la misma fila son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.005$).

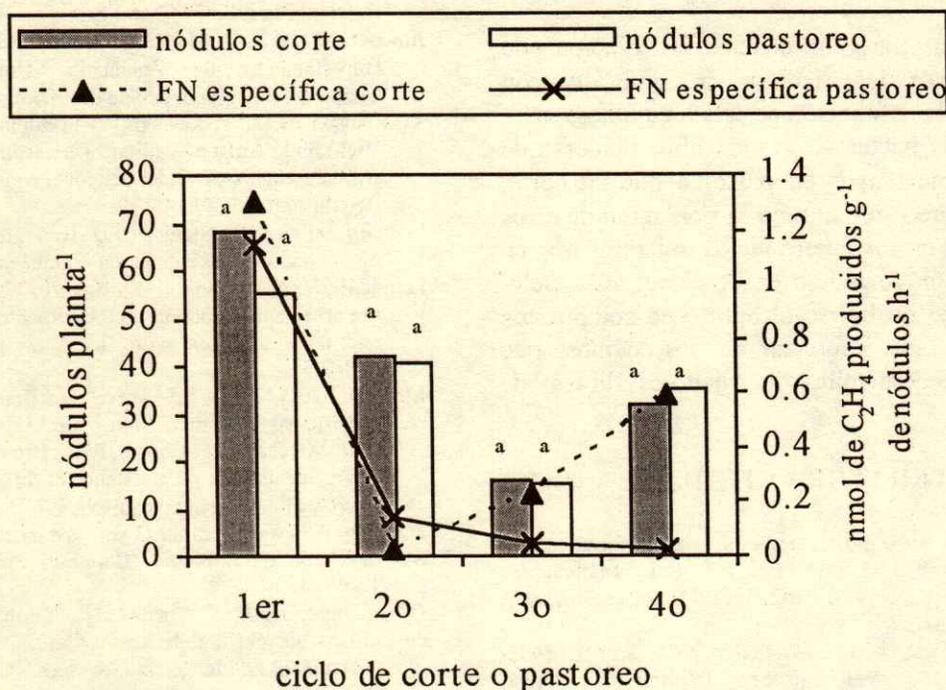


Figura 2. Número de nódulos y fijación específica de N₂ atmosférico en trébol hubba en asociación con ballico perenne, durante cuatro ciclos de corte/pastoreo (promedio de cinco repeticiones).

FN = fijación simbiótica de N₂ atmosférico. Letras distintas en columnas del mismo ciclo indican diferencias estadísticas entre corte y pastoreo (Tukey, $\alpha = 0.05$).

Por lo anterior, es posible que, en el presente trabajo, el aporte de heces en el tratamiento de pastoreo haya estimulado el crecimiento de la población de bacterias de vida libre fijadoras de N₂ en la rizosfera de ballico.

Wiehe y Hoflich (1995) mencionaron que la mayoría de las bacterias promotoras del crecimiento de la rizosfera de muchos cultivos se establecen en la fase vegetativa (10^4 a 10^5 UFC g⁻¹ de raíz), pero durante la maduración de las plantas, la población de estos microorganismos se reduce (10^2 UFC g⁻¹ de raíz). Además, estos autores indicaron que los rizobios

y las bacterias fijadoras de N₂ atmosférico de vida libre se establecen en la rizosfera de los cultivos durante todo el ciclo vegetativo y su establecimiento no depende del aporte de materiales orgánicos al suelo, sino de interacciones moleculares entre los microorganismos y los exudados radicales. Los datos del Cuadro 1 no soportan esa aseveración, ya que, en pastoreo, las bacterias fijadoras de N₂ de vida libre no se establecieron durante todo el año en el tratamiento de corte. Sin embargo, en pastoreo, donde hubo aporte de materia orgánica por las heces de los borregos, esta

población si se estableció durante todo el ciclo de experimentación.

CONCLUSIONES

- El contenido de trébol hubba en la pradera se redujo drásticamente al manejarla por corte a una altura aproximada de 15 cm y también por pastoreo con una asignación de 10 a 12%, por lo que se recomienda dejar una mayor área foliar remanente para asegurar su persistencia en asociación con ballico. Debido a lo anterior, la fijación simbiótica de N₂ atmosférico se redujo drásticamente después del primer ciclo de corte pastoreo.

- El factor que más influenció la fijación de N₂ atmosférico por los rizobios en simbiosis con trébol hubba fue la defoliación de esta leguminosa.

- La población de bacterias de vida libre fijadoras de N₂ atmosférico fue mayor en pastoreo que en corte; además, en pastoreo se mantuvo la población de estos microorganismos en los cuatro ciclos, mientras que en corte, la población se redujo desde el segundo ciclo. Lo anterior puede atribuirse al aporte de compuestos carbonados por las excretas de los ovinos que favorecieron el desarrollo de fijadores libres de N₂ atmosférico.

LITERATURA CITADA

- Alexander, M. 1982. Most probable number method for microbial populations. pp. 815-820. *In*: Page, A.L. (ed.). Methods for soil analysis. Agronomy 9, Parte II. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Bolger, T.P., J.S. Pate, M.J. Unkovich y N.C. Turner. 1995. Estimates of seasonal nitrogen fixation of annual subterranean clover based pastures using the 15N natural abundance technique. *Plant Soil* 175: 57-66.
- Burton, G.W. y E.H. DeVane. 1992. Growing legumes with coastal bermudagrass in the lower coastal plain. *J. Prod. Agric.* 5: 278-281.
- Chanway, C.P., F.B. Holl y R. Turkington. 1990. Specificity of associations between *Bacillus* isolates and genotypes of *Lolium perenne* and *Trifolium repens* from a grass/legume pasture. *Can. J. Bot.* 68: 1126-1130.
- Dear, B.S., J.M. Virgona y G. Sutherland. 1996. Legumes in low input perennial pastures of southern Australia: Historical role and future development. *N.Z. J. Agric. Res.* 39: 579-589.
- Del Pozo, M., L.A. Wright, T.K. White y P.M. Colgrove. 1996. Effects of grazing by sheep or goats on sward composition in ryegrass/white clover pasture and on subsequent performance of weaned lambs. *Grass Forage Sci.* 51: 142-154.
- Echegaray-Alemán, A. 1995. Ciclo del nitrógeno y fases que lo constituyen. pp. 7-35. *In*: Ferrera-Cerrato, R. y J. Pérez-Moreno (eds.). *Agromicrobiología: Elemento útil en agricultura sustentable*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Fothergill, M. y D.A. Davies. 1993. White clover contribution to continuously stocked sheep pastures in association with contrasting perennial ryegrasses. *Grass Forage Sci.* 48: 369-379.
- Ghani-Nugroho, S. y S. Kuwatsuka. 1992. Concurrent observation of several processes of nitrogen metabolism in soil amended with organic materials. II. Effect of farmyard manure on ammonification, nitrification, denitrification and N₂ fixation at different levels of soil moisture. *Soil Sci. Plant Nutr.* 38: 63-73.
- Gong, Y., J. Hodgson, M.G. Lambert e I.L. Gordon. 1996. Short term ingestive behavior of sheep and goats grazing grasses and legumes, I. Comparison of bite weight, bite rate and bite dimensions for forages at two stages of maturity. *N.Z. J. Agric. Res.* 39: 63-73.
- Hardarson, G. 1993. Methods for enhancing symbiotic nitrogen fixation. *Plant Soil* 152: 1-17.
- Jiménez, A. y P.A. Martínez. 1985. Utilización de praderas. Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Kishinevski, B.D., Y. Leshem, Y. Friedman y G. Krivatz. 1992. Yield and nitrogen fixation of berseem clover as a potential winter forage crop under semiarid conditions. *Arid Soil Res. Rehabilitation* 6: 261-270.
- Ledgard, S.F. y K.W. Steele. 1992. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant Soil* 141: 137-153.
- Lee, K.B., V. Alimagno y T. Yoshida. 1977. Field technique using the acetylene reduction method to assay nitrogenase activity and its association with rice rhizosphere. *Plant Soil* 47: 519-526.
- Matches, A.G. 1989. A survey of legume production and persistence in United States. pp. 37-44. *In*: Marten, G.C., A.G. Matches, R.F. Barnes, R.W. Brougham, R.J. Clements y G.W. Sheats (eds.). *Persistence of forage legumes*. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15: 1409-1416.
- Ofofu-Budu, K.G., S. Ogata y K. Fujita. 1992. Temperature effects on root nodule activity and nitrogen release in some subtropical and temperate legumes. *Soil Sci. Plant Nutr.* 38: 717-726.
- Olsen, S.R. y L.A. Dean. 1965. Phosphorus. pp. 1035-1049 *In*: Black, C.A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part II*. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Peoples, M.B., D.M. Lilley, V.F. Burnett, A.M. Ridley y D.L. Garden. 1995. Effects of surface application of lime and superphosphate to acid soils on growth and N₂ fixation by subterranean clover in mixed swards. *Soil Biol. Biochem.* 27: 663-671.
- Pochon, J. y P. Tardoux. 1962. *Techniques d'analyse en microbiologie du sol*. Editions de la Tourelle. Saint Mandé, France.
- Rennie, R.J. 1981. A single medium for the isolation of acetylene reducing (dinitrogen fixing) bacteria from soils. *Can. J. Microbiol.* 27: 8-14.
- Sandford, P., J.S. Pate, M.J. Unkovich y A.N. Thompson. 1995. Nitrogen fixation in grazed and ungrazed subterranean clover pasture in South West Australia assessed by the 15N natural abundance technique. *Austr. J. Agric. Res.* 46: 1427-1443.

- SAS Institute Inc. 1996. SAS/STAT Guide for Personal Computers. Cary, NC.
- Saunders, M.H. 1984. Mineral composition of soil and pasture from areas of grazed paddocks, affected and unaffected by dung and urine. *N.Z. J. Agric. Res.* 27: 405-412.
- Unkovich, M., P. Sandford, J. Pate y M. Hyder. 1998. Effects of grazing on plant and soil nitrogen relations of pasture crop rotations. *Austr. J. Agric. Res.* 49: 475-485.
- Wheeler, D.M., D.C. Edmeades y J.D. Morton. 1997. Effect of lime on yield, N fixation and plant N uptake from the soil by pasture on 3 contrasting trials in New Zealand. *N.Z. J. Agric. Res.* 40: 397-408.
- Wiche, W. y G. Hoflich. 1995. Survival of plant growth promoting rhizosphere bacteria in the rhizosphere of different crops and migration to non-inoculated plants under field conditions in North East Germany. *Microbiol. Res.* 150: 201-206.

INHIBICIÓN DE *Fusarium oxysporum* POR CEPAS MUTANTES DE *Pseudomonas fluorescens* ZUM80 INCAPACES DE PRODUCIR SIDERÓFOROS

Fusarium oxysporum Inhibition by ZUM80 *Pseudomonas fluorescens* Mutant Strains Unable to Produce Siderophores

Eduardo Valencia-Cantero¹, Javier Villegas-Moreno¹, Juan Manuel Sánchez-Yáñez¹,
Juan José Peña-Cabriales² y Rodolfo Farías-Rodríguez^{1†}

RESUMEN

Pseudomonas fluorescens, cepa ZUM80, es una bacteria productora de sideróforos que inhibe el crecimiento de microorganismos fitopatógenos en condiciones de escasez de hierro. Con el fin de entender el mecanismo de inhibición de la cepa ZUM80 sobre *Fusarium oxysporum*, se obtuvieron mutantes incapaces de sintetizar sideróforos, por medio de la exposición de *P. fluorescens* ZUM80 a nitrosoguanidina. Ensayos de antibiosis en condiciones de escasez de hierro, mostraron que, cuando se inoculó el hongo fitopatógeno con la cepa ZUM80 o con las cepas mutantes Sid⁻ con al menos 48 h de anticipación, la inhibición de éste fue total. Sin embargo, cuando el hongo se inoculó con 48 h de antelación a las bacterias, únicamente fue inhibido por la cepa ZUM80. En condiciones de suficiencia de hierro, la cepa parental ZUM80 perdió su capacidad para inhibir al hongo, no así las cepas mutantes Sid⁻. Los resultados sugieren la existencia de un metabolito difusivo, distinto de los sideróforos, cuya síntesis es regulada por hierro y que es capaz de inhibir a *F. oxysporum*.

Palabras clave: biocontrol, escasez de hierro.

SUMMARY

Pseudomonas fluorescens strain ZUM80 is a siderophore-producing bacteria which inhibits the growth of phytopathogen microorganisms in limited

¹ Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edificio B-1, 58030 Ciudad Universitaria Morelia, Michoacán, México.

[†] Autor responsable: rfarias@zeus.ccu.umich.mx

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Unidad Irapuato. 36500 Irapuato, Guanajuato, México.

Recibido: Diciembre de 2002. Aceptado: Septiembre de 2004.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 23: 81-88.

iron conditions. To understand the mechanism of *Fusarium oxysporum* inhibition by the *P. fluorescens* ZUM80 strain, siderophore-negative mutant strains were obtained by exposition of *P. fluorescens* to nitrosoguanidine. Antibiosis assays in limited iron conditions showed that when *F. oxysporum* was inoculated with ZUM80 or derived mutant strains at least 48 h before, inhibition of the fungus was total. Nevertheless, when the fungus was inoculated 48 h before the bacteria, only the ZUM80 strain was able to inhibit the fungus. Under non-limited iron conditions, the ZUM80 strain did not inhibit *F. oxysporum*, but its siderophore-negative mutants did. The results suggest the existence of a diffusible metabolite different from siderophores, whose synthesis is regulated by iron and is capable of inhibiting the growth of *F. oxysporum*.

Index words: biocontrol, limited iron.

INTRODUCCIÓN

La bacteria *Pseudomonas fluorescens* participa en el control biológico de fitopatógenos de cultivos agrícolas. *P. fluorescens* es un habitante común de la rizosfera (Keel *et al.*, 1996), se caracteriza por producir pigmentos amarillo verdosos que fluorescen bajo luz ultravioleta y que funcionan como sideróforos (Budzikiewicz, 1993). Estos compuestos se producen en condiciones de escasez o en ausencia de hierro, actúan como quelantes de este elemento y sirven en un sistema de transporte de hierro de alta afinidad hacia el interior de la célula bacteriana (Neilands, 1981). No obstante que el mecanismo mediante el cual *P. fluorescens* ejerce el control biológico sobre hongos fitopatógenos no está completamente entendido; la capacidad de *Pseudomonas* para ejercer este control biológico ha sido documentada. Los mecanismos propuestos son: i) la producción de sideróforos que, al secuestrar el hierro, quedaría no disponible para los fitopatógenos (Klopper *et al.*, 1980; Buysens *et al.*, 1996), y

ii) la producción de distintos antibióticos, como el 2,4-diacetilfluoroglucinol, la pyoluteorina, la pyrrolnitrina (Duffy y Défago, 1999) y el ácido fenazin-1-carboxílico (Raaijmakers *et al.*, 1997) que son capaces de suprimir el crecimiento de hongos patógenos en cultivos agrícolas (Girlanda *et al.*, 2001; McSpadden y Weller, 2001). Ambos mecanismos también incrementan la capacidad de *Pseudomonas* para competir exitosamente en la rizosfera (Mirleau *et al.*, 2001; Landa *et al.*, 2002).

No obstante que el control biológico es la mejor estrategia ambiental para reducir las pérdidas en la producción causadas por fitopatógenos, el desconocimiento de los mecanismos que intervienen en el control biológico y la regulación de éstos han impedido, hasta la fecha, el desarrollo de una tecnología que permita su aplicación comercial (Walsh *et al.*, 2001).

En el desarrollo de esta misma línea de investigación, se aisló la cepa ZUM80 de *P. fluorescens* de la rizosfera de papa procedente de un cultivo agrícola. Esta cepa ha mostrado tener capacidad para producir sideróforos y de suprimir el crecimiento de *Erwinia carotovora* y *Pseudomonas solanacearum*, tanto *in vitro* (Fariás-Rodríguez *et al.*, 1998a), como *in vivo* (Fariás-Rodríguez *et al.*, 1998b). Con la intención de ahondar en el conocimiento de los mecanismos de supresión de fitopatógenos por *P. fluorescens*, en este trabajo se muestra la actividad inhibitoria de bacterias mutantes en la síntesis de sideróforos sobre el patógeno de papa *Fusarium oxysporum*, utilizando como variables al tiempo de pre-exposición, de la bacteria con el hongo, en cultivo *in vitro*, y la ausencia y presencia de hierro en el medio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Microorganismos

La cepa *Pseudomonas fluorescens* ZUM80 se obtuvo de la colección del Departamento de Ecología Microbiana del Instituto de Investigaciones Químico Biológicas (IIQB) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) (Fariás-Rodríguez *et al.*, 1998a). Las cepas mutantes ZUM80Sid se obtuvieron en este trabajo (Cuadro I). *Fusarium oxysporum* fue donado por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias (INIFAP).

Medios y Condiciones de Cultivo

La *P. fluorescens* ZUM80 y *F. oxysporum* se cultivaron rutinariamente en Agar Flo (BK). El medio B de King (BK) líquido (King *et al.*, 1954) contiene (g L^{-1}): peptona de caseína, 20.00; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.50; K_2HPO_4 , 1.00; y glicerol, 1.00 mL y se ajustó a un pH de 7.2. El medio BK, enriquecido con Fe (BKFe), se preparó adicionando 0.027 g L^{-1} de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ al medio BK para alcanzar una concentración final de Fe de $100 \mu\text{M}$ y, posteriormente, se ajustó el pH a 7.2.

El medio sintético (SM) (Elad y Baker, 1985) contiene (g L^{-1}): sacarosa, 20.00; L-asparagina monohidratada, 2.00; $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ a pH de 7.0.

El medio CAS (Schwyn y Neilands, 1987) contiene (g L^{-1}): cromo azurol S (CAS), 0.06; solución de FeIII ($1 \text{ mM FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 10 mM HCl), 10 mL; bromuro de hexadeciltrimetilamonio (HDTMA), 0.07; Agar Flo, 37.00; glicerol, 10 mL; Piperazine-N-N'-bis-[2 ácido etanolsulfónico] (Pipes), 30.24, a un pH de 6.8.

Todos los cultivos se incubaron a 30°C .

Obtención de Cepas Mutantes Sid

La cepa parental *P. fluorescens* ZUM80 fue mutada por exposición a N-metil-N-Nitro-N-nitrosoguanidina (NG) como describió Miller (1972) con algunas modificaciones. Se cultivó a la cepa ZUM80 en tubos de 15 mL de volumen con 9 mL de medio BK líquido, en agitación a 200 rpm durante 12 h. Los cultivos se centrifugaron a 10 000 rpm durante 10 min, obteniéndose el paquete celular y eliminando el medio de cultivo. El paquete celular se resuspendió por separado en 4 mL de amortiguador de citrato (pH 5.5) y centrifugado (lavado) en cuatro ocasiones. En la cuarta resuspensión, a uno de los tubos se le agregó una solución de NG (1 mg mL^{-1}) hasta alcanzar una concentración final de $100 \mu\text{g mL}^{-1}$, mientras que, a un tubo control, se le agregó el mismo volumen de amortiguador. Ambas suspensiones se incubaron durante 30 min, se centrifugaron y los paquetes celulares se lavaron en 5 mL de amortiguador de fosfato (pH 7) para ser después resuspendidos en 4.5 mL de medio BK líquido e incubados durante 8 h en agitación a 200 rpm.

Se obtuvieron colonias bacterianas aisladas, realizando diluciones decimales sucesivas de los

cultivos, que se plaquearon en cajas de Petri con medio BK y se incubaron por 24 h. Se obtuvieron densidades celulares ($3.6 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$) que estuvieron en el mismo orden de magnitud de las obtenidas en el tratamiento control no expuesto al mutágeno ($8.3 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$). Cada colonia aislada se incubó en un tubo de 15 mL con 3 mL de medio SM con agitación a 200 rpm durante 48 h para inducir la producción de sideróforos y se seleccionaron a las bacterias aisladas (un total de 178) que fueron negativas en la producción de un pigmento amarillo-verdoso característico de los sideróforos. Para corroborar el fenotipo Sid⁻, las bacterias seleccionadas se cultivaron en placas de BK durante 48 h para inducir la producción de sideróforos y, posteriormente, se examinaron bajo luz ultravioleta en busca de fluorescencia. Se seleccionó a las bacterias aisladas que no mostraron fluorescencia (un total de 164).

Se calculó la velocidad de crecimiento de cada una de las bacterias seleccionadas y de las bacterias silvestres provenientes del tratamiento control, mediante la medición de la absorbancia inicial y final a una longitud de onda de 590 nm, de un cultivo bacteriano realizado en un tubo de 15 mL con 3 mL de medio de cultivo BK líquido incubado en agitación durante 8 h a 200 rpm. La velocidad de crecimiento de las bacterias aisladas se empleó como un criterio para seleccionar clones sin daños metabólicos que comprometan su crecimiento normal, de esta forma se seleccionaron 17 clones con velocidades de crecimiento dentro de una variación de $\pm 5\%$ de la velocidad de crecimiento de la cepa silvestre ZUM80 (0.48 h^{-1}).

Se determinó el antibiograma de las 17 bacterias aisladas que tuvieron una velocidad de crecimiento similar a la cepa silvestre. Se esparcieron 200 μL de un cultivo con 8 h de incubación, sobre cajas Petri con medio BK, sobre las cuales se colocó también un disco de 7 mm de diámetro (bigaux Diagnostica) con alguno de los siguientes antibióticos: estreptomina (10 μg), ampicilina (10 μg), cloranfenicol (30 μg), tetraciclina (30 μg), rifampicina (5 μg), eritromicina (15 μg), gentamicina (10 μg), lincomicina (2 μg), kanamicina (30 μg), bacitrina (0.04 U), ácido nalidixico (30 μg) y penicilina (10 U). Cada antibiograma se hizo por triplicado. Las cajas se incubaron por 24 h. Después de la incubación, se observó la presencia o ausencia de halos de inhibición de crecimiento en torno a cada disco.

Las colonias aisladas más parecidas a la cepa parental, utilizando la velocidad de crecimiento y el

perfil de antibiogramas como indicadores de semejanza, se inocularon en cajas Petri con medio CAS (Schwyn y Neilands, 1987) y se incubaron durante cinco días. Las bacterias que no mostraron producción de sideróforos se seleccionaron y se consideraron como cepas mutantes Sid⁻.

Ensayos de Antibiosis *In Vitro*

Se efectuaron dos experimentos de antagonismo *in vitro* entre la cepa silvestre ZUM80 y cuatro cepas mutantes Sid⁻ (ZUM8011Sid⁻, ZUM8026Sid⁻, ZUM8078Sid⁻, ZUM80111Sid⁻) con *F. oxysporum*; uno, en ausencia de hierro (medio BK) y, otro, en presencia de hierro (medio BKFe). Los experimentos se realizaron de la forma que describieron Filippi *et al.* (1984) con algunas modificaciones. Tres cajas de Petri se inocularon en forma de cruz, con cada una de las cepas (por separado); en el centro de cada uno de los cuadrantes formados por la cruz de bacterias, se retiró una porción circular de medio de 4 mm de diámetro y se sustituyó por una porción de la misma medida de un cultivo de *F. oxysporum* realizado previamente.

Posteriormente, las bacterias se incubaron por 72, 48, 24 ó cero horas de antelación a la siembra de *F. oxysporum* en la misma caja; o bien, después de 24, 48 ó 72 h de que *F. oxysporum* se sembrara en la caja Petri. Las cajas Petri se incubaron 96 h y, posteriormente, se midió el diámetro mayor de cada una de las colonias de *F. oxysporum*. Cada tratamiento se realizó por triplicado.

Simultáneamente a estos experimentos, se hicieron tratamientos control donde sólo se sembró a *F. oxysporum* que, al cabo de 96 h de inoculado, colonizó por completo la superficie de la caja Petri. En este tiempo, cada una de las colonias inoculadas experimentó un crecimiento mayor que 41 mm de diámetro.

Tratamiento Estadístico

Se utilizó una caja Petri como unidad experimental. El promedio del incremento en el diámetro de las cuatro colonias de *F. oxysporum* inoculadas en una caja Petri, se utilizó como medida del crecimiento de *F. oxysporum* en dicha caja. Los datos se analizaron conforme a un diseño experimental de dos factores, considerando al tiempo de antelación en la inoculación de las bacterias como una fuente de variación y a la cepa bacteriana

utilizada, como una segunda fuente de variación. Se realizó una comparación de medias utilizando la prueba de Duncan con un α de 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Perfil de Antibiosis de las Cepas Mutantes

Se obtuvieron 17 cepas derivadas de la cepa ZUM80, incapaces de producir sideróforos en los medios BK y SM, pero con una velocidad de crecimiento similar a la cepa parental. Se realizó un perfil de antibiosis de estas 17 bacterias (Cuadro 1) pudiéndose establecer grupos de similitud de antibiosis. Ninguna de las bacterias mutantes mostraron un perfil de antibiosis igual al de ZUM80. En este sentido, se observó que todas las cepas mutantes obtenidas, contrastando con la cepa parental, fueron sensibles a cloranfenicol y se seleccionaron las cepas del grupo de antibiosis "B" (Cuadro 1). No se realizaron experimentos encaminados a explicar la relación entre sensibilidad a cloranfenicol y deficiencia en producción de sideróforos, quedando como una proposición que la actividad de los sideróforos, o más probablemente el hierro, es necesaria en algún paso del mecanismo de resistencia a dicho antibiótico. Tal proposición está en concordancia con las observaciones de Leiter *et al.* (1999), quienes mostraron que el cloranfenicol altera el metabolismo del hierro en mitocondrias, organelos de origen bacteriano.

Las 12 cepas del grupo B se cultivaron en el medio CAS, corroborándose que ninguna de ellas producía sideróforos. El empleo de tres distintos métodos de detección de estos compuestos, entre ellos el ensayo de CAS (Schwyn y Neilands, 1987),

conocido como ensayo universal para la detección de sideróforos, permitió establecer y confirmar rigurosamente el fenotipo Sid⁻ de al menos 12 cepas. De estas bacterias se seleccionaron aleatoriamente a las cepas ZUM8011Sid⁻, ZUM8026Sid⁻, ZUM8078Sid⁻, ZUM80111Sid⁻ para realizar ensayos de antibiosis *in vitro* contra *F. oxysporum*.

Ensayos de Antibiosis

En los ensayos de antibiosis, realizados en ausencia de hierro (medio BK), tanto la cepa parental ZUM80, como las cuatro cepas mutantes Sid⁻, inhibieron el crecimiento de *F. oxysporum*, en forma directamente relacionada con el tiempo de ventaja que tuvieron para establecerse en la caja Petri antes que el hongo. En todos los casos, cuando las bacterias se sembraron 72 ó 48 h antes que el hongo, la inhibición sobre éste fue prácticamente total (Cuadro 2). En promedio de todos los tratamientos, la inhibición se redujo 7% cuando las bacterias se inocularon con sólo 24 h de ventaja sobre el hongo, 36% cuando las bacterias y el hongo se sembraron simultáneamente y se redujo hasta 70% cuando las bacterias se sembraron 24 h después que el hongo. Cuando se sembró al hongo con 72 h de ventaja respecto a las bacterias, no se registró ninguna inhibición, observándose un crecimiento de *F. oxysporum* similar al de los tratamientos control sólo inoculados con el hongo. La relación entre porcentaje de inhibición ejercido sobre *F. oxysporum* y el tiempo de antelación con que se sembraron las bacterias en cada ensayo, puede apreciarse en el coeficiente de determinación de 0.94 que existe entre la inhibición y el tiempo de ventaja bacteriana (Figura 1).

Cuadro 1. Antiobiogramas de las cepas mutantes Sid⁻.

Grupo	Cepa	Antibiótico [†]											
		Es	Am	Cl	Tc	Rf	E	Ge	Li	Ka	A	Nd	Pc
A	ZUM80 (parental)	-	+	+	-	-	+/-	-	+	-	+	-	+
B [‡]		-	+	-	-	-	+/-	-	+	-	+	-	+
C	ZUM80221Sid ⁻ , ZUM80236Sid ⁻	-	-	-	-	-	+/-	-	+	-	+	-	+
D	ZUM80223Sid ⁻	-	+/-	-	-	-	+/-	-	+	-	+	-	+/-
E	ZUM8025Sid ⁻	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+
F	ZUM8024Sid ⁻	-	-	-	-	-	+/-	-	+	-	+	-	-

[†] Es: estreptomina 10 µg; Am: ampicilina 10 µg; Cl: cloranfenicol 30µg; Tc: tetraciclina 30 µg; Rf: rifampicina 5 µg; E: eritomicina 15 µg; Ge: gentamicina 10 µg; Li: licomicina 2 µg; Ka: kanamicina 30 µg; A: bacitracina 0.04 U; Nd: ac. nalidixico 30 µg; Pc: penicilina 10 U.

[‡] El Grupo de antibiosis B estuvo integrado por las cepas ZUM8011Sid⁻, ZUM8026Sid⁻, ZUM8036Sid⁻, ZUM8053Sid⁻, ZUM8078Sid⁻, ZUM80111Sid⁻, ZUM80122Sid⁻, ZUM80176Sid⁻, ZUM80184Sid⁻, ZUM80188Sid⁻, ZUM80225Sid⁻ y ZUM80231Sid⁻.

Cuadro 2. Inhibición del crecimiento de *Fusarium oxysporum* en medio carente de hierro¹ por cepas de *Pseudomonas fluorescens* ZUM80 o sus mutantes negativas en la síntesis de sideróforos.

Cepa bacteriana	Porcentaje de inhibición ¹							Inhibición ⁴ por el factor "cepa bacteriana"
	Ventaja de la cepa bacteriana sobre <i>F. oxysporum</i> para colonizar el medio de cultivo (h)							
	-72 ⁵	-48	-24	0	24	48	72	
ZUM80	0±0 ⁶	34±1	61±2	53±6	63±16	100±0	100±0	62 a
ZUM8011Sid ⁻	0±0	0±0	46±8	73±13	100±0	90±14	100±0	55 b
ZUM8026Sid ⁻	0±0	0±0	34±10	68±8	95±8	100±0	100±0	56 b
ZUM8078Sid ⁻	0±0	0±0	17±0	56±15	93±8	100±0	100±0	52 b
ZUM80111Sid ⁻	0±0	0±0	17±2	68±5	93±6	100±0	100±0	54 b
Inhibición ¹¹ por el "factor tiempo"	0 a	7 b	30 c	64 d	93 e	98 f	100 f	

¹ Medio de cultivo BK. ¹ El porcentaje de inhibición se calculó respecto al crecimiento de las colonias de *F. oxysporum* en los cultivos control sin bacterias. % inhibición = 100 - (crecimiento x 100/crecimiento control). ⁵ Los signos negativos indican tiempo de ventaja negativa, es decir, tiempo de desventaja bacteriana. ⁴ El análisis estadístico señala con letras distintas diferencias significativas a un α de 0.05, utilizando el factor cepa bacteriana como única fuente de variación. ⁶ Desviación estándar. ¹¹ El análisis estadístico señala con letras distintas diferencias significativas a un α de 0.05, utilizando el factor tiempo como única fuente de variación.

Tanto la cepa parental ZUM80, como las cuatro cepas mutantes Sid⁻, inhibieron el crecimiento de *F. oxysporum*. La cepa ZUM80 ejerció, en promedio, una inhibición del crecimiento de *F. oxysporum* de 62%, que fue significativamente mayor que 55% de inhibición ejercida por las cepas mutantes Sid⁻ en su conjunto. Dicha diferencia se observó principalmente cuando las bacterias se sembraron 48 h después de *F. oxysporum*, tratamiento en el cual ZUM80 detuvo el crecimiento del hongo, mientras que las cepas Sid⁻ no lo hicieron (Cuadro 2). El hecho de que las

mutantes Sid⁻ hayan inhibido el crecimiento de *F. oxysporum* muestra la existencia de un mecanismo alterno de inhibición que actúa de forma independiente de los sideróforos. En el caso de la cepa silvestre ZUM80, este mecanismo alterno actúa en paralelo con los sideróforos (esto es observado como una mayor inhibición al ser sembrada con una desventaja de 24 ó 48 h).

Las colonias de *F. oxysporum*, al ser sembradas, no entraron en contacto físico con las bacterias. Lo anterior sugiere la existencia de algún metabolito diferente de los sideróforos que requirió tiempo para ser producido y para difundirse en el medio (Bagnasco et al., 1998). La inhibición de hongos fitopatógenos por la producción de antibióticos difusivos ya se estableció para la cepa CHA0 de *P. fluorescens* (Laville et al., 1992; Schnider et al., 1995), también se demostró que *Stenotrophomonas maltophilia* cepa W81 es capaz de suprimir *Pythium ultimum* mediante la producción de enzimas proteolíticas extracelulares difusivas (Dunne et al., 2000).

Por el contrario, las colonias de *F. oxysporum*, sembradas con tiempo de ventaja respecto a las bacterias, mostraron una ligera inhibición o no se inhibieron, señalando la importancia del establecimiento temprano de las cepas bacterianas en el medio para la producción de sus metabolitos. Los resultados están en concordancia con Kraus y Loper (1992), quienes enfatizaron que, para que un metabolito proteja a una planta de una infección fúngica, éste debe estar presente *in situ* en las concentraciones adecuadas. El requerimiento para el establecimiento temprano de *Pseudomonas* en el

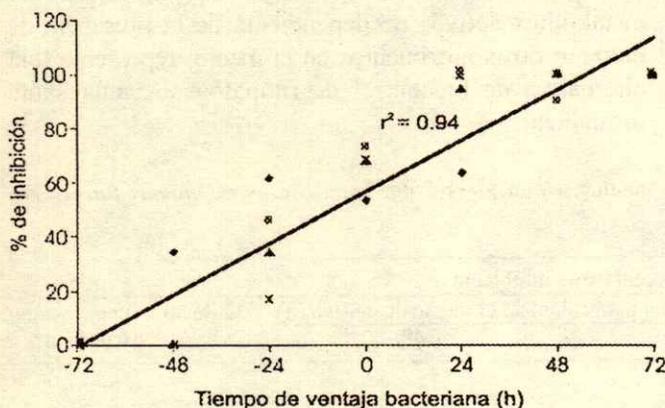


Figura 1. Relación entre la inhibición ejercida por las cepas ZUM80 \diamond , ZUM8011Sid⁻ \circ , ZUM8026Sid⁻ \blacktriangle , ZUM8078Sid⁻ $*$ y ZUM80111Sid⁻ \times sobre *Fusarium oxysporum* y el tiempo de antelación con que se inoculó a las bacterias en la caja Petri con respecto al hongo. El valor de r^2 representa el coeficiente de determinación general entre el tiempo de ventaja de las bacterias sobre el hongo y el porcentaje de inhibición ejercido por las bacterias sobre el hongo calculado según la fórmula:

% inhibición = 100 - (Crecimiento x 100 / Crecimiento control).

sistema planta-microorganismos debe ser considerado como posible estrategia de control biológico.

Un comportamiento distinto se observó cuando los microorganismos se confrontaron en el medio rico en hierro insoluble BKFe. En este medio, todas las cepas mutantes produjeron la inhibición total del hongo cuando se inocularon con al menos 24 h de ventaja (Cuadro 3), y una inhibición de aproximadamente 60% sobre el crecimiento fúngico, cuando se inocularon simultáneamente con el hongo. Contrariamente, la cepa parental ZUM80 no ejerció una inhibición estadísticamente significativa sobre el hongo.

En el tiempo en que duraron los ensayos del presente trabajo, en ningún tratamiento, *F. oxysporum* presentó formación de clamidosporas, ni aun en los tratamientos control, donde sólo crecía el hongo, por lo que no se determina el efecto de las bacterias en la esporulación.

Los resultados del presente trabajo contrastan con los de Bagnasco *et al.* (1998) quienes encontraron que las cepas silvestres *P. fluorescens* UP61, UP143 y UP148, capaces de producir sideróforos, fueron capaces también de inhibir *in vitro* a *P. ultimum* o *Rhizoctonia solani* aun en medios con 100 µM de hierro férrico, sin que se hubiese detectado producción de sideróforos en tal condición. Con base en estos resultados, Bagnasco *et al.* (1998) señalaron que el factor de inhibición de sus cepas no está regulado por el hierro.

En condiciones de abundancia de hierro férrico de baja solubilidad, podría esperarse que la cepa silvestre

ZUM80 no estuviera en estrés por hierro en virtud de que su sistema de obtención de hierro de alta afinidad se mantuvo intacto y sólo los niveles basales de sideróforos producidos (Venturi *et al.*, 1995) fueron suficientes para la obtención de hierro, no así en el caso de las cepas mutantes ZUM8011Sid⁻, ZUM8026Sid⁻, ZUM8078Sid⁻ y ZUM80111Sid⁻, ya que éstas tienen su sistema de obtención de hierro atrofiado. El hecho de que la adición de Fe al medio de cultivo haya afectado significativamente la inhibición causada por la cepa silvestre ZUM80, pero no la inhibición causada por las mutantes Sid⁻, sugiere que el factor de inhibición sobre *F. oxysporum* producido por las cepas mutantes, si es regulado por el hierro disponible en la célula bacteriana de la cepa ZUM80.

Por otro lado, la capacidad de supresión de un agente de biocontrol rizosférico como *P. fluorescens*, depende no sólo de su establecimiento y permanencia en el ambiente, sino también de que el ejercicio de esta capacidad de supresión se realice en las condiciones ambientales que se presentan en la rizosfera. En este sentido, Duffy y Defago (1999) mostraron que diversos factores ambientales presentes en la rizosfera reprimen la síntesis del antifúngico 2,4-diacetylphloroglucinol en la cepa CHA0 de *P. fluorescens*. Con el entendimiento de los mecanismos de acción de *P. fluorescens*, la utilización de cepas mutantes con una capacidad de síntesis de metabolitos activos no dependiente de la presencia de hierro u otros nutrimentos en el medio, representa una alternativa de biocontrol de fitopatógenos interesante de analizar.

Cuadro 3. Inhibición del crecimiento de *Fusarium oxysporum* en medio rico en hierro[†] por cepas de *Pseudomonas fluorescens* ZUM80 o sus mutantes negativas en la síntesis de sideróforos.

Cepa bacteriana	Porcentaje de inhibición [‡]			Inhibición [§] por el factor "cepa" bacteriana
	Ventaja de la cepa bacteriana sobre <i>F. oxysporum</i> para colonizar el medio de cultivo (h)			
	0	24	48	
ZUM80	0 ± 0 [¶]	11 ± 20	14 ± 24	8 b
ZUM8011Sid ⁻	56 ± 18	100 ± 0	100 ± 0	85 a
ZUM8026Sid ⁻	54 ± 7	100 ± 0	100 ± 0	85 a
ZUM8078Sid ⁻	65 ± 5	100 ± 0	100 ± 0	88 a
ZUM80111Sid ⁻	34 ± 20	100 ± 0	100 ± 0	78 a
Inhibición [#] por el "factor tiempo"	42 b	82 a	82 a	

[†] Medio de cultivo BKFe. [‡] El porcentaje de inhibición se calculó respecto al crecimiento de las colonias de *F. oxysporum* en los cultivos control sin bacterias. % inhibición = 100 - (Crecimiento x 100 / Crecimiento control). [§] El análisis estadístico señala con letras distintas diferencias significativas a un α de 0.05 utilizando el factor cepa bacteriana como única fuente de variación. [¶] Desviación estándar. [#] El análisis estadístico señala con letras distintas diferencias significativas a un α de 0.05 utilizando el factor tiempo como única fuente de variación.

CONCLUSIONES

- Los sideróforos participan en el efecto inhibitorio de *Pseudomonas fluorescens* cepa ZUM80 sobre *Fusarium oxysporum*.
- Existe un metabolito difusivo, distinto de los sideróforos, cuya síntesis es regulada por hierro y que es capaz de inhibir por sí solo a *F. oxysporum*.
- La presencia de hierro en el medio afecta grandemente a la capacidad de *P. fluorescens* cepa ZUM80 para inhibir a *F. oxysporum*.
- El tiempo de pre-exposición de la bacteria con el hongo es un factor fundamental para que la inhibición del hongo se lleve a cabo.
- La utilización de bacterias mutantes, afectadas en la regulación de sus metabolitos con actividad antifúngica, puede tener un mayor potencial para ejercer el control biológico de hongos que la utilización de las cepas parentales silvestres.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por autorizar la publicación de este artículo. Agradecemos al Dr. Gustavo Hernández-Guzmán y al M.C. José Antonio Vera-Núñez por la revisión crítica que hicieron a este documento.

LITERATURA CITADA

- Bagnasco, P., L. De la Fuente, G. Gualtieri, F. Noya y A. Arias. 1998. Fluorescent *Pseudomonas* as biocontrol agents against forage legume root pathogenic fungi. *Soil Biol. Biochem.* 30: 1317-1322.
- Budzikiewicz, H. 1993. Secondary metabolites from fluorescent *Pseudomonas*. *FEMS Microbiol. Rev.* 104: 209-228.
- Buysens, S., K. Heungens, J. Poppe y M. Hofte. 1996. Involvement of pyochelin and pyoverdine in suppression of *Pythium*-induced damping-off of tomato by *Pseudomonas aeruginosa* TNSK2. *Appl. Environ. Microbiol.* 62: 865-871.
- Duffy, B.K. y G. Défago. 1999. Environmental factors modulating antibiotic and siderophore biosynthesis by *Pseudomonas fluorescens* biocontrol strains. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 2429-2438.
- Dunne, C., Y. Moënne-Loccoz, F.J. de Bruijn y F. O'Gara. 2000. Overproduction of an inducible extra cellular serine protease improves biological control of *Pythium ultimum* by *Stenotrophomonas maltophilia* strain W81. *Microbiology* 146: 2069-2078.
- Elad, Y. y R. Baker. 1985. Influence of trace amounts of cations and siderophores-producing Pseudomonads on clamidospore germination of *Fusarium oxysporum*. *Phytopathology* 75: 1047-1052.
- Fariás-Rodríguez, R., R. Godínez, E. Zamora y J.J. Peña-Cabriales. 1998a. *Pseudomonas* fluorescentes como agentes de control de bacterias patógenas de plantas. I. Selección de cepas de *Pseudomonas* productoras de sideróforos. *Terra* 15: 383-389.
- Fariás-Rodríguez, R., E. Zamora y J.J. Peña-Cabriales. 1998b. *Pseudomonas* fluorescentes como agentes de control de bacterias patógenas de plantas. II. Inoculación en planta. *Terra* 15: 391-396.
- Filippi, C., G. Bagnoli, G. Treggi y G. Picci. 1984. Antagonistic effects of soil bacteria on *Fusarium oxysporum* Schlecht f.sp. *dianthii* (Prill and Del.) Snyd. and Hans. I. *In vitro* experiments and preliminary assays on Carnation (*Dianthus caryophyllus* L.). *Plant Soil* 80: 119-125.
- Girlanda, M., S. Perotto, Y. Moënne-Loccoz, R. Bergero, A. Lazzari, G. Defago, P. Bonfante y A.M. Luppi. 2001. Impact of biocontrol *Pseudomonas fluorescens* CHA0 and a genetically modified derivative on the diversity of culturable fungi in the cucumber rhizosphere. *Appl. Environ. Microbiol.* 67: 1851-1864.
- Keel, C., D.M. Sëller, A. Natsch, G. Défago, R.J. Cook y L.S. Thomashow. 1996. Conservation of the 2,4-Diacetylphloroglucinol biosynthesis locus among fluorescent *Pseudomonas* strain for diverse geographic locations. *Appl. Environ. Microbiol.* 62: 552-563.
- King, E., M. Ward y D. Raney. 1954. Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescein. *J. Lab. Clinical Medicine* 44: 301-307.
- Klopper, J.W., J. Leong, M. Teintze y M.N. Schroth. 1980. *Pseudomonas* siderophores: A mechanism explaining disease-suppressive soils. *Current Microbiol.* 4: 317-320.
- Kraus, J. y J.E. Loper. 1992. Lack of evidence for a role of antifungal metabolite production by *Pseudomonas fluorescens* Pf-5 in biological control of *Pythium* Damping-Off of cucumber. *Phytopatology* 82: 264-271.
- Landa, B., O.V. Mavrodi, J.M. Raaijmakers, B.B. McSpadden, L.S. Thomashow y D.M. Weller. 2002. Differential ability of genotypes of 2,4-diacetylphloroglucinol-producing *Pseudomonas fluorescens* strains to colonize the roots of pea plants. *Appl. Environ. Microbiol.* 68: 3226-3237.
- Laville, J., C. Voisard, C. Keel, M. Maurhofer, G. Defago y D. Haas. 1992. Global control in *Pseudomonas fluorescens* mediating antibiotic synthesis and suppression of black root rot of tobacco. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 89: 1562-1566.
- Leiter, L.M., H.S. Thatté, C. Okafor, P.W. Marks, D.E. Golan y K.R. Bridges. 1999. Chloramphenicol-induced mitochondrial dysfunction is associated with decreased transferrin receptor expression and ferritin synthesis in K562 cells and is unrelated to IRE-IRP interactions. *J. Cell. Physiol.* 180: 334-344.
- McSpadden, B.B. y D.M. Weller. 2001. Changes in populations of rhizosphere bacteria associated with take-all disease of wheat. *Appl. Environ. Microbiol.* 67: 4414-4424.
- Miller, H. 1972. *Experiments in molecular genetics*. Cold Spring Harbor Laboratory. New York.
- Mirleau, P., L. Philippot, T. Corberand y P. Lemanceau. 2001. Involvement of nitrate reductase and pyoverdine in competitiveness of *Pseudomonas fluorescens* strain c7r12 in soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 67: 2627-2635.
- Neilands, J. 1981. Microbial Iron compounds. *Annu. Rev. Biochem.* 50: 630-635.
- Raaijmakers, J.M., D.M. Sëller y L.S. Thomashow. 1997. Frequency of antibiotic-producing *Pseudomonas* spp. in natural environments. *Appl. Environ. Microbiol.* 63: 881-887.

Schnider, U., C. Keel, C. Blumer, J. Troxler, G. Defago y D. Haas. 1995. Amplification of the housekeeping sigma factor in *Pseudomonas fluorescens* CHA0 enhances antibiotic production and improves biocontrol abilities. *J. Bacteriol.* 177: 5387-5392.

Schwyn, B. y J. Neilands. 1987. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Anal. Chem.* 160: 47-51.

Venturi, V., P. Weisbeck y M. Koster. 1995. Gene regulation of siderophore-mediated iron acquisition in *Pseudomonas*: Not only the Fur repressor. *Mol. Microbiol.* 17: 603-610.

Walsh, U.F., J.P. Morrissey y F. O'Gara. 2001. *Pseudomonas* for biocontrol phytopatogens: From functional genomics to commercial exploitation. *Curr. Opinion Biotech.* 12: 289-295.

INFLUENCIA DEL AILE (*Alnus firmifolia*) EN EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE *Pinus patula*

Influence of *Alnus firmifolia* on the Growth of *Pinus patula* Seedlings

Berta Gutiérrez-Guzmán¹, Jorge D. Etchevers-Barra¹, Alejandro Velázquez-Martínez^{1‡} y Juan Almaraz-Suárez¹

RESUMEN

El efecto de las especies arbóreas fijadoras de nitrógeno (N) en las plantas que las rodean no ha sido suficientemente estudiado. Se investigó en invernadero la influencia del aile (*Alnus firmifolia*) en *Pinus patula*, en una maceta con tres compartimientos. Una malla separaba el compartimiento central de los laterales, evitaba el paso de raíces, pero permitía el de la solución del suelo e hifas micorrizas. Plántulas de pino y aile se establecieron en los compartimientos laterales, separadas por un compartimiento central de amortiguación. Se ensayaron dos sustratos: suelo de bosque de pino y de bosque de pino/aile. La mitad de las macetas se fumigó. Macetas con pino en ambos compartimientos se usaron como testigos. El experimento duró seis meses. Se evaluaron el peso fresco y seco de las plantas de pino y las concentraciones de N y P. En el aile se midieron actividad de la nitrogenasa, número y peso de los nódulos en las raíces y concentración de nitrógeno. En el suelo se determinó N total. El peso seco, contenido de N y diámetro del pino fueron mayores en el tratamiento pino asociado con aile y suelo no fumigado. El efecto positivo del aile se relacionó con sus nódulos fijadores de N. El P en las plantas de pino fue mayor cuando éstas crecieron en el suelo de bosque de pino no fumigado. La fumigación causó una reducción de la población de hongos micorrízicos y de otros microorganismos benéficos en el suelo. El pino se benefició de la asociación con aile. El uso de tal asociación podría reducir el impacto de las plantaciones mono-específicas de pino en los reservorios de nitrógeno en el suelo y generar un sistema forestal más sostenible.

Palabras clave: *Alnus firmifolia*, *Pinus patula*, nutrición de especies forestales.

SUMMARY

The effect of nitrogen (N) fixing trees on the surrounding plants is a not well understood phenomenon. A greenhouse experiment was carried out to study the effect of alder (*Alnus firmifolia*) on nearby red pine (*Pinus patula*) in a three-compartment pot separated by a fine plastic screen. The screen prevented roots from crossing over but allowed the passage of fungi hyphae and soil solution. Red pine seedlings were grown in the lateral compartments. The central one was a buffer zone. Two substrates were assayed: a red pine forest and a mixed red pine-alder forest soil. One-half of the pots were fumigated. Pots with red pine in both lateral compartments were used as checks. The experiment lasted six months. The fresh and dry weight of the pine, as well as N and P concentrations were measured. Number and weight of nodules, nitrogenase activity, and N percentage in alder were also determined. Total soil N was tested at the end of the experiment. Total dry weight, N content and red pine diameter were higher when the pine grew in association with alder and non-fumigated soil. The positive effect of alder on red pine was related to the N₂ fixing nodules in the former. Pine P concentration was higher when grown in monoculture and non-fumigated coniferous forest soil. Soil fumigation caused a reduction of the population of mycorrhizal fungi and other beneficial microorganisms in the soil. Red pine in association with alder benefited from the N₂ fixation of the latter species. Field plantations of mixed stands of *P. patula* and *A. firmifolia* could help to reduce the exploitation of the native soil N pool creating a more sustainable production system.

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (alejvela@colpos.mx)

INTRODUCCIÓN

El *Pinus patula* Schl. et Cham. es una de las especies forestales de gran interés comercial en México, ya que presenta tasas de crecimiento altas y elevados índices de aprovechamiento. La madurez comercial de este pino se logra en pocos años, lo que determina que los ciclos de producción sean cortos. Sin embargo, se sospecha que, por esa razón, tal sistema de producción pudiese conducir al agotamiento de las reservas nutrimentales del suelo a corto plazo, como las del nitrógeno, en particular cuando el manejo no contempla la restitución de las extracciones (Waring y Running, 1998).

Las prácticas de manejo actuales en México son intensivas y no contemplan estrategias tendientes a conservar la capacidad productiva del sitio. Los residuos que quedan después del aprovechamiento son apilados y quemados, lo que provoca la pérdida de algunos nutrimentos, como el nitrógeno, el cual se volatiliza debido a las altas temperaturas que se alcanzan durante la combustión (Waring y Schlesinger, 1985; Perry, 1994).

El *Alnus firmifolia* (aile) es una especie que, en general, se establece como vegetación pionera y tiene que ser eliminada del terreno para que el reestablecimiento de otra especie con valor comercial y manejo, sea exitosa. No obstante, si se considera que el aile es una especie que fija N_2 atmosférico, una alternativa de manejo podría ser el control inicial de la densidad de esta especie para recuperar parte del N en el suelo a través de este proceso.

Estudios acerca del beneficio que presentan las plantaciones mixtas de coníferas con aile arrojan resultados mixtos. Algunos han demostrado que en las coníferas intercaladas con aile puede establecerse un proceso de competencia entre estas especies (Funk *et al.*, 1974; Gordon y Dawson, 1979). Sin embargo, Bormann y De Bell (1981) y Binkley (1986) reportaron beneficios de esta asociación, ya que las plantas de aile mejoraron las condiciones de crecimiento de las coníferas asociadas. Zavitskoy y Newton (1968) estimaron una capacidad de fijación de N por el aile rojo de hasta $320 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en suelos deficientes de este nutrimento, lo cual pudiese ser la explicación del efecto benéfico observado.

La respuesta parece estar condicionada por el tiempo de asociación. Tarrant (1961) mostró que el crecimiento en diámetro y la altura de una plantación mixta de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco de 30 años de edad, fueron similares al

crecimiento de una plantación pura de esta especie. Pero, una evaluación hecha 15 años después en la misma plantación arrojó una diferencia significativa en volumen maderable ($159 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ vs $82 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente). En adición, la acumulación de materia orgánica y del N total del suelo, en las plantaciones mixtas, fue 31% y 938 kg ha^{-1} mayor, respectivamente (Miller y Murray, 1978).

En México, los estudios de la capacidad de fijación de N por especies de aile y su impacto en la nutrición y en el desarrollo de coníferas asociadas son limitados (Cruz-Cisneros y Valdés, 1990). Valdés (2000) revisó la simbiosis en actinorrizas estimando tasas de fijación de N anual entre 60 y $320 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El valor ecológico del aile se finca en su condición de especie primaria, que coloniza el terreno después de las operaciones de aprovechamiento forestal (corta de regeneración), ampliamente discutido por Quintana y González (1993) y Linding y Vásquez (1997).

La fijación de N por el aile, en condiciones de campo, responde a situaciones climáticas previas y del período de medición (Huss-Danell, 1999). Más recientemente, Valdés (2000) revisó la simbiosis en actinorrizas y estimó tasas de fijación de N anual entre 60 a $320 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El valor ecológico del aile se finca en su condición de especie primaria, que coloniza el terreno después de las operaciones de aprovechamiento forestal (corta de regeneración), ampliamente discutido por Quintana y González (1993) y Linding y Vásquez (1997).

El presente estudio se llevó a cabo en condiciones de invernadero para explorar el efecto del aile en el crecimiento y desarrollo de plantas de pino (*Pinus patula*), como un estudio preliminar a la fase de campo. Un segundo objetivo del estudio fue evaluar el efecto de sustratos de diferente origen y de la fumigación en el desarrollo de las plántulas de pino.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en invernadero. Se emplearon macetas especialmente diseñadas (Camel *et al.*, 1991) de 36 cm de largo (L) x 20 cm de altura (H) y 15 cm de ancho (A), divididas en tres compartimientos. El suelo del compartimiento central (6 L x 20 H x 15 A cm) se separó de los compartimientos laterales (15 L x 20 H x 15 A cm) por una malla especial (con orificios de 32 micras). Los orificios de la malla permitieron el paso de las hifas de las micorrizas y de la solución del suelo de un

compartimiento a otro, no así el paso de las raíces. La parte interior de la maceta se tapizó con plástico negro y el exterior se pintó, ambas acciones para evitar colonización de hongos. En los compartimientos laterales, se establecieron plantas de pino (*Pinus patula*) y aile (*Alnus firmifolia*), de cuatro meses de edad, ambas provenientes del vivero forestal de Temamatla, estado de México.

El empleo de este tipo de macetas permitió determinar si las plantas de pino se beneficiaban de la cercanía del aile, cuando éstas crecían físicamente separadas. La única conexión entre ellos fue el medio del suelo poroso. El compartimiento central separado por la malla de plástico evitó el paso de las raíces de un compartimiento a otro. Por lo anterior, se asumió que cualquier efecto benéfico del aile en el crecimiento de pino, se explicaría por el exudado de las raíces a través del flujo de masas que ocurre en las hifas de las micorrizas (Guzmán-Plazola *et al.*, 1992).

El diseño de tratamientos fue factorial $2 \times 2 \times 2$. Los factores y niveles considerados fueron: tipo de asociación (pino puro y pino/aile), origen del suelo (uno colectado en un bosque puro de pino y otro colectado de un bosque de pino asociado con aile) y la fumigación del suelo (fumigados con bromuro de metilo y sin fumigación). Cada tratamiento se repitió cinco veces (Cuadro 1). El suelo para este experimento se colectó de la capa de 0 a 20 cm de profundidad en la zona forestal de Zacualtipán, Hidalgo. Éste está clasificado como Feozem háplico asociado con Regosol calcario y Litosol (INEGI, 1992). Las muestras se secaron al aire, se molieron y se tamizaron a 5 mm antes de llenar las macetas. Los diversos sustratos se caracterizaron química y físicamente (Etchevers-Barra, 1988) y se presentan en el Cuadro 2.

El experimento se instaló el 13 de junio de 1997 de acuerdo con el diseño preestablecido con una planta en cada compartimiento lateral. El compartimiento central, o zona de amortiguamiento, se dejó sin plantar. Durante todo el experimento, el suelo se mantuvo a capacidad de campo con agua

destilada. Con el propósito de reducir los riesgos de deficiencias nutrimentales, se aplicó solución nutritiva libre de N (Hoagland y Arnon, 1950) diluida a un cuarto de su concentración normal junto con el riego al inicio del experimento y posteriormente cada 15 días.

Las plantas se cortaron después de seis meses de establecidas. Previamente se registró su altura y diámetro. Posterior a la cosecha, las plantas de pino se dividieron en raíz y tallo. Las raíces se sacudieron para eliminar el suelo adherido cuidando que no se perdieran raicillas. Ambos componentes se pesaron para obtener el peso fresco por planta. Las raíces se lavaron y se almacenaron en un cuarto frío, en bolsas de plástico para evitar su deshidratación antes de realizar las observaciones que se indican a continuación.

En una porción de las raíces se contaron visualmente las ectomicorrizas visibles (Grand y Harvey, 1982). Luego, todas las raíces y tallos se secaron en estufa a 70 °C por 48 h, se registró el peso seco, y se molieron y se tamizaron a través de malla 40. En este material, se analizó N total por digestión microkjeldahl y el fósforo total en un digerido hecho con $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ (2:1), colorimétricamente con amarillo de vanadomolibdato (Etchevers-Barra, 1988).

En el momento de la cosecha, también se colectaron muestras de suelo en cada uno de los compartimientos de las macetas. Éstas se secaron al aire, se molieron, se tamizaron a través de malla 50 y se analizaron para N total mediante el procedimiento kjeldahl. El contenido de N en las plantas de pino se calculó a partir de la concentración de N total y del peso seco de ambos componentes de la planta.

Las plantas de aile se cosecharon de la misma manera que las de pino. Se les midió la actividad de la nitrogenasa mediante el método de la reducción del acetileno (Hardy *et al.*, 1973) antes de secarlas en estufa. Asimismo, se contó el número de nódulos, su peso seco y el N total, como se indicó previamente. Se supuso que todos los nódulos cosechados eran del

Cuadro 1. Tratamientos experimentales.

Tipo de asociación	Suelo de bosque de pino		Suelo de bosque de pino/aile	
	Fumigado	No fumigado	Fumigado	No fumigado
Monocultivo de pino	T1	T2	T3	T4
Mezcla de pino y aile	T5	T6	T7	T8

Cuadro 2. Algunas propiedades químicas y físicas de los sustratos utilizados en el experimento.

Variable	Origen del suelo	
	Asociación pino/aile	Monocultivo de pino
Materia orgánica (%), Walkley y Black	3.6	5.0
Nitrógeno total (%), Kjeldahl	0.50	0.67
Fósforo Olsen, (mg kg ⁻¹)	3	3
Textura		
Arena, (%)	31	31
Limo, (%)	43	41
Arcilla, (%)	26	28
Clasificación textural	Franco	Franco
Bases intercambiables		
K, (cmol kg ⁻¹)	0.31	0.56
Ca, (cmol kg ⁻¹)	2.7	5.0
Mg, (cmol kg ⁻¹)	1.0	1.8
Na, (cmol kg ⁻¹)	0.09	0.17

género *Frankia*, ya que se sabe que ésta nodula con dicho género, pero no se hicieron pruebas específicas de identificación.

Los datos obtenidos se analizaron usando el procedimiento PROC GLM de SAS (SAS Institute, 1987), identificando diferencias estadísticas con la prueba de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del Aile en el *Pinus patula*

Los efectos principales del crecimiento de pino asociado con aile y sin asociación se presentan en el Cuadro 3. Los valores mostrados son los promedios de los tratamientos sustrato y fumigación. El peso seco total de los pinos asociados con aile (y el de sus componentes parte aérea y radical), así como su diámetro, fue significativamente mayor que en el pino sin asociación. El contenido de N en el pino que creció en asociación con aile fue significativamente superior ($P < 0.10$; 28 mg planta⁻¹) que el de aquél que se desarrolló en monocultivo (24 mg planta⁻¹), no así su concentración que fue similar en ambos casos (1.17 vs 1.27%). El porcentaje de N en el suelo fue prácticamente el mismo en los dos casos (0.55 a 0.58%) y no siempre hay una relación directa con la concentración de N en el follaje (Velázquez *et al.*, 1992; Velázquez y Perry, 1997). El mayor contenido de N en el pino asociado con aile se explicaría por la aportación que haría la última especie. Tal hipótesis se fundamenta en el hecho que el aile presentó nódulos

Cuadro 3. Respuesta del pino a la asociación con aile (efectos principales).

Variable	Asociación pino/aile	Monocultivo de pino	Significancia [†]
Peso seco (g planta ⁻¹)			
Planta completa	2.32	1.92	**
Parte aérea	1.79	1.48	**
Raíces	0.53	0.44	*
Incremento			
Altura (cm planta ⁻¹)	8.6	8.4	ns
Diámetro (mm planta ⁻¹)	1.37	0.69	**
Contenido de N (mg planta ⁻¹)			
Planta completa	28	24	*
Parte aérea	23	20	*
Raíces	5	4	*
Concentración de N (%)			
Planta completa	1.17	1.27	ns
Parte aérea	1.29	1.33	ns
Raíces	0.95	0.99	ns
Concentración de P (%)			
Parte aérea	0.04	0.06	*
N del suelo			
Extremos macetas	0.55	0.56	ns
Parte media	0.55	0.58	ns

[†] ns, * y ** = no significativo, significativo al nivel $P < 0.05$ y $P < 0.10$, respectivamente.

visibles del género *Frankia* en sus raíces, en particular en el sustrato no fumigado, los cuales fijan N de manera simbiótica (Cuadro 4). Parte del N asociado a este proceso probablemente influenció las raíces de pino plantadas en el compartimiento opuesto de las macetas. El N tuvo que pasar a través de la capa amortiguadora de suelo (6 cm de ancho) que dividía a los dos compartimientos extremos de la maceta; en estos últimos, se encontraban establecidas ambas especies. La translocación del N puede haber ocurrido en el flujo de masas o a través de hifas. Se encontró un mayor número de raíces finas infectadas con ectomicorrizas en las plantas pino cuando éstas crecieron en asociación con aile en el suelo no fumigado que en monocultivo (77 vs 51) (Cuadro 5), pero la existencia de flujo no fue motivo de estudio en la presente investigación. La transferencia de nutrimentos entre las raíces de especies anuales y maderables ha sido reportada por Bethlenfalvay *et al.* (1991) y Ekblad y Huss-Danell (1995).

La dinámica del N del suelo en los casos de asociación de una conífera con aile no es completamente entendida. Ekblad y Huss-Danell (1995) reportaron que en rodales de *Pinus silvestris*, el aile fija N atmosférico y se lo transfiere vía hifas al pino, sólo cuando el suelo presenta bajas

Cuadro 4. Algunas características del *Alnus firmifolia* relacionadas con su capacidad de fijación de nitrógeno.

Variable	Suelo de bosque de pino		Suelo de bosque pino/aile	
	Fumigado	No fumigado	Fumigado	No fumigado
Número de nódulos	22	108	44	189
Peso seco (mg planta ⁻¹)	5.7	14.0	9.6	14.0
Nitrogenasa (μmol g ⁻¹)	180	183	213	164

Cuadro 5. Porcentaje de raíces de pino infectadas con ectomicorrizas.

Variable	Asociación pino/aile				Monocultivo de pino			
	Suelo de bosque de pino		Suelo de bosque de pino/aile		Suelo de bosque de pino		Suelo de bosque de pino/aile	
	Fum. †	No fum.	Fum.	No fum.	Fum.	No fum.	Fum.	No fum.
Infeción micorrizica	43	71	48	85	36	50	32	52

† Fum. = fumigado; No fum. = no fumigado.

concentraciones de este elemento. Tal podría ser el caso del presente experimento. Sin embargo, Sharma *et al.* (1990) encontraron que el aile en asociación con coníferas fijaba grandes cantidades de N, inclusive en suelos con altas concentraciones de nitrógeno. De acuerdo con Binkley (1983), los suelos donde crece el aile son ricos en N sólo después de que los residuos de esta especie son mineralizados.

En contraste con la situación del N, la concentración de P en las plantas de pino que crecieron en monocultivo fue significativamente mayor ($P < 0.05$) que en asociación con aile (0.06 vs 0.04% P, respectivamente). La diferencia podría ser explicada por un efecto de dilución, toda vez que la acumulación de materia seca fue mayor en aile. Binkley (1983) reportó una baja concentración de P en el follaje de árboles de *Pseudotsuga menziessii* en asociación con aile, debido a la competencia por este elemento.

Efecto del Origen del Suelo y la Fumigación en las Plantas de Pino

En el Cuadro 6, se presenta el efecto del origen del suelo y la fumigación en algunas variables de respuesta del pino. En general, el origen del suelo combinado con los tratamientos no tuvo efecto significativo de fumigación en las variables de respuestas, excepto para altura y porcentaje de N en las raíces. Sin embargo, hubo efecto de la fumigación como efecto principal en casi todas las variables. La diferencia se explica por la existencia de interacciones, mismas que se discuten en la siguiente

sección. El origen del suelo (suelo proveniente de un bosque puro de pino y de un bosque con una asociación pino/aile) no afectó el contenido de N, peso seco y diámetro de las plantas. Sin embargo, la concentración de N en las raíces y el incremento promedio en altura (1% N y 10.19 cm, respectivamente) fueron mayores en aquellas plantas que crecieron en el suelo proveniente de un bosque puro de pino que en las que crecieron en el suelo proveniente de un bosque pino/aile. Las diferencias pueden explicarse por las bajas concentraciones de N en el suelo del último bosque citado, ya que el sitio había sido afectado por un incendio. Pritchett (1979) y Binkley (1983) indicaron que, en general, los incendios forestales disminuyen las reservas de N en el suelo. Sin embargo, los incendios en bosques de aile son menos dañinos en virtud de que, al ser ésta una especie pionera, tiene capacidad de restaurar la fertilidad del suelo en sitios alterados por el fuego (Van Cleve *et al.*, 1996).

El contenido promedio de N, peso seco y el crecimiento en diámetro de las plantas de pino que crecieron en suelo no fumigado fueron mayores que en aquellas plantas que crecieron en suelo fumigado (Cuadro 6). La microflora del suelo promovió la infección de las raíces de aile con bacterias del género *Frankia*. En promedio, estas plantas mostraron un número mayor de nódulos por planta (144 vs 33) y un mayor peso seco de los nódulos (0.14 vs 0.08 g nódulo⁻¹) que aquellas que crecieron en suelo fumigado. La ocurrencia de nódulos de *Frankia* en las plantas que crecieron en suelo fumigado puede ser explicada por el origen de las plantas de aile. Éstas se

Cuadro 6. Efectos principales del origen del suelo y la fumigación e interacciones en variables de respuesta del pino.

Variable	Asociación pino/aile		Monocultivo pino		S ¹	Efectos principales		S	Efectos principales ¹		S
	Suelo bosque pino	Suelo bosque pino/aile	Suelo bosque pino	Suelo bosque pino/aile		Suelo bosque pino	Suelo bosque pino/aile		Fum.	No fum.	
Peso seco (g planta ⁻¹)											
Planta completa	2.22	2.42	2.03	1.82	ns	2.12	2.12	ns	1.70	2.53	**
Parte aérea	1.73	1.90	1.58	1.37	ns	1.66	1.63	ns	1.28	1.99	**
Parte radical	0.48	0.57	0.45	0.42	ns	0.46	0.49	ns	0.42	0.54	**
Incremento											
Altura (cm)	9.60	7.67	1.79	6.06	**	10.19	6.86	**	5.12	11.94	ns
Diámetro (mm)	1.33	1.41	0.83	0.55	ns	1.08	0.98	ns	0.84	1.21	**
N absorbido (mg planta ⁻¹)											
Planta completa	27	30	26	21	*	27	27	ns	20	32	**
Parte aérea	22	24	22	17	*	22	22	ns	16	26	**
Parte radical	5	6	4	4	*	5	5	ns	4	6	**
N en vegetal (%)											
Planta completa	1.19	1.15	1.25	1.18	ns	1.27	1.17	ns	1.20	1.27	ns
Parte aérea	1.27	1.31	1.41	1.25	ns	1.34	1.28	ns	1.26	1.36	ns
Parte radical	0.95	0.96	1.06	0.92	*	1.00	0.94	*	0.93	1.00	*
P en vegetal (%)											
Parte aérea	0.03	0.04	0.06	0.06	*	0.04	0.028	ns	0.04	0.05	**
N Kjeldahl en suelo (%)											
Extremos maceta	0.64	0.47	0.65	0.47	ns	0.64	0.47	**	0.56	0.55	ns
Parte media	0.62	0.47	0.66	0.50	ns	0.64	0.48	**	0.56	0.56	ns

¹ Fum = fumigado; No fum = no fumigado. ¹ S = significancia; ns, * y ** = no significativo, significativo al nivel $P < 0.05$ y $P < 0.10$, respectivamente.

obtuvieron de un vivero donde el sustrato era tierra de monte. De acuerdo con Strukova *et al.* (1996), la presencia de hongos ectomicorrizicos y nódulos de actinorrizas benefician a ambas especies.

Las concentraciones de N, tanto en la parte aérea, como en la planta total, no fueron afectadas por la fumigación del suelo. Sin embargo, la concentración de P fue significativamente superior en el tratamiento sin fumigación. Este efecto puede ser atribuible a la presencia de ectomicorrizas. La fumigación del suelo probablemente redujo la población de ectomicorrizas y, en consecuencia, el contenido de P.

Interacciones

La interacción origen del suelo*asociación de especies afectó significativamente ($P < 0.10$) el N absorbido, la concentración de P en la parte aérea, la concentración de N en plantas de pino y el incremento de la altura ($P < 0.5$). El N absorbido por las plantas de pino fue superior cuando estuvo asociado con aile y suelo proveniente del bosque pino/aile (30 mg planta⁻¹) que en monocultivo y el mismo tipo de suelo (21 mg planta⁻¹) (Cuadro 6). Es posible que un alto contenido de N del pino esté

relacionado con la presencia de más nódulos de actinorrizas en las raíces de aile que creció en asociación con pino en suelos provenientes del bosque mixto, que en el suelo proveniente del bosque de pino (189 vs 108 nódulos planta⁻¹) (*cf.* Cuadro 4). La actividad de la nitrogenasa de las raíces de aile en los dos tipos de suelo varió en el intervalo de 164 a 213 $\mu\text{moles g}^{-1}$ y el peso seco de las plantas que crecieron en el suelo de bosque pino aile fue superior.

El porcentaje promedio de P en las plantas de pino no fue el mismo cuando éstas crecieron en monocultivo (0.06%) que cuando lo hicieron en asociación (0.04%). Pero en el primer caso, el porcentaje de P fue el mismo en las plantas desarrolladas en los suelos de las dos procedencias, mientras que, en el segundo, éste fue mayor en el suelo proveniente del bosque mixto (Cuadro 6). La forma cómo se comporta la concentración de P en las coníferas en asociación con aile, no es concluyente. Binkley (1983) reportó una reducción en la concentración de P cuando esta especie de pino se plantó en asociación con especies fijadoras de N; sin embargo, Giardina *et al.* (1995), Hytonen *et al.* (1995) y Zou *et al.* (1995) han reportado la situación opuesta. El incremento de la disponibilidad de P en los rodales de aile puede estar relacionado con las enzimas de

fosfatos que aceleran la liberación de P de la capa de hojarasca (Zou *et al.*, 1995).

La interacción fumigación de suelo-asociación de especies no afectó significativamente las variables de estudio. Sin embargo, la interacción fumigación del suelo-origen del suelo influyó el crecimiento en altura y la concentración de N de las raíces. El incremento en altura en plantas de pino fue mayor en los suelos no fumigados; sin embargo, este patrón fue afectado por el origen del suelo. El máximo incremento de crecimiento en altura se alcanzó en plantas que se desarrollaron en suelo no fumigado procedentes de un bosque de coníferas (14.6 cm promedio), mientras que el menor se presentó en plantas que crecieron en suelo fumigado colectado en el bosque mezclado (4.5 cm). Las altas concentraciones de N y poblaciones de microorganismos en el suelo no fumigado podrían explicar estos resultados (*cf.* Cuadros 4, 5 y 6).

CONCLUSIONES

- Las plantas de *Pinus patula* que crecieron en asociación con aile se beneficiaron de ésta. Tuvieron una mayor concentración de N, mayor peso seco y mayor incremento en diámetro que aquellas que crecieron como monocultivo. Las plantas de aile presentaron nódulos activos de *Frankia* que se presume originaron condiciones superiores de concentración de N y crecimiento de las plantas de pino. Las plantas de pino también tuvieron una mayor infección de ectomicorrizas en esta condición. Los beneficios de esta asociación sólo pueden ser explicados por la ocurrencia de movimiento de N en el flujo de masas o por la conexión de las hifas de las micorrizas, fenómenos que no se midieron, pero son soportados por las evidencias colaterales.

- El origen del suelo (bosque de pino y bosque de pino/aile) no tuvo efectos significativos en las variables de estudio; sin embargo, la fumigación del suelo disminuyó la fijación de N por el aile y el peso seco de las plantas, debido a la reducción significativa en el número de nódulos y peso seco de éstos. Este hecho afectó el desarrollo de las plantas de pino.

- Los resultados del presente experimento permiten concluir que plántulas de *Pinus patula* se beneficiaron de la asociación con *Alnus firmifolia* en condiciones cuidadosamente controladas, lo cual establece una base para que se verifique dicho hecho en plantas adultas y en condiciones de campo. De comprobarse este efecto, sería posible reducir el impacto de las

plantaciones monoespecíficas de pino en la calidad del suelo, mediante su asociación con el aile.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se desarrolló como parte del proyecto 0373-B9108, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Nuestro agradecimiento a la Dra. María Valdés por la revisión y comentarios a esta contribución.

LITERATURA CITADA

- Bethlenfalvy, G.J., M.G. Reyes-Solis, S.B. Camel y R. Ferrera-Cerrato. 1991. Nutrient transfer between the root zones of soybean y maize plants connected by a common mycorrhizal mycelium. *Physiologia Plantarum* 82: 423-432.
- Binkley, D. 1983. Interaction of site fertility y red alder on ecosystem production in Douglas-fir plantations. *For. Ecol. Manage.* 5: 215-227.
- Binkley, D. 1986. *Forest nutrition management*. John Wiley. New York.
- Bormann, B.T. y D.S. De Bell. 1981. Nitrogen content y other soil properties related to age of red alder stands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 428-432.
- Camel, S.B., M.G. Reyes-Solis, R. Ferrera-Cerrato, R.L. Franson, M.S. Brown y G.J. Bethlenfalvy. 1991. Growth of vesicular-arbuscular mycorrhizal mycelium through bulk soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 389-393.
- Cruz-Cisneros, R. y M. Valdés. 1990. Ecological aspects of the actinorhizal plants growing in the basin of Mexico. *Nitrogen Fixing Tree Research Reports* 8: 42-47.
- Ekblad, A. y K. Huss-Danell. 1995. Nitrogen fixation by *Alnus incana* and N transfer from *A. incana* to *Pinus sylvestris* influenced by macronutrients and ectomycorrhiza. *New Phytologist* 131: 453-459.
- Etchevers Barra, J.D. 1988. Análisis químico de suelo y planta. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Funk, D.T., C.R. Schlesinger y J.F. Ponder. 1974. Movement of nutrients in radiata pine needles in relation to the growth of shoots. *Bot. Gazette* 140 (suppl.): 110-114.
- Giardina, C.P., S. Huffman, D. Binkley y B.A. Caldwell. 1995. Alders increase soil phosphorus availability in Douglas-fir plantation. *Can. J. For. Res.* 25: 1652-1657.
- Gordon, J.C. y J.O. Dawson. 1979. Potential uses of nitrogen-fixing trees and shrubs in commercial forestry. *Bot. Gazette* 140 (suppl.): S88-S90.
- Grand, L.F. y E.A. Harvey. 1982. Quantitative measurement of ectomycorrhizae on plant roots. pp. 77-88. *In*: Schenck, N.C. (ed.). *Methods and principles of mycorrhizal research*. American Phytopathological Society. St. Paul, MN.
- Guzmán-Plazola, R.A., R. Ferrera-Cerrato y G.J. Bethlenfalvy. 1992. Papel de la endomicorriza V-A en la transferencia de exudados radicales entre frijol y maíz sembrados en asociación bajo condiciones de campo. *Terra* 10: 236-248.
- Hardy, R.W.F., C.R. Burns y D.R. Holsten. 1973. Application of the acetylene reduction assay for measurement of nitrogen-fixation. *Soil Biol. Biochem.* 5: 47-81.

- Hoagland, D.R. y D.I. Arnon. 1950. The water culture method for growing plants without soil. Bulletin 347. Calif. Agric. Exp. Station. Berkeley, CA.
- Huss-Danell, K. 1999. Nitrogen fixation in Frankia symbioses. XVI International Botanical Congress <http://pc.linux.unil.ch/botanique/ibc/abstracts/listen/abstract/5828.html> March 18, 2001)
- Hytonen, J., A Saarsalmi y P. Rossi. 1995. Biomass production and nutrient content of short rotation plantations. *Silva Fennica* 29: 117-139.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1992. Síntesis geográfica del estado de Hidalgo. México, D.F.
- Linding, R. y C. Vásquez. 1997. Los ailes en la restauración ecológica. *Ciencia* 48: 31-40.
- Miller, R.E. y M.D. Murray. 1978. The effects of red alder on growth of Douglas-fir. pp. 283-308. *In*: Briggs, D.G., D.S. De Bell y W.A. Atkinson (eds.). Utilization and management of alder. General Tech. Rep. US Department of Agriculture, Forest Service, PNW-70. Portland, OR.
- Perry, D.A. 1994. Forest ecosystems. Johns Hopkins University Press. Baltimore, MD.
- Pritchett, W.L. 1979. Properties and management of forest soils. Wiley. New York.
- Quintana, P. y M. González. 1993. Afinidad fitogeográfica y papel sucesional de la flora leñosa de los bosques de pino-encino de los Altos de Chiapas, México. *Acta Bot. Mex.* 21: 43-57.
- SAS Institute, Inc. 1987. SAS Application guide. Raleigh, NC.
- Sharma, P.N., C. Chatterjee, S.C. Agarwala y C.P. Sharma. 1990. Zinc deficiency and pollen fertility y maize (*Zea mays*). pp. 261-265. *In*: Van Beusichem, M.L. (ed.). Plant nutrition physiology y application. Kluwer Academic Publishers. New York.
- Strukova, S., M. Vosatka y J. Pokorný. 1996. Root symbioses of *Alnus glutinosa* (L.) and their possible role in alder decline: A preliminary study. *Folia Geobotanica and Phytotaxonomica* 31: 153-162.
- Tarrant, R.F. 1961. Stand development and soil fertility in a Douglas-fir-red alder plantation. *For. Sci.* 7: 238-246.
- Valdés, M. 2000. La simbiosis actinorrhiza. pp. 29-40. *In*: Peña-Cabriales, J.J. (ed.). La fijación biológica de nitrógeno en América Latina: El aporte de las técnicas nucleares. Acuerdo Regional para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina el Caribe-Cinvestav-Instituto Politécnico Nacional. Irapuato, México.
- Van Cleve, K.V., L.A. Viereck y C.R. Dyrness. 1996. State factor control of soil and forest succession along the Tanana river in interior Alaska, USA. *Artic Alpine Res.* 28: 388-400.
- Velázquez Martínez, A. y D.A. Perry 1997. Factors influencing the availability of nitrogen in thinned and unthinned Douglas-fir stands in the Central Oregon Cascades. *For. Ecol. Manage.* 93: 195-203.
- Velázquez-Martínez, A., D.A. Perry y T. Bell. 1992. Response of aboveground biomass increment, growth efficiency, and foliar nutrients to thinning, fertilization, and pruning in young Douglas-fir plantations in the Central Oregon Cascades. *Can. J. For. Res.* 22: 1278-1289.
- Waring, R.H. y S.W. Running. 1998. Forest ecosystems analysis at multiples scales. 2nd edition. Academic Press. San Diego, CA.
- Waring, R.H. y W.H. Schlesinger. 1985. Forest ecosystems. Concepts and management. Academic Press. Orlando, FL.
- Zavitkovski, J. y M. Newton. 1968. Ecological importance of snowbrush *Ceanothus velutinus* in the Oregon Cascades. *Ecology* 49: 1134-1145.
- Zou, X., D. Binkley y B.A. Caldwell. 1995. Effects of dinitrogen fixing trees on phosphorus biogeochemical cycling, in contrasting forest. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1452-1458.

DINÁMICA Y CUANTIFICACIÓN DE GRUPOS MICROBIANOS EN COMPOST Y VERMICOMPOST DE BAGAZO DE AGAVE TEQUILERO

Dynamics and Quantification of Microbial Groups in Compost and Vermicompost of Tequila Agave Bagasse

R. Rodríguez-Macias^{1†}, R. Quintero-Lizaola², G. Alcántar-González², V. Ordaz-Chaparro² y V. Volke-Haller²

RESUMEN

La producción de un litro de tequila 100% de agave genera entre 4 y 6 kg de bagazo en peso húmedo. En 1999, la industria tequilera produjo cerca de 200 millones de litros de tequila, dando como resultado alrededor de un millón de toneladas de bagazo en peso seco, el cual está compuesto principalmente por celulosa hemicelulosa y lignina. El objeto del presente estudio fue determinar la dinámica y cuantificación de grupos microbianos (bacterias, hongos, y actinomicetos), ubicados en comunidades microbianas con actividad fisiológica específica en el ciclo del carbono (amilolíticos, lipolíticos, celulolíticos y ligninolíticos) que participan durante los procesos de biodegradación aerobia del bagazo de agave tequilero. Los tratamientos evaluados fueron: 1) bagazo, lombriz y estiércol de borrego; 2) bagazo y lombriz; 3) bagazo y estiércol; y 4) bagazo; de los cuales se obtuvieron dos compostas y dos vermicompostas. Los resultados muestran que en los cuatro tratamientos hubo un decremento estadísticamente significativo en el número de unidades formadoras de colonias (ufc) por gramo de material transformado, presentando las cuentas iniciales y finales de cuatro momentos de muestreo. En el tratamiento de bagazo y lombriz, se obtuvieron: bacterias, de 3.2×10^8 a 0.2×10^6 ; hongos, de 56×10^4 a 10.4×10^4 ; actinomicetos, de 1.0×10^6 a 0.08×10^6 , a 34, 68, 102 y 136 días durante el desarrollo de los procesos. De la misma manera, las poblaciones microbianas participantes en el ciclo del carbono se comportaron de la siguiente manera: lipolíticos, de 2.24×10^8 a 6.6×10^6 ; celulolíticos, de 35.4×10^5

a 3×10^5 ; ligninolíticos, de 43×10^5 a 1.4×10^5 ; y amilolíticos, de 0.45×10^5 a 0.21×10^5 , cuantificados como número más probable (NMP). Los resultados demuestran que las poblaciones de grupos microbianos disminuyeron con respecto al tiempo, independientemente del tipo de proceso y de los tratamientos utilizados.

Palabras clave: bacterias, hongos, actinomicetos, lombriz.

SUMMARY

The production of one liter of tequila 100% agave generates 4 to 6 kg humid bagasse. In 1999, the tequila industry produced about 200 millions liters of tequila, resulting in approximately one million tons dry weight of bagasse, which is composed mainly of cellulose and lignin. The objective of the present study was to determine the dynamics of microbial groups (bacteria, fungi, actinomycetes, amyolytic, lipolytic, cellulolytic, and ligninolytic) that participate in the aerobic biodegradation processes of the agave bagasse. The treatments evaluated were: 1) bagasse, earthworms and lamb manure; 2) bagasse and earthworms; 3) bagasse and manure; and 4) bagasse only. Two vermicomposts and two composts were obtained. The results showed that in the four treatments there was a statistically significant decrease in the number of colony-forming units (ucf) per gram of transformed material. In the treatment of bagasse and worms the following results were obtained: bacteria, 3.2×10^8 to 0.2×10^6 ; fungi, 56×10^4 to 10.4×10^4 ; actinomycetes, 1.0×10^6 to 0.08×10^6 , at 34, 68, 102, and 136 days of the development processes. In the same way, the microbial population participating in the carbon cycle showed the following behavior: lipolytic, from 2.24×10^8 to 6.6×10^6 ; cellulolytic, from 35.4×10^5 to 3×10^5 ; ligninolytic, from 43×10^5 to 1.4×10^5 , and the amyolytic from 0.45×10^5 to 0.21×10^5 , quantified as MPN. The results show that the populations of microbial groups

¹ Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.

[†] Autor responsable (ramonrod@maiz.cucba.udg.mx)

² Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Texcoco, estado de México.

diminished with time, independently of the type of process and of the evaluated treatments.

Index words: bacteria, fungi, actinomycetes, earthworms.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria tequilera es una de las más importantes en el estado de Jalisco, México. La producción de tequila, así como su exportación, han aumentado considerablemente a raíz del reconocimiento de su denominación de origen; sin embargo, entre los múltiples problemas que enfrenta esta industria se encuentra la generación de residuos durante el proceso de producción del aguardiente. Uno de estos residuos es el bagazo de agave y, por las grandes cantidades que se acumulan día con día y al no disponerse de algún proceso para su utilización, este problema se ha incrementado. Existe el convencimiento que se deben buscar mejores alternativas de manejo y disposición. Esto es, considerar el bagazo de agave como un producto más, mediante su biotransformación, para utilizarlo en otras actividades entre las que destaca su potencial como sustrato para viveros e invernaderos, según estudios preliminares (Rodríguez *et al.*, 1999).

Los materiales composteados suelen ser muy heterogéneos, por lo que identificar los rasgos microbiológicos de estos procesos es, en general, complicado. Esta heterogeneidad ocasiona que las comunidades microbianas y su estructura en estudio sean sitio-específicas (Miller, 1993). Aunado a lo anterior, cada investigador trabaja con aspectos particulares de su interés, de tal forma los grupos microbianos son también particulares en cada investigación. No obstante, se cuenta con información generalizada de los grandes grupos microbianos, como hongos, bacterias y actinomicetos, que participan en el proceso de compostaje. Algunas especies de estos grupos también se han estudiado por separado. Se han observado tipos de microorganismos similares en compostas, los cuales se relacionan con el tiempo y la temperatura durante el proceso, más que con la microbiota participante (Paul y Clark, 1996).

Los antecedentes que existen sobre los grupos microbianos que participan en los bioprocesos varían entre el compostaje convencional y el vermicompostaje. Los microorganismos presentes en el intestino de las lombrices son los mismos que se encuentran en los materiales orgánicos, antes de que

la ingestión haya ocurrido. Sin embargo, parte de esta microbiota se incrementa, reduce o desaparece, dependiendo del grupo microbiano de que se trate (Allievi *et al.*, 1987). La participación de las lombrices en la biotransformación de la materia orgánica está en estrecha relación con los grupos microbianos presentes en los residuos.

Este estudio tuvo por objetivo determinar la dinámica y cuantificación de grupos microbianos (bacterias, hongos y actinomicetos), ubicados en comunidades microbianas con actividad fisiológica específica en el ciclo del carbono (amilolíticos, lipolíticos, celulolíticos y ligninolíticos) que participan durante los procesos de biodegradación aerobia del bagazo de agave tequilero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para los procesos de composteo y vermicomposteo, se utilizó bagazo de agave tequilero, mezclado con estiércol de borrego precompostado en proporciones de 4:1 con base en peso seco con seis repeticiones cada uno. Los tratamientos evaluados se presentan en el Cuadro 1.

Los materiales se mezclaron proporcionalmente en recipientes de plástico de 20 cm de ancho x 31 cm de largo x 13 cm de altura. Los contenedores, destinados a la producción de vermicompostas, se inocularon con 200 lombrices composteras adultas (cliteladas) de la especie *Eisenia andrei* Bouche, las cuales se desarrollaron previamente en estiércol de conejo. Las vermicompostas se mantuvieron en las mismas condiciones que las compostas, en una cámara sombreada con temperatura ambiental de 19 a 25 °C.

El contenido de humedad es un factor importante para el buen desarrollo de los procesos, por lo que, para su determinación semanal, se secaron 10 g de sustrato, a 70 °C durante 48 h, hasta alcanzar

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos.

Tratamiento [†]	Característica
1 (BEL)	Bagazo lavado con agua, mezclado con estiércol precompostado de borrego e inoculado con 200 lombrices adultas.
2 (BL)	Bagazo lavado con agua, inoculado con 200 lombrices adultas.
3 (BE)	Bagazo lavado con agua, mezclado con estiércol precompostado de borrego.
4 (B)	Bagazo lavado con agua.

[†] BEL = bagazo, estiércol y lombriz. BL = bagazo y lombriz. BE = bagazo y estiércol. B = bagazo.

el peso constante, para posteriormente medir la pérdida de peso y relacionarla con el agua. La temperatura se midió a diario durante todo el proceso.

Para el estudio microbiológico, se colectaron muestras en cuatro tiempos de muestreo (34, 68, 102 y 136 días) durante el desarrollo de los procesos, las cuales se obtuvieron de la siguiente manera: en condiciones asépticas, se tomaron al azar 10 submuestras para formar una muestra compuesta por cada tratamiento, de las cuales se tomaron, de manera homogénea, 10 g de material, se suspendieron en 90 mL de agua destilada estéril durante 15 min y se realizaron diluciones decimales seriadas. Al final de este procedimiento, se tomó una alícuota de 0.1 mL de las diluciones 10^{-2} a 10^{-8} para cada grupo microbiano (hongos, bacterias, actinomicetos, lipolíticos, celulolíticos, ligninolíticos y amilolíticos), las cuales se depositaron en cajas Petri por quintuplicado (Robert, 1990). Las evaluaciones, el tiempo de incubación y los medios específicos utilizados para cada grupo microbiano (Wollum, 1982) se presentan en el Cuadro 2. Posteriormente, se incubaron a temperatura de 26 °C para ser evaluados mediante el recuento de las unidades formadoras de colonias (ufc). Para los microorganismos amilolíticos se utilizaron tubos de 10 mL, y se analizaron por la técnica del número más probable (NMP), el cual se obtiene interpolando el número característico a través de reacciones de identificación correspondiente a cada grupo microbiano, para eso se utilizó la tabla de números más probables de Cochran (1950), para cinco tubos de dilución (Alexander, 1982).

Los datos se sometieron a un análisis de varianza y las medias de los tratamientos a una prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se utilizaron los procedimientos incluidos en el paquete estadístico SAS, Versión 8 (SAS Institute, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la literatura, se recomienda un contenido de humedad de 40 a 65% en procesos de composteo, mientras que para vermicompostas se deben mantener los materiales entre 70 y 85% (Martínez, 1995). En el presente trabajo, no hubo problemas para mantener estos valores, debido a las características de las instalaciones donde se desarrollaron los procesos, así como a las de los contenedores y condiciones ambientales que prevalecieron, las cuales evitaron la pérdida de humedad.

Las temperaturas durante el desarrollo de los procesos oscilaron entre 19 y 24 °C. En el composteo, no se presentó la fase termófila, ya que no se alcanzaron las temperaturas óptimas para un buen compostaje (55 a 60 °C), debido a las características del proceso realizado, al estado físico de los materiales utilizados, a la ausencia de estiércol, a la aireación y a los volúmenes empleados. Esto no permitió una aceptable descomposición de la materia orgánica (MO), relacionado con una baja actividad microbiana, tanto de los grandes grupos, como de los que intervienen en el ciclo de carbono, reflejado principalmente en el tratamiento con bagazo puro, por lo que el porcentaje de la MO, del carbono y la relación C:N resultaron mayores con respecto a los demás tratamientos (Cuadro 3).

Con respecto a la vermicomposta, la temperatura alcanzó 24 °C. Este factor es importante para las lombrices, ya que éstas se desarrollan de forma óptima en intervalos que varían de 22 a 24 °C, aunque también pueden desarrollarse en intervalos de 13 a 37 °C, sin embargo, el valor máximo afecta su tasa reproductiva y alimenticia (Tomlin y Miller, 1980; Reinecke *et al.*, 1992).

Cuadro 2. Medios de cultivo, tiempo de incubación y formas de identificación empleados para la cuantificación de los grupos microbianos estudiados.

Grupo microbiano	Medio de cultivo	Tiempo de incubación [†]	Método de identificación	Referencia
Grandes grupos microbianos				
Bacteria totales	Agar nutritivo	3	Morfología típica	Wollum (1982)
Actinomicetos	Agar Czapeck	7 a 10	Morfología típica	Wollum (1982)
Hongos totales	Medio de Martin	3	Morfología típica	Wollum (1982)
Grupos microbianos con actividad fisiológica específica				
Amilolíticos	Almidón	14	Lugol	Wollum (1982)
Lipolíticos	Agar-Tween 80	3	Morfología típica	Harrigan y McCance (1996)
Celulolíticos	Carboximetil celulosa	4	Rojo congo y NaCl	Suyama <i>et al.</i> (1993)
Ligninolíticos	Ácido tánico	14	Morfología típica	Subba Rao (1993)

[†] Días de incubación a 26 °C.

Cuadro 3. Porcentaje de materia orgánica, carbono, y relación C:N de los tratamientos evaluados al final de los procesos de compostaje y vermicompostaje.

Tratamiento	Materia orgánica	Carbono	C:N
	----- % -----		
1 (BEL)	57	33	17
2 (BL)	85	49	45
3 (BE)	55	32	19
4 (B)	93	54	89

[†]BEL = bagazo, estiércol y lombriz. BL = bagazo y lombriz. BE = bagazo y estiércol. B = bagazo.

En el Cuadro 4, se presentan las poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetos contabilizadas en vermicompost y compost a partir de bagazo de agave tequilero a 34, 68, 102 y 136 días durante los procesos. Las poblaciones se reportan en unidades formadoras de colonias (ufc) g⁻¹ de materia seca y el grupo de amilolíticos (Figura 1) en número más probable (NMP).

Hubo diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha = 0.05$) debido a la interacción de los tres factores (presencia y ausencia de lombrices, con y sin estiércol y tiempos de muestreo), los cuales influyeron de manera directa en el comportamiento de la dinámica microbiana. Las poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetos disminuyeron con respecto al tiempo entre 68 y 136 días, independientemente del

tipo de proceso, debido al agotamiento de compuestos carbonados de fácil descomposición que se van degradando en función de la complejidad de su estructura (Paul y Clark, 1996; Madigan *et al.*, 1999). No obstante, los materiales carbonados más simples son los que se fraccionan inicialmente y sirven de sustrato para una gran diversidad de microorganismos, por lo que se incrementa la biomasa microbiana en las etapas iniciales del proceso, mientras que, en etapas posteriores, los materiales restantes son más complejos y los microorganismos que los atacan son específicos y menos abundantes (Alexander, 1994). Al respecto, Corlay-Chee *et al.* (1999) no encontraron cambios significativos de las poblaciones bacterianas entre compostaje y vermicompostaje de residuos orgánicos. Los cambios sólo se debieron al tipo de sustrato que utilizaron y a los tiempos de evaluación de las poblaciones.

Con respecto a las poblaciones fúngicas, a pesar de que Edwards y Fletcher (1988) mencionaron que los hongos son un alimento importante para las lombrices, en el presente estudio no se presentó este efecto, ya que no se observó una diferencia marcada en la población de hongos entre los tratamientos utilizados. Más bien, la disminución de poblaciones de este grupo, con respecto al tiempo, pudo relacionarse con el incremento del pH, ya que los hongos prefieren sustratos ligeramente ácidos

Cuadro 4. Unidades formadoras de colonias (ufc) de bacterias, hongos y actinomicetos durante el proceso de producción de vermicompost y compost de bagazo de agave tequilero a partir de 34, 68, 102 y 136 días después de iniciado el proceso (n = 5).

Días	BEL [†]	BL	BE	B
Bacterias				
----- ufc x 10 ⁶ g ⁻¹ MS [†] -----				
34	102.6 ± 33.3 a	320.6 ± 51.0 a	76.0 ± 23.6 b	35.0 ± 9.4 a
68	118.4 ± 41.1 a	19.4 ± 3.0 b	176.6 ± 47.8 a	22.0 ± 2.9 a
102	62.0 ± 7.5 b	1.4 ± 1.3 b	75.6 ± 23.7 b	9.8 ± 2.3 a
136	2.4 ± 2.1 c	0.2 ± 0.4 b	1.8 ± 2.4 c	3.2 ± 2.0 a
Hongos				
----- ufc x 10 ⁴ g ⁻¹ MS -----				
34	32.0 ± 5.4 a	56.0 ± 5.9 a	21.4 ± 4.4 b	39.0 ± 1.5 a
68	13.4 ± 0.5 b	8.0 ± 4.8 b	35.0 ± 7.9 a	19.0 ± 2.6 b
102	18.6 ± 2.4 b	16.8 ± 1.9 c	22.0 ± 3.0 b	7.2 ± 1.9 c
136	5.4 ± 1.5 c	10.4 ± 3.1 c	17.8 ± 2.7 b	0.4 ± 0.9 c
Actinomicetos				
----- ufc x 10 ⁶ g ⁻¹ MS -----				
34	49.4 ± 12.8 c	1.0 ± 0.9 a	27.6 ± 8.2 c	0.2 ± 0.4 a
68	154.0 ± 37.9 b	3.0 ± 1.2 a	307.0 ± 88.7 a	0.0 ± 0.0 a
102	270.0 ± 35.5 a	16.0 ± 4.9 a	73.2 ± 7.8 b	1.4 ± 1.6 a
136	40.2 ± 17.4 c	0.8 ± 1.1 a	71.6 ± 11.3 bc	9.8 ± 2.1 a

[†]BEL = bagazo, estiércol y lombriz. BL = bagazo y lombriz. BE = bagazo y estiércol. B = bagazo. [†]MS = materia seca.

Tukey (0.05)_{Bacterias} = 39.6668; Tukey (0.05)_{Hongos} = 6.2554; Tukey (0.05)_{Actinomicetos} = 44.5555.

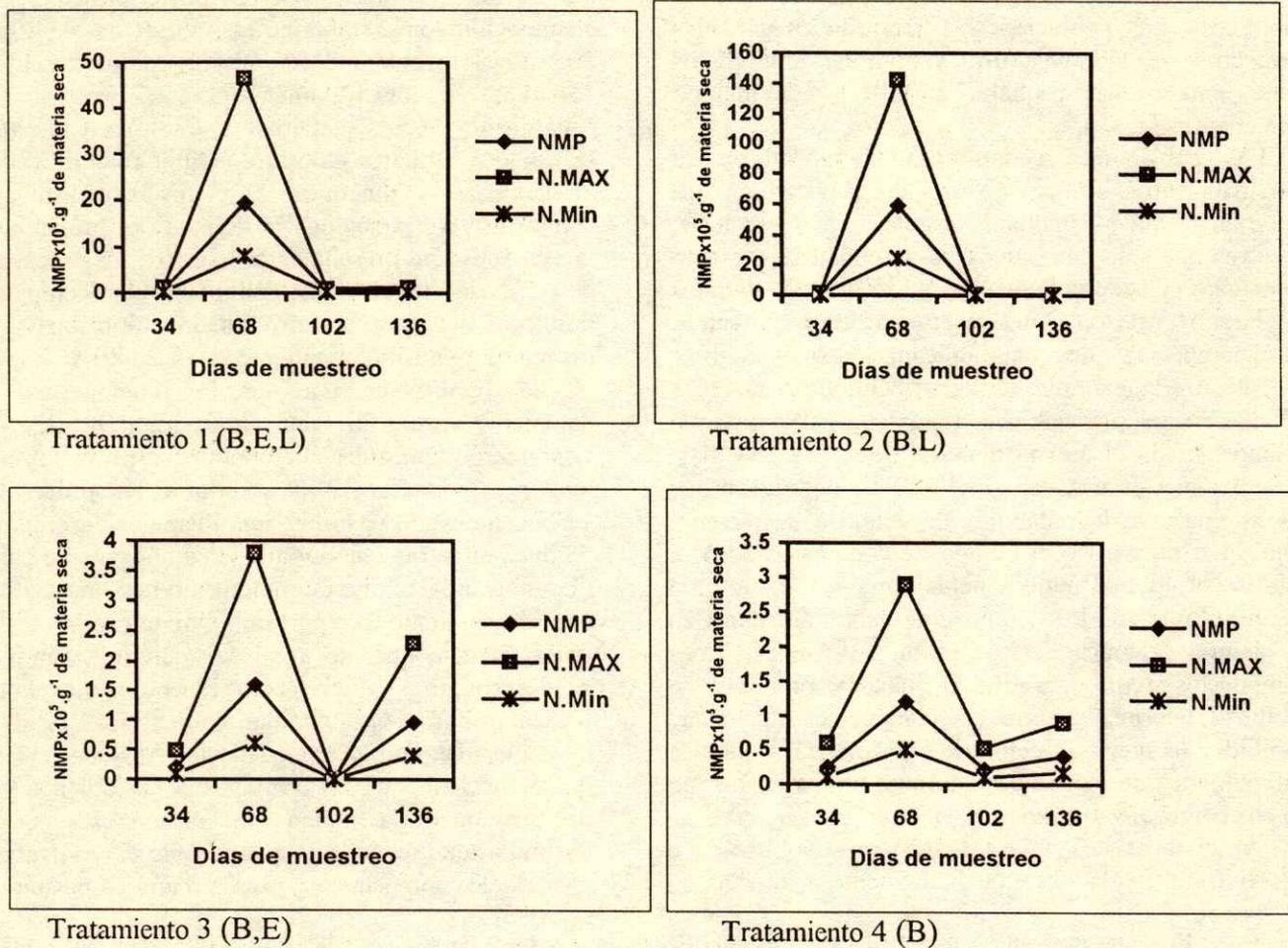


Figura 1. Dinámica poblacional de microorganismos amilolíticos en cuatro tratamientos (BLE, BL, BE y B) y cuatro tiempos de muestreo (34, 68, 102 y 136 días) durante el desarrollo de compostaje y vermicompostaje de bagazo de agave tequilero con Límites de Confianza a 95%. (NMP = número más probable, N.Max. = nivel máximo, N.Min. = nivel mínimo).

(Alexander, 1994). Por tal motivo, las poblaciones fúngicas se pudieron haber afectado por pH alcalinos. De la misma manera, se presentó un ligero incremento de las poblaciones de hongos a 68 y 102 días de proceso, lo cual contrasta con una disminución en la población de bacterias, ya que al dejar el nicho que éstas tenían, lo ocuparon los hongos, proceso conocido como sucesión microbiana (Miller, 1993). Resultados similares presentaron Allievi *et al.* (1987), quienes observaron un descenso en las poblaciones bacterianas y un ligero incremento en las poblaciones fúngicas a través del tiempo.

La actividad de los actinomicetos creció a medida que avanzaban los procesos de compostaje y vermicompostaje que contenían estiércol de borrego, pero disminuyó drásticamente en la etapa final,

mientras que los materiales sin estiércol fueron inferiores a los anteriores. Comportamiento similar se ha reportado al evaluar la actividad de actinomicetos durante la degradación del estiércol de bovino (Aguirre *et al.*, 1986).

Es importante mencionar que las ufc de hongos fueron inferiores a las de bacterias, lo cual implica que el número de individuos fue mayor en microorganismos unicelulares, no obstante que la biomasa total se obtuvo principalmente de los hongos. Al respecto, Byzov *et al.* (1995) encontraron que, en estiércol fresco, los hongos representaron 91% de la biomasa total y el resto correspondió a bacterias y actinomicetos.

En el Cuadro 5, se presentan los cambios en las poblaciones de microorganismos participantes en el

ciclo del carbono (celulolíticos, ligninolíticos y lipolíticos). Las poblaciones se reportan en unidades formadoras de colonias (ufc) y para los amilolíticos como número más probable (NMP) g^{-1} de materia seca (Figura 1).

Las poblaciones celulolíticas incrementaron su actividad entre 34 y 68 días de proceso en los materiales que contenían estiércol y/o lombriz, mientras que sólo con bagazo la actividad se presentó de manera considerable de 102 a 136 días. Resultados similares reportaron Quintero *et al.* (2000), al evaluar vermicompostas de paja picada. Estos autores encontraron la máxima actividad celulolítica de 46 a 92 días y se presentó un repunte significativo en compostas con el mismo material de 115 a 148 días. En adición, Corlay-Chee *et al.* (1999) reportaron que los organismos degradadores de celulosa decrecieron conforme transcurrió el tiempo de composteo de paja y estiércol, lo cual pudo deberse a que las celulosas y hemicelulosas son los componente más abundantes en la materia orgánica de los residuos vegetales. Tales compuestos representan a la materia orgánica de labilidad intermedia entre los compuestos fácilmente solubles (contenido celular), lo que les da la característica de permanecer durante un mayor tiempo en el sustrato (Rodríguez, 1993).

Al analizar los microorganismos lipolíticos, se observó una población alta inicialmente a 34 días en

todos los tratamientos y, posteriormente, una disminución considerable en los muestreos a 34, 68, y 102 días, presentándose un ligero incremento a 136 días en los tratamientos, con excepción del tratamiento bagazo, estiércol y lombriz (Cuadro 5). Resultados similares reportaron Quintero *et al.* (2000), al evaluar la dinámica de estos organismos en composta y vermicompostas de paja. Es probable que la alta actividad presentada al inicio de los procesos se deba a la mayor disponibilidad de compuestos lipídicos, que fueron aprovechados rápidamente por los microorganismos (Quintero *et al.*, 2000).

La lignina es uno de los compuestos más complejos y, por lo tanto, más difícil de degradar. Los microorganismos ligninolíticos presentaron la mayor actividad a 34 días durante los procesos de vermicompostaje y, luego, una disminución drástica a 68 días, mientras que durante el compostaje de bagazo (Tratamiento 4) hubo un incremento máximo a 68 días de proceso, como lo reportaron Quintero *et al.* (2000), de tal manera que, del total de microorganismos que se desarrollaron en el medio específico, los hongos presentaron mayor actividad ligninolítica, resultados que coinciden con lo reportado por Alexander (1994), quien mencionó que los grupos más estudiados en la degradación de la lignina son los hongos superiores. Es importante mencionar que durante el desarrollo del proceso de compostaje se presentó una gran cantidad

Cuadro 5. Unidades formadoras de colonias (ufc) de microorganismos participantes en el ciclo del carbono, 34, 68, 102 y 136 días después de iniciado el proceso de compostaje y lombricompostaje de bagazo de agave tequilero (n = 5).

Días	BEL [†]	BL	BE	B
Ligninolíticos				
ufc x 10 ⁵ g ⁻¹ MS [†]				
34	23.0 ± 2.5 a	43.0 ± 6.5 a	1.4 ± 1.3 b	11.6 ± 5.0 c
68	3.4 ± 1.5 b	5.2 ± 1.3 b	7.4 ± 1.5 a	26.0 ± 3.5 a
102	1.6 ± 0.5 b	3.8 ± 1.1 b	0.0 ± 0.0 b	10.2 ± 1.3 c
136	1.0 ± 1.2 b	1.4 ± 1.1 b	1.0 ± 1.0 b	18.0 ± 5.5 b
Celulolíticos				
ufc x 10 ⁵ g ⁻¹ MS				
34	21.0 ± 1.3 ab	35.4 ± 6.9 a	35.6 ± 6.3 b	42.0 ± 9.2 b
68	28.0 ± 4.3 a	12.0 ± 4.4 b	181.0 ± 25.8 a	37.0 ± 5.6 b
102	6.6 ± 1.5 b	7.8 ± 1.6 b	39.2 ± 3.0 b	11.0 ± 1.5 c
136	3.2 ± 2.1 b	3.0 ± 2.0 b	10.2 ± 2.3 c	128.0 ± 36.7 a
Lipolíticos				
ufc x 10 ⁶ g ⁻¹ MS				
34	99.0 ± 7.3 bc	224.0 ± 73.3 a	366.0 ± 46.1 a	345.0 ± 54.4 a
68	157.0 ± 16.8 a	66.0 ± 15.7 b	393.0 ± 45.8 a	192.0 ± 17.9 b
102	142.4 ± 20.0 ab	15.8 ± 0.8 c	88.2 ± 13.8 c	30.8 ± 8.6 c
136	69.8 ± 13.2 c	6.6 ± 1.8 c	153.0 ± 36.4 b	59.2 ± 10.0 c

[†] BEL = bagazo, estiércol y lombriz. BL = bagazo y lombriz. BE = bagazo y estiércol. B = bagazo. [†] MS = materia seca.

Tukey (0.05)_{Ligninolíticos} = 4.7962; Tukey (0.05)_{Celulolíticos} = 19.9903; Tukey (0.05)_{Lipolíticos} = 50.4118.

de macromicetos, principalmente bacidiomicetos del género *Coprinus*.

Los microorganismos amilolíticos presentaron el crecimiento mayor a 68 días en todos los procesos (Figura 1). A 102 días, las poblaciones en el Tratamiento 1, bagazo, estiércol y lombriz, y en el Tratamiento 2, bagazo y lombriz, decrecieron drásticamente, debido al efecto de las bajas reservas de almidón, por la naturaleza de los materiales utilizados (Corlay *et al.*, 1999). No obstante, el Tratamiento 3, bagazo y estiércol, y el Tratamiento 4, bagazo, presentaron un incremento importante a 102 y 136 días. Aguirre *et al.* (1986) observaron poblaciones máximas de estos microorganismos a 90 días de degradación de estiércol de bovino (1.09×10^{10} ufc g⁻¹), posteriormente, las poblaciones disminuyeron con respecto al tiempo.

CONCLUSIONES

- En general, el número de unidades formadoras de colonias (ufc) de los grupos microbianos de bacterias, hongos y actinomicetos, así como de los microorganismos involucrados en el ciclo del carbono (lipolíticos, celulolíticos y ligninolíticos) decrecieron con respecto al tiempo, independientemente del tipo de proceso desarrollado (compostaje y vermicompostaje) y de los tratamientos utilizados.

- Con la dinámica microbiana determinada en compostas y vermicompostas evaluadas en este estudio, se podrá controlar el grado de degradación requerido de los compuestos químicos constituyentes del bagazo de agave.

- El bagazo de agave tequilero sometido a procesos de compostaje y vermicompostaje contribuyó a la biotecnología de transformación de residuos agroindustriales que se generan sin un valor agregado, obteniéndose biofertilizantes y sustratos orgánicos, útiles en la agricultura sostenible.

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Bravo, M., R. Ferrera-Cerrato, R. Núñez-Escobar y J.D. Etchevers-Barra. 1986. Microbiología de la degradación y evaluación agronómica del estiércol bovino. *Agrociencia* 64: 49-66.
- Alexander, M. 1982. Most probable number method for microbial populations. pp. 815-820. *In*: Page, A.L. (ed.). *Methods of soil analysis*. Agronomy 9. Part 2. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Alexander, M. 1994. *Introducción a la microbiología del suelo*. AGT Editor. México, D.F.
- Allievi, L., B. Citterio y A. Ferrari. 1987. Vermicomposting of rabbit manure: Modifications of microflora. pp. 115-125. *In*: De Bertoldi, M., P. Ferranti, P.L. Hermite y F. Zucchini (eds.). *Compost: Production, quality, and use*. Elsevier. Udine, Italy.
- Byzov, V.A., L.M. Poljanskaja y V.G. Thanh. 1995. The role of yeasts as growth stimulators for *Eisenia fetida* in vermicomposting systems. *Acta Zool. Fennica* 196: 376-379.
- Cochran, W.G. 1950. Estimation of bacterial densities by means of the "most probable number". *Biometrics* 6: 105-116.
- Corlay-Chee, L., R. Ferrera-Cerrato, J.D. Etchevers-Barra, A. Echeagaray-Alemán y A. Santizo-Rincón. 1999. Cinética de grupos microbianos en el proceso de producción de composta y vermicomposta. *Agrociencia* 33: 375-380.
- Edwards, C.A. y K.E. Fletcher. 1988. Interactions between earthworms and microorganisms in organic-matter breakdown. *Agric. Ecosyst. Environ.* 24: 235-247.
- Harrigan, W.F. y M.E. McCance. 1996. *Laboratory methods in microbiology*. Academic Press. London, UK.
- Madigan, M.T., J.M. Martinko y J. Parker. 1999. *Biología de los microorganismos*. 8ª ed. Prentice Hall Iberia. Madrid, España.
- Martinez, A.A. 1995. *Manual práctico do minhocultor*. 3ª edición. Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de Sao Paulo. FUNEP. Sao Paulo, Brasil.
- Miller, F.C. 1993. Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. pp. 515-543. *In*: Metting Jr., B. (ed.). *Soil microbial ecology*. Marcel Dekker. New York.
- Paul, E.A.E. y F.E. Clark. 1996. *Soil microbiology and biochemistry*. 2ª edición. Academic Press. San Diego, CA.
- Quintero-Lizaola, R., R. Ferrera-Cerrato, J.D. Etchevers-Barra, N.E. García-Calderón, R. Rodríguez-Kábana, G. Alcantar-González y A. Aguilar-Santelises. 2000. Vermicomposteo, composteo y su dinámica microbiana. pp. 417-425. *In*: Quintero-Lizaola, R., T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta y N.E. García-Calderón (eds.). *La Edafología y sus perspectivas al Siglo XXI*. Tomo I. Colegio de Postgraduados-Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Autónoma Chapingo. México, D.F.
- Reinecke, A.J., S.A. Viljoen y R.J. Saayman. 1992. The suitability of *Eudrilus eugeniae*, *Perionyx excavatus* and *Eisenia fetida* (Oligochaeta) for vermicomposting in Southern Africa in terms of their temperature requirements. *Soil Biol. Biochem.* 24: 1295-1307.
- Robert, F.M. 1990. Impact of environmental factors on populations of soil microorganisms. *Am. Biol. Teacher* 52: 364-369.
- Rodríguez-Macias, R., J. Álvarez-de la Cuadra y S. Pascoe. 1999. Utilización de sustratos obtenidos a partir de residuos de la industria tequilera para la propagación de plantas de ornato de la Familia *Crassulaceae*. *NAKARI* X-2: 39-41.
- Rodríguez-Sanfuentes, J. 1993. *La fertilización de los cultivos, un método racional*. Colección en Agricultura, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- SAS Institute Inc. 1999. Software Version 8 (TS MO), licensed to Personal Computing Center, WSU, Site 0009142001. Cary, NC.
- Subba Rao, N.S. 1993. *Biofertilizer in agriculture*. Oxford & IBH. New Delhi, India.
- Suyama, K., H. Yamamoto, T. Naganawa, T. Iwata y H. Komada. 1993. A plate count method for aerobic cellulose decomposers in soil by Congo red staining. *Soil Sci. Plant Nutr.* 39: 361-365.

Tomlin, A.D. y J.J. Miller. 1980. Development and fecundity of the manure worm, *Eisenia foetida* (Annelida: Lumbricidae), under laboratory conditions. Syracuse. New York.

Wollum II, A.G. 1982. Cultural methods for soil microorganisms. pp. 781-802. *In*: Methods of soil analysis. Agronomy 9. Part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI.

CRECIMIENTO DE JITOMATE Y CALIDAD DE FRUTOS CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE NITRATO

Tomato Growth and Fruit Quality under Various Nitrate Levels

Edilberto González-Raya¹, Adalberto Benavides-Mendoza^{1†}, Homero Ramírez¹,
Valentín Robledo-Torres¹, Ratikanta Maiti², Alfonso Reyes-López¹,
Antonio Francisco Aguilera-Carbo³, Laura Olivia Fuentes-Lara³ y
Rosa Elia Margarita Hernández-Valencia¹

RESUMEN

El presente estudio se desarrolló con el objetivo de determinar el efecto de la concentración de nitrato en la solución nutritiva sobre la calidad nutricional del fruto así como sobre el crecimiento y acumulación de nutrimentos minerales de dos cultivares de jitomate: uno, tipo bola (cultivar Winner), y otro, saladette (cultivar Yaqui). Se utilizó un sistema de cultivo sin suelo con peat moss como sustrato y se aplicaron soluciones nutritivas con 34, 79, 124 y 169 mg L⁻¹ de N (150, 350, 550 y 750 mg L⁻¹ de NO₃⁻) con un diseño factorial con arreglo de tratamientos completamente al azar con 10 repeticiones. Se determinaron la producción total de fruto por planta y el peso fresco y seco de tallos, hojas, frutos y raíces. Asimismo, se obtuvo la concentración de N, P, Ca, Mg, Cu, Zn y Fe en los tejidos vegetativos de la planta. En el fruto se determinaron los mismos minerales, así como la concentración de almidón, azúcares totales y azúcares reductores. Los resultados indicaron que la producción de fruto por planta al aplicar la solución nutritiva con 79 mg L⁻¹ de N no fue diferente a la obtenida con 124 ó 169 mg L⁻¹. En cuanto al peso fresco y seco de las partes aéreas, se obtuvo el mismo resultado observado para el rendimiento. Las diferentes concentraciones de N no modificaron el peso de la raíz. A excepción de la concentración de N, que aumentó al elevarse la concentración de N en la solución nutritiva, no se observaron cambios en la

concentración de minerales en los tejidos vegetativos y de la fruta. Las diferentes concentraciones de N en la solución nutritiva no originaron modificaciones significativas en las cantidades de almidón y azúcares en el fruto.

Palabras clave: nitrógeno, fertilización, *Lycopersicon esculentum Mill.*, hidroponía.

SUMMARY

This study was carried out to determine the effect of nitrate concentration in fertilizer solution on fruit nutritional quality, plant growth, and mineral content in shoots and roots of two tomato cultivars (Winner and Yaqui) grown in peat moss. N concentrations of 34, 79, 124, and 169 mg L⁻¹ (corresponding to NO₃⁻ concentrations of 150, 350, 550, 750 mg L⁻¹) were evaluated in terms of plant response under a completely randomized factorial design with 10 replications. Fruit yield, fresh weight, and dry matter of leaves, stems, roots and fruits were determined. In addition, the content of N, P, Ca, Mg, Cu, Zn, and Fe in leaves and root tissues was evaluated. Also, mineral and carbohydrate content in fruit tissues was determined. The results indicated that highest fruit production occurred at N concentration of 79 mg L⁻¹; no differences were found with N concentrations of 124 and 169 mg L⁻¹. The highest shoot and fruit fresh weight and dry matter were obtained with 79 mg L⁻¹ N. On the other hand, with exception of N in leaf and fruit tissues, which rises with increases of N fertilization, no changes were observed in the concentration of the other mineral nutrients in leaf and fruit tissues. There was no significant effect of N on the accumulation of starch and sugars in the fruit.

Index words: nitrogen, plant fertilization, *Lycopersicon esculentum Mill.*

¹ Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, 25315 Saltillo, Coahuila, México.

[†] Autor responsable (abenmen@prodigy.net.mx)

² Departamento de Biología y Química, Universidad de las Américas, 72820 Cholula, México.

³ Departamento de Nutrición y Alimentos, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

INTRODUCCIÓN

El nitrato (NO_3^-) es la principal fuente de nitrógeno (N) para la mayoría de las especies cultivadas. El nitrato es, además, un compuesto señalizador (Trewavas, 1983) que regula el metabolismo del carbono (Scheible *et al.*, 1997a; Stitt, 1999), la homeostasis hídrica y la turgencia celular (Seginer *et al.*, 1998; Cárdenas-Navarro *et al.*, 1999), modifica la morfogénesis de las plantas (Scheible *et al.*, 1997b; Zhang y Forde, 2000) y cambia la absorción y acumulación de otros elementos minerales (He *et al.*, 1999). Este papel dual de la molécula de NO_3^- , como nutrimento y compuesto señalizador, debe tomarse en cuenta, tanto al planificar la concentración, como a la oportunidad de aplicación de un fertilizante que aporte nitrato.

Cuando se cultiva en suelo, el N puede aportarse en forma de nitrato o amonio (NH_4^+). En cambio, al utilizar sistemas hidropónicos o semihidropónicos, es recomendable utilizar el nitrato como única fuente o fuente principal de N en la solución nutritiva (Kafkafi, 1990; Duffy y Défago, 1999). Tanto el déficit como el exceso de nitrato tienen un impacto negativo sobre las plantas disminuyendo la producción de fruto (He *et al.*, 1999), aumentando la susceptibilidad a los insectos plaga (Jauset *et al.*, 2000) y a los patógenos (Duffy y Défago, 1999), o bien, afectando negativamente la calidad nutricional de los productos cosechados (Maynard *et al.*, 1976). Por ello, es importante definir la concentración de nitrato que se utilizará en una solución fertilizante, de tal forma que el valor seleccionado optimice en conjunto el crecimiento y vigor de la planta, la producción total de fruto, la calidad sensorial y nutricional del fruto, así como la vida de poscosecha del mismo.

Un componente importante de la calidad nutricional y del sabor del fruto del jitomate es el contenido de carbohidratos. Esto hace deseable el lograr manipular la economía de los azúcares y almidones del fruto a través de diferentes estrategias (Schaffer *et al.*, 1999). Sin embargo, el estatus de carbohidratos del fruto es una función compleja de caracteres genéticos y ambientales. Se sabe que la concentración de nitrato en la solución nutritiva tiene impacto sobre la producción y acumulación de carbohidratos en los tejidos vegetativos (Seginer *et al.*, 1998). Sin embargo, se dispone de poca información que indique de que manera la disponibilidad de nitrato modifica la acumulación de azúcares y almidones en el fruto.

El estudio aquí reportado tuvo como objetivo determinar el efecto de la concentración de nitrógeno aplicado en forma de nitrato en la solución nutritiva sobre el crecimiento, la producción de fruto, acumulación de minerales en los tejidos vegetativos y acumulación de minerales y carbohidratos en el fruto de dos cultivares de jitomate, uno tipo bola y otro saladette, desarrollados en un sistema de cultivo sin suelo con turba canadiense como sustrato.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se realizó en un invernadero del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila, México durante el verano y otoño del 2000. El invernadero es de tipo colombiano, con cubierta de polietileno, ventilación zenital pasiva y cortinas móviles. Los dos cultivares de jitomate [*Lycopersicon esculentum* (L.) Mill.] utilizados fueron Winner (tipo bola) y Yaqui (tipo saladette), ambos con hábito de crecimiento determinado. Se utilizó como fuente de nutrimentos minerales una solución Douglas (1976) variando el contenido de N en 34, 79, 124 y 169 mg L^{-1} , correspondientes a 150, 350, 550 y 750 mg L^{-1} de nitrato (Cuadro 1) aplicado como KNO_3 y $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. La concentración en mg L^{-1} de los demás elementos fue P (5.61), K (47, 90, 133 y 175), Ca (48, 90, 133 y 176), Mg (2.47), S (22.06), Na (4.17), Fe (0.13), Mn (0.08), Zn (0.06), B (0.04), Cu (0.013) y Mo (0.0001).

Las semillas se sembraron en charolas germinadoras de poliestireno expandido con 200 cavidades y se utilizó turba canadiense (Sunshine 3) como sustrato. Las plántulas con cuatro hojas verdaderas se trasplantaron el 5 de junio del 2000 en macetas de 20 L y se utilizó peat moss como sustrato. Las plantas se sometieron al manejo habitual de poda de formación a dos tallos, así como tutoreo, este último desde 30 días después del trasplante (ddt). El manejo fitosanitario fue el normalmente utilizado para el jitomate de invernadero, siguiendo las indicaciones de los fabricantes de cada producto utilizado. La fertilización postrasplante se realizó con las soluciones nutritivas Douglas, ya descritas, que aportaron distintas concentraciones de nitrato a las plantas. Dichas soluciones se aplicaron dos veces por semana, añadiendo 1.5 L por maceta en la etapa vegetativa y 2.5 L por maceta en floración y producción de fruto. En caso de requerirse, se

Cuadro 1. Concentración de nitrato y nitrógeno en cada solución nutritiva y algunas propiedades químicas de las mismas. Las fuentes de N son nitrato de calcio y nitrato de potasio.

Solución	Concentración de NO ₃ ----- mg L ⁻¹ -----	Concentración de N	pH	Conductividad eléctrica dS m ⁻¹	Relación Ca/K
A	150	34	7.4 [†]	2.29	1.02
B	350	79	7.31	2.90	1.01
C (Testigo)	550	124	7.22	3.28	1.00
D	750	169	7.43	3.96	1.01

[†] El pH del extracto 2:1 de la turba canadiense fue de 4.5. El contenido de N en la turba fue de 0.404%.

aplicaron de uno a dos riegos complementarios por semana únicamente con agua añadiendo 1.5 L por maceta.

El diseño experimental utilizado fue factorial de 4 x 2 con una distribución de tratamientos completamente al azar con 10 repeticiones, cada maceta (planta) fue una unidad experimental. Se realizó una prueba de medias (Tukey) para jerarquizar los tratamientos. También se añadieron plantas orilleras en maceta con el objetivo de amortiguar las diferencias en la humedad relativa entre las plantas. Las variables evaluadas fueron:

Variables Morfológicas

Varias veces se midieron la altura de las plantas de la base al ápice del tallo, el diámetro del tallo a 2 cm de altura sobre la corona, el número de nudos desde la corona hasta la última bifurcación en el ápice del tallo principal. La evaluación y registro de estas variables comenzó a 24 ddt. Posterior al inicio de la floración, se contaron, asimismo, el número de racimos florales, el número de frutos amarrados por planta y el número total de frutos por planta realizando estas evaluaciones a 41, 56 y 90 ddt.

Rendimiento

Se determinó la cantidad de fruto producida por planta de septiembre a diciembre (96 a 180 ddt). Los frutos se cosecharon al llegar al punto de rayado, se contaron y se pesaron en una balanza granataria.

Peso de las Plantas y Análisis de Minerales

En las etapas vegetativa (37 ddt), posterior al inicio de floración (78 ddt) y al final de la cosecha (180 ddt) se seleccionaron por sorteo dos plantas de cada cultivar por tratamiento. En ellas, se determinó el

peso fresco y seco de las hojas, tallos, frutos y raíz. Esta última se lavó y se cribó cuidadosamente para separarla del sustrato en la maceta. Las muestras se secaron en una estufa a 60 °C hasta obtener peso constante para ser pesadas en una balanza analítica. Los análisis del contenido de nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), zinc (Zn) y cobre (Cu) se llevaron a cabo en los tejidos vegetativos aéreos (tallo + hojas), en el fruto y en la raíz, siguiendo los procedimientos de análisis de tejidos descritos por Fick *et al.* (1976). Para determinar el N, los tejidos secos se molieron y se pesaron para, posteriormente, someterse a digestión ácida con ácido sulfúrico a 200 °C. Para evaluar la concentración de N, se realizó un análisis microkjeldahl. Para los demás minerales, la digestión ácida de los tejidos se llevó a cabo con ácido nítrico y perclórico a la temperatura mencionada. La evaluación del P fue por medio de colorimetría con un fotocolorímetro Spectronic 20 Genesys. Para los otros elementos, la evaluación se realizó con un espectrofotómetro de absorción atómica 2380 de Perkin Elmer.

Contenido de Minerales y Carbohidratos en el Fruto

Se colectaron cuatro frutos en etapa de rayado en dos de las repeticiones de cada tratamiento y se congelaron inmediatamente a -5 °C. Ya congelados, los frutos se liofilizaron. Entonces, las muestras se analizaron en el laboratorio, corriendo dos repeticiones de cada una de ellas y se reportó el promedio de las mismas. Se usó la determinación colorimétrica de azúcares totales y almidón, siguiendo la técnica descrita por Dubois *et al.* (1956). Por su parte, los azúcares reductores se determinaron con la técnica descrita por Miller (1959).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables Morfológicas

El análisis de varianza no indicó diferencias significativas en la altura de planta y el diámetro del tallo para los factores variedad y concentración de N en la solución nutritiva. El número de nudos en el tallo principal, así como el número de frutos amarrados y frutos por planta sí mostraron diferencias para el factor N. En las dos últimas variables, el factor variedad (V) y la interacción variedad x N dieron lugar a diferencias significativas (Cuadro 2).

El promedio de frutos por planta aumentó significativamente al elevar la concentración de N de 34 a 79 mg L⁻¹, pero no mostró respuesta al elevarse a 124 ó 169 mg L⁻¹. La interacción V x N significativa fue debida a que la variedad Winner no mostró respuesta en el número promedio de frutos frente al incremento de N, mientras que la Yaqui sí lo hizo.

Rendimiento

El mayor rendimiento se obtuvo usando la solución con 79 mg L⁻¹ N (Cuadro 2). El mismo efecto se observó en el jitomate cultivado en suelo (Andersen *et al.*, 1999), así como en jitomate cultivado en sustrato inerte (Gómez-Hernández y Sánchez-del Castillo, 2003), por lo que parece ser una manifestación general frente al valor de N e independiente del sistema de producción. El hecho de que al aumentar la concentración de N no se obtuviera

un mayor rendimiento fue también reportado por He *et al.* (1999) quienes encontraron que el mayor aporte de nitrato al jitomate cultivado en otoño e invierno se traduce en menor número de frutos amarrados y menor rendimiento comercial. Asimismo, Jauset *et al.* (2000), aunque no indicaron la producción de fruto, reportaron que incluso valores tan bajos como 84 mg L⁻¹ de nitrato en la solución nutritiva no indujeron síntomas de deficiencia de N en plantas de jitomate bola cultivados en sustrato inerte. Los resultados en este trabajo indican que es posible disminuir la concentración de N en la solución nutritiva, hasta llegar a un valor ubicado entre 34 y 79 mg L⁻¹, sin afectar sensiblemente la producción de jitomate cultivado en sustrato de turba en el período de verano y otoño. Esta disminución en el nitrato puede implicar menor costo de fertilización, así como menor aporte de nitrato residual a los mantos freáticos.

Peso Fresco y Seco

Se observó una respuesta significativa en el aumento del peso de las partes aéreas de la planta, al elevar el N en la solución nutritiva de 34 a 79 mg L⁻¹ (Cuadro 3). Concentraciones mayores no resultaron en incremento significativo del peso. El peso de la raíz no cambió significativamente al variar la concentración de N en la solución nutritiva. En el jitomate, la cantidad de biomasa seca aérea vegetativa depende de la radiación interceptada (Andriolo *et al.*, 1998) y, a su vez, esta eficiencia en la captura de radiación es función del área foliar y de la

Cuadro 2. Producción de fruto y valores promedio en las variables morfológicas en dos cultivares de jitomate con diferentes concentraciones de N en la solución nutritiva.

Factor	Rendimiento kg planta ⁻¹	Altura [†] ----- cm -----	Diámetro del tallo [†]	No. de nudos [†]	Frutos amarrados [‡]	Frutos por planta [‡]
Variedad (V)						
Winner	6.78	61.32	1.92	12.58	16.43	16.24
Yaqui	6.10	59.51	1.35	12.25	23.37	23.71
N (mg L ⁻¹)						
34	5.26 b [§]	59.73 a	1.03 a	12.20 b	17.56 b	17.26 b
79	7.39 a	60.01 a	1.41 a	12.36 ab	19.92 ab	20.51 ab
124	6.23 ab	60.46 a	2.31 a	12.23 b	19.94 ab	20.03 ab
169	6.88 ab	62.26 a	1.53 a	12.88 a	22.19 a	22.01 a
DMS	2.12	2.60	1.30	0.62	4.70	4.50
Significancia						
Variedad	NS	NS	NS	NS	.01	.01
N	NS	NS	NS	.05	.05	.01
V x N	NS	NS	NS	NS	.01	.01

[†] Es el valor medio de seis muestras. [‡] Es el valor medio de tres muestras. [§] Medias dentro de columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). NS = no significativo

Cuadro 3. Valores promedio del peso seco en dos cultivares de jitomate con diferentes concentraciones de N en la solución nutritiva.

Factor	Peso seco de hojas y tallos ¹	Peso seco de los frutos ¹	Peso seco de la raíz ¹
	----- g planta ⁻¹ -----		
Variedad (V)			
Winner	164.02	117.61	13.89
Yaqui	140.88	120.28	13.88
N (mg L ⁻¹)			
34	88.10 b [§]	73.30 b	13.03 a
79	145.88 a	115.38 ab	14.21 a
124	196.37 a	159.84 a	13.53 a
169	179.44 a	127.28 ab	14.76 a
DMS	58.01	80.54	2.01
Significancia			
Variedad	NS	NS	NS
N	.01	.01	NS
V x N	NS	NS	NS

¹ Es el valor medio de tres muestreos. [†] Es el valor medio de dos muestreos. [§] Medias dentro de columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). NS = no significativo.

concentración de N en las hojas (Verhoeven *et al.*, 1997).

En cuanto al peso seco de los frutos, esta variable mostró el promedio más alto con la solución que contenía 124 mg L⁻¹ de N. Andriolo *et al.* (1998) describieron una respuesta análoga en jitomates tipo bola sin poda de tallos secundarios, pero en ese caso para el reparto selectivo de biomasa entre la fruto y el tallo+hojas (es decir, el cociente del peso seco del fruto y el peso seco aéreo total). Los mismos autores indicaron un valor cercano a 40% de la biomasa seca

aérea total en los frutos, los datos del presente estudio indican que el fruto contabilizó de 41 a 45% (según los datos del Cuadro 3) de la biomasa seca aérea total, mostrando un valor parecido de eficiencia de reparto.

Contenido de Minerales

Se encontraron diferencias significativas entre las soluciones nutritivas para el contenido de N en los tejidos. Para los restantes elementos no se observaron diferencias.

La concentración de N total en los tejidos foliares aumentó en conformidad con la disponibilidad de NO₃ en la solución nutritiva (Cuadro 4), respuesta ya descrita por Darnell y Stutte (2001). En cambio, el contenido de N en el fruto (Cuadro 5) mostró el valor máximo en la solución nutritiva con 124 mg L⁻¹ de N. En la raíz, las diferencias en el contenido de N no fueron significativas.

Los valores descritos de concentración de N total en los tejidos foliares del jitomate se encontraron dentro de los intervalos normales para esta especie. Darnell y Stutte (2001) reportaron resultados de N total en distintos tejidos de plantas de fresa desarrolladas en hidroponía con soluciones nutritivas con valores similares de nitrato. Los autores encontraron prácticamente las mismas tendencias que las aquí descritas para el jitomate, si bien los valores de acumulación de N en los tejidos, sobre todo en el fruto, fueron más bajos en las plantas de fresa.

Cuadro 4. Valores (promedio de tres muestreos) de concentración de minerales en los tejidos foliares de dos cultivares de jitomate con diferentes concentraciones de nitrógeno en la solución nutritiva.

Factor	N	P	Ca	Mg	Cu	Zn	Fe
	----- % -----						
Variedad (V)							
Winner	2.97	0.26	4.85	0.37	18.03	165.54	102.25
Yaqui	3.18	0.28	4.65	0.35	20.83	149.25	88.79
N (mg L ⁻¹)							
34	2.78 b [†]	0.32 a	4.69 a	0.37 a	16.33 a	156.42 a	77.83 a
79	2.88 b	0.26 a	4.22 a	0.36 a	19.08 a	147.42 a	98.67 a
124	3.11 ab	0.27 a	4.93 a	0.35 a	22.08 a	170.50 a	108.50 a
169	3.54 a	0.24 a	5.17 a	0.37 a	20.33 a	155.25 a	97.08 a
DMS	0.65	0.09	0.98	0.03	7.8	27.01	35.0
Significancia:							
Variedad	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N	.01	NS	NS	NS	NS	NS	NS
V x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

[†] Medias dentro de columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). NS = no significativo.

Cuadro 5. Valores (promedio de tres muestreos) de concentración de minerales en los tejidos del fruto de dos cultivares de jitomate con diferentes concentraciones de nitrógeno en la solución nutritiva.

Factor	N	P	Ca	Mg	Cu	Zn	Fe
Variedad (V)							
Winner	3.07	0.40	0.81	0.14	5.19	89.06	53.31
Yaqui	2.93	0.33	0.75	0.13	5.31	100.69	34.75
N (mg L ⁻¹)							
34	2.72 b [†]	0.39 a	0.89 a	0.13 a	5.88 a	74.00 a	28.88 a
79	3.04 ab	0.36 a	0.75 a	0.12 a	3.13 a	118.38 a	68.63 a
124	3.32 a	0.39 a	0.73 a	0.14 a	6.88 a	90.88 a	35.25 a
169	2.93 ab	0.33 a	0.75 a	0.13 a	5.13 a	96.25 a	43.38 a
DMS	0.59	0.08	0.21	.03	4.02	47.00	42.30
Significancia:							
Variedad	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N	.05	NS	NS	NS	NS	NS	NS
V x N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

[†] Medias dentro de columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). NS = no significativo.

Contenido de Carbohidratos en el Fruto

Una vez que los fotosintatos llegan hacia los sitios de utilización vía el pedúnculo del fruto, la forma química que adquieren (almidón o azúcares hexosas libres de diversos tipos), el balance relativo almidón/azúcares y la concentración de los mismos depende del metabolismo del carbono del fruto, por lo cual se espera que cualquier factor que modifique la actividad de las enzimas del metabolismo del carbono cambie asimismo la composición del fruto (Schaffer *et al.*, 1999). Es conocido que en el fruto maduro de jitomate, hasta 50% del peso seco consiste de glucosa y fructosa más una pequeña cantidad (~5%) de sacarosa (Walker y Ho, 1977; Davies y Hobson, 1981). Los resultados aquí reportados (Cuadro 6) indican que, en la etapa de rayado del fruto, el contenido de azúcares es aún muy bajo, mientras que el valor de almidón es alto.

Se ha reportado una relación inversa entre el contenido de N como nitrato libre en los tejidos y los valores de azúcares solubles en las plantas (Seginer *et al.*, 1998). Asimismo, los valores altos de nitrato en la solución nutritiva incrementan el contenido de aminoácidos y disminuyen el de sacarosa en *Beta vulgaris* (Winzer *et al.*, 1996). Sin embargo, en el fruto de jitomate, la mayor disponibilidad de nitrato en la solución nutritiva no disminuyó la concentración de almidón y azúcares (Cuadro 6), a pesar de que la concentración de N aumentó en el fruto al incrementar la disponibilidad de este elemento en la solución nutritiva.

La síntesis de almidón en el fruto de jitomate se presenta a una tasa constante durante todo el desarrollo del fruto y es dependiente del aporte absoluto y de la tasa de aporte de fotosintatos (N'tchobo *et al.*, 1999). Dicho almidón disminuye en concentración al madurar el fruto y se supone que funciona como almacén para la posterior síntesis de azúcares solubles, por lo cual se ha recomendado que el manejo agronómico y la selección de cultivares contemplen la habilidad para acumular gran cantidad de almidón en las etapas tempranas de crecimiento del

Cuadro 6. Valores promedio del contenido de carbohidratos en el fruto (% del peso seco) en dos cultivares de jitomate con diferentes concentraciones de nitrógeno en la solución nutritiva. Los datos corresponden a dos repeticiones en el invernadero.

Factor	Almidón	Azúcares reductores	Azúcares totales
Variedad			
Winner	48.63	0.07	9.06
Yaqui	34.33	0.12	19.51
N (mg L ⁻¹)			
34	36.31 a [†]	0.08 a	10.54 a
79	38.82 a	0.10 a	20.10 a
124	40.16 a	0.09 a	15.34 a
169	50.64 a	0.13 a	11.14 a
DMS	18.0	0.07	11.55
Significancia			
Variedad	NS	NS	NS
N	NS	NS	NS
V x N	NS	NS	NS

[†] Medias dentro de columnas con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). NS = no significativo

fruto (Schaffer y Petreikov, 1997). Sin embargo, al menos para la etapa de rayado de la fruta en los cultivares utilizados, los resultados en este estudio indican poca relación entre la acumulación de almidón y la concentración de azúcares.

CONCLUSIONES

- Al aplicar soluciones nutritivas con diferente concentración de N, no se encontraron diferencias para la altura y el diámetro del tallo. En cambio, el número de frutos amarrados, el número total de frutos por planta y el rendimiento se modificaron significativamente, encontrándose el mismo rendimiento al aplicar una solución con 79 mg L⁻¹ de N que al aplicar una con 124 ó 169 mg L⁻¹.

- A excepción de la concentración de N, que aumentó al elevarse la concentración de N en la solución nutritiva, no se observaron cambios en la concentración de minerales en los tejidos vegetativos y de la fruta.

- Las diferentes concentraciones de N en la solución nutritiva no originaron modificaciones significativas en los valores de almidón y azúcares en el fruto.

LITERATURA CITADA

- Andersen, P.C., F.M. Rhoads, S.M. Olson y B.V. Brodbeck. 1999. Relationships of nitrogenous compounds in petiole sap of tomato to nitrogen fertilization and the value of these compounds as a predictor of yield. *HortScience* 34: 254-258.
- Andriolo, J.L., N.A. Streck, G.A. Buriol, L. Ludke y T.S. Duarte. 1998. Growth, development and dry-matter distribution of a tomato crop as affected by environment. *J. Hort. Sci. Biotech.* 73: 125-130.
- Cárdenas-Navarro, R., S. Adamowicz y P. Robin. 1999. Nitrate accumulation in plants: A role for water. *J. Exp. Bot.* 50: 613-624.
- Darnell, R.L. y G.W. Stutte. 2001. Nitrate concentration effects on NO₃-N uptake and reduction, growth, and fruit yield in strawberry. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 125: 560-563.
- Davies, J.N. y G.E. Hobson. 1981. The constituents of tomato fruit: The influence of environment, nutrition and genotype. *CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 15: 205-280.
- Douglas, J.S. 1976. *Advanced guide to hydroponics*. Drake Publishers. New York.
- Dubois, M., K.A. Guilles, J.K. Hamilton, P.A. Rebers y F. Smith. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.* 28: 530.
- Duffy, B.K. y G. Défago. 1999. Macro- and microelement fertilizers influence the severity of *Fusarium* crown and root rot of tomato in a soilless production system. *HortScience* 34: 287-291.
- Fick, K.R., S.M. Miller, J.D. Funk, L.R. McDowell y R.H. Houser. 1976. *Methods of mineral analysis for plant and animal tissues*. University of Florida. Gainesville, FL.
- Gómez-Hernández, T. y F. Sánchez-del Castillo. 2003. Soluciones nutritivas diluidas para la producción de jitomate a un racimo. *Terra* 21: 57-63.
- He, Y., S. Terabayashi, T. Asaka y T. Namiki. 1999. Effect of restricted supply of nitrate on fruit growth and nutrient concentration in the petiole sap of tomato cultured hydroponically. *J. Plant Nutr.* 22: 799-811.
- Jauset, A.M., M.J. Sarasúa, J. Avilla y R. Albajes. 2000. Effect of nitrogen fertilization level applied to tomato on the greenhouse whitefly. *Crop Protection* 19: 255-261.
- Kafkafi, U. 1990. Root temperature, concentration and the ratio NO₃/NH₄ effect on plant development. *J. Plant Nutr.* 13: 1291-1306.
- Maynard, D.N., A.V. Barker, P.L. Minotti y N.H. Peck. 1976. Nitrate accumulation in vegetables. *Adv. Agron.* 28: 71-118.
- Miller, G.L. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugars. *Anal. Chem.* 31: 426-428.
- N'tchobo, H., N. Dali, B. Nguyen-Quoc, C.H. Foyer y S. Yelle. 1999. Starch synthesis in tomato remains constant throughout fruit development and is dependent on sucrose supply and sucrose synthase activity. *J. Exp. Bot.* 50: 1457-1463.
- Schaffer, A.A. y M. Petreikov. 1997. Sucrose-to-starch metabolism in tomato fruit undergoing transient starch accumulation. *Plant Physiol.* 113: 739-746.
- Schaffer, A.A., M. Petreikov, D. Miron, M. Fogelman, M. Spiegelman, Z. Bnei-Moshe, S. Shen, D. Granot, R. Hadas, N. Dai, I. Levin, M. Bar, M. Friedman, M. Pilowsky, N. Gilboa y L. Chen. 1999. Modification of carbohydrate content in developing tomato fruit. *HortScience* 34: 1024-1027.
- Scheible, W.R., A. Gonzalez-Fuentes, M. Lauerer, B. Muller-Rober, M. Caboche y M. Stitt. 1997a. Nitrate acts as a signal to induce organic acid metabolism and repress starch metabolism in tobacco. *Plant Cell* 9: 1-17.
- Scheible, W.R., M. Lauerer, E.D. Schulze, M. Caboche y M. Stitt. 1997b. Accumulation of nitrate in the shoot acts as a signal to regulate shoot-root allocation in tobacco. *Plant J.* 11: 671-691.
- Seginer, I., F. Buwalda y G. Van Straten. 1998. Nitrate concentration in greenhouse lettuce: A modeling study. *Acta Hort.* 456: 189-197.
- Stitt, M. 1999. Nitrate regulation of metabolism and growth. *Curr. Op. Plant Biol.* 2: 178-186.
- Trewavas, A.J. 1983. Nitrate as a plant hormone. pp. 97-110. *In*: Jackson, M.B. (ed.). *British plant growth regulator group monograph 9*. British Plant Growth Regulator Group. Oxford UK.
- Verhoeven, A.S., B. Demmig-Adams y W.W. Adams III. 1997. Enhanced employment of the xanthophylls cycle and thermal energy dissipation in spinach exposed to high light and N stress. *Plant Physiol.* 113: 817-824.
- Walker, A.J. y L.C. Ho. 1977. Carbon translocation in the tomato: Carbon import and fruit growth. *Ann. Bot.* 41: 813-823.
- Wang, F., A. Sanz, M.L. Brenner y A.G. Smith. 1993. Sucrose synthase, starch accumulation and tomato fruit sink strength. *Plant Physiol.* 101: 321-327.
- Winzer, T., G. Lohaus e H. Heldt. 1996. Influence of phloem transport, N-fertilization and ion accumulation on sucrose storage in the taproots of fodder beet and sugar beet. *J. Exp. Bot.* 47: 863-870.
- Zhang, H. y B.G. Forde. 2000. Regulation of *Arabidopsis* root development by nitrate availability. *J. Exp. Botany* 51: 51-59.

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS DE LLUVIAS MÁXIMAS CON FINES DE DRENAJE SUPERFICIAL LOCAL, TABASCO, MÉXICO

Analysis of Frequencies of Maximum Rainfalls for Local Surface Drainage, Tabasco, Mexico

P.M. Coras-Merino^{1†}, R. Arteaga-Ramírez¹ y M. Vázquez-Peña¹

RESUMEN

En los problemas de drenaje de las zonas húmedas, la lluvia constituye el factor climático principal que, unido a las condiciones de suelo y topografía, provocan el encharcamiento de los terrenos agrícolas y, en muchos casos, la pérdida de las cosechas. El análisis de la lluvia es de vital importancia para el diseño de los sistemas de drenaje. Por tal motivo, el trabajo tiene como objetivo, evaluar dos métodos de cálculo de las lluvias máximas y obtener las lluvias de diseño considerando el tiempo de tolerancia de inundación de los cultivos de chile, frijol, sorgo y pasto. El estudio se realizó en el área de Huimanguillo, Tabasco, y las lluvias diarias se obtuvieron de la estación meteorológica con Clave 27018 con un registro de 13 años. Definidas las lluvias máximas consecutivas de uno hasta cinco días, se calcularon los períodos de retorno y, con la función de distribución de probabilidad de Gumbel, Tipo I, en su forma gráfica, se elaboraron las curvas lámina-duración-frecuencia y, estableciendo los tiempos de drenaje de los cultivos, se determinaron las lluvias de diseño. Se encontró que las lluvias máximas de uno hasta cinco días varían de un método a otro, obteniéndose diferencias porcentuales en 42% para los valores medios, y 31% y 27.6% para los valores máximos. La comparación de ambos métodos dio como resultado que para el caso de cinco años de período de retorno la ecuación fue $y = 1.19x$ con $r = 0.9973$ y $S = 8.23$ mm y para 10 años de período de retorno la ecuación fue $y = 1.06x$ con $r = 0.9969$ y $S = 10.44$ mm, lo que indica que es posible utilizar ambos métodos. Las lluvias de diseño obtenidas para el período de retorno de 10 años fueron chile: 73.7 mm, frijol: 187.8 mm, sorgo: 236.4 mm y pasto: 302.9 mm.

Palabras clave: precipitación, lluvias de diseño, drenaje.

SUMMARY

In problems of drainage in wet regions, rain constitutes the principal climatic factor, which together with conditions of soil and topography, seriously affect agriculture. Analysis of rainfall is fundamental for the design of drainage systems. For this reason, this study was conducted to evaluate two methods of calculating maximum rainfalls and of obtaining design rainfall for four crops. The study was conducted in the area of Huimanguillo, Tabasco, Mexico. Daily rainfall was recorded at the meteorological station 27018, which has data recorded over 13 years. Maximum consecutive rainfalls were defined from one to five days, obtaining the periods and depth-duration-frequency curves from the distribution function of the Gumbel probability, Type I, in its graphic form. Also, design rainfalls were determined. It was found that the maximum rainfalls of one to five days vary with the different methods, obtaining percent differences of 42% for mean precipitation values, and 31 and 27.6% for maximum precipitation values. The comparison of the two methods revealed that for the case of a return period of five years, the equation is $y = 1.19x$, with $r = 0.9973$ and $S = 8.23$ mm, while for a period of 10 years, the equation is $y = 1.06x$, with $r = 0.9969$ and $S = 10.44$ mm, indicating that it is possible to use both methods. The design rainfalls obtained by the ILRI method for the 10-year return period were chili pepper: 73.7 mm, beans: 187.8 mm, sorghum: 236.4 mm, and grass: 302.9 mm.

Index words: precipitation, design rain, drainage.

INTRODUCCIÓN

Gran parte de la lluvia que cae durante una tormenta es interceptada y retenida por la cubierta vegetal y las depresiones del terreno como

¹ Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.1 Carretera México-Texcoco, 56230 Chapingo, estado de México.

[†] Autor responsable (mpcoras@correo.chapingo.mx)

almacenamientos superficiales. A medida que continúa el proceso, la superficie del suelo se cubre de una capa delgada, conocida como detención superficial, y el flujo comienza a moverse por gravedad y puede ser descrito por la ecuación de continuidad derivada del principio de conservación de la masa, y la ecuación dinámica (Yap, 1974).

Las características físicas de las lluvias: la cantidad, intensidad, duración, distribución y la velocidad terminal, están interrelacionadas entre sí. Sin embargo, la intensidad es la característica física de la lluvia más discutida y relevante (Hudson, 1981).

Villón (2001) definió la intensidad como la relación entre la cantidad de agua precipitada (P) y el tiempo (t) en que ésta cayó. Se expresa en lámina de agua precipitada por unidad de tiempo (mm h^{-1}). Esta característica de la lluvia y los factores pendiente del terreno, cobertura vegetal se utilizan para los cálculos de las dimensiones de canales de desagüe y en las obras de conservación de suelo.

La duración y la intensidad son importantes porque la escorrentía ocurre sólo después de exceder un cierto límite, es decir, cuando la intensidad de un chubasco excede la tasa de infiltración, o la intensidad y la duración de un chubasco exceden a la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (Aparicio, 1994).

Para la estimación de la escorrentía se recomiendan los métodos directos, a partir de la intensidad de la lluvia, pero en la mayoría de las áreas agrícolas sólo se cuenta con registros pluviométricos para el análisis de la lluvia en estas regiones y se utilizan métodos indirectos basados en la cantidad de lluvia caída.

El Soil Conservation Service (SCS, 1972) y Martínez (1986), en el análisis de las precipitaciones máximas, que en general se caracterizan por su alta intensidad y corta duración, se debe considerar su frecuencia, el período de duración y el valor de la lluvia acumulada. Estos tres factores se relacionan mediante curvas llamadas de frecuencia-duración-altura de lluvia.

La frecuencia de las lluvias es la repetitividad de eventos de características similares en intensidad y duración (CP, 1991). Cuanto más elevada sea una precipitación, se presentará con una menor frecuencia. En los proyectos de drenaje, se aceptan pérdidas en la producción agrícola total o parcial una vez cada cinco ó 10 años (ILRI, 1978). Para el diseño de drenaje superficial, se recomiendan períodos de retorno (T_r) de 10 años (Pizarro, 1985).

La lluvia de diseño se selecciona de acuerdo con la sensibilidad a la inundación del cultivo y se le denomina tiempo de drenaje (t_d), que viene a ser el tiempo en horas que el cultivo puede tolerar condiciones de inundación sin disminuir significativamente su rendimiento agrícola (FIRA, 1985).

Las zonas agrícolas de Tabasco son afectadas anualmente por inundaciones y niveles freáticos elevados, como consecuencia de fenómenos atmosféricos (precipitaciones frecuentes y de alta intensidad) y condiciones físicas de la zona, como: suelos con poca o nula pendiente y, en general, con drenaje natural no suficiente para evacuar los excesos de agua; originando con ellos inseguridad e inestabilidad en el desarrollo agrícola de la zona.

La presente investigación se realizó en el estado de Tabasco motivado por el interés de mejorar la productividad en los cultivos de chile, frijol, sorgo y pasto, planteándose los objetivos: a) Comparar las metodologías de obtención de las lluvias de diseño propuestas por el SCS (1972) y el International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI, 1978), es decir, el análisis de la lluvia máxima ocurrida durante todo el año y la lluvia máxima ocurrida en el período crítico, respectivamente. b) Encontrar las lluvias máximas con duración de uno, dos, tres, cuatro y cinco días consecutivos. c) Determinar las curvas profundidad-duración-frecuencia de lluvias máximas utilizando la función distribución de probabilidad de Gumbel Tipo I, procedimiento gráfico. d) Encontrar la lluvia acumulada consecutiva que no afecte la producción de los cultivos en estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del Área de Estudio

El estudio se realizó en las áreas agrícolas ubicadas en el municipio Huimanguillo, Tabasco. Se utilizó la información de la estación meteorológica con Clave 27018, localizada en $17^\circ 52' N$ y $93^\circ 28' O$, con una altitud promedio de 193 m y un registro histórico de 13 años, que se obtuvo de la base de datos ERIC, Versión 2.0 (IMTA, 1995). Para la selección del registro histórico se hizo una revisión de las precipitaciones hasta el 2002 y se optó por el período 1961-1974 por encontrarse los valores de lluvias diarios, confiables y consistentes, además, para ser congruentes con las exigencias de las

metodologías utilizadas para determinar las curvas lámina-duración-frecuencia. Para el caso del año 1971, no se reportaron mediciones de precipitaciones, por lo que se eliminó ese período. En esta zona, el clima se clasifica como cálido húmedo y lluvioso en verano y otoño (INEGI, 1999).

El suelo es de origen aluvial, encontrándose los Gleysoles, Vertisoles, Cambisoles, Fluvisoles y los Acrisoles, con velocidades de infiltración bajas, que varían entre 7.62 y 10.16 mm h⁻¹ y texturas arcillosas que dificultan el movimiento del agua en el perfil de suelo; además, las pendientes en el área de estudio son menores que 2%, lo que provoca acumulación de agua en la superficie del suelo.

Metodología de Cálculo

Se evaluó el método propuesta por el Soil Conservation Service (SCS, 1972) que selecciona la lluvia máxima consecutiva de uno hasta cinco días a partir del análisis de la lluvia caída durante cada año de la serie pluviométrica. Para lluvias de un día, se tomaron los valores máximos registrados de lluvia en un día en todo el año. Para el caso de dos a cinco días se utilizó el procedimiento de los totales móviles que no es mas que ir sumando consecutivamente los valores de lluvias para cada duración y escoger el máximo valor de lluvia calculado. El método propuesta por el ILRI (1978), se basa en la selección de la lluvia máxima anterior seleccionando el período crítico (mes más lluvioso) anual de la serie histórica, aplicándose los totales móviles para el mes más lluvioso. Después de seleccionados los valores de lluvias máximas, ambas metodologías siguen los mismos procedimientos y son los que se describen a continuación:

- Ordenar los (n) datos de precipitación (P) en orden decreciente.

- Asignar un número de orden (r) en la serie a cada valor (P_r, r = 1,2,3,...,n), siendo P₁ el valor más elevado, P_n el más bajo.

- Dividir el número de orden (r) entre el número total de observaciones más 1 para obtener la frecuencia de excedencia del modo siguiente:

$$F(P > P_r) = \frac{r}{n+1} \quad (1)$$

- Calcular la frecuencia de no excedencia

$$F(P \leq P_r) = 1 - F(P > P_r) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (2)$$

- Calcular el período de retorno (Tr) en años:

$$Tr = \frac{1}{F(P > P_r)} \quad (3)$$

Una vez calculado el Tr, se calcula la función de distribución de probabilidad de Gumbel Tipo I, en su forma gráfica y, para ello, se siguieron los siguientes pasos:

- Calcular la desviación típica de la distribución de Gumbel (α) como:

$$\alpha = \frac{S_n}{S_p} \quad (4)$$

Donde: S_n es la desviación típica de las variables reducidas, que depende sólo de n (en este estudio fue 0.9926) y S_p es la desviación típica de los n máximos de P_r.

- Calcular la moda de la distribución de Gumbel (u):

$$u = \bar{P}_n - \frac{\bar{y}_n}{\alpha} \quad (5)$$

Donde: \bar{P}_n es la media aritmética de los n máximos de P_r y \bar{y}_n es la media aritmética de n variables reducidas y que depende sólo de n (en este caso fue 0.5058), α es la desviación típica de la distribución de Gumbel.

- Sustituir los valores estimados anteriormente en la ecuación:

$$y = \alpha(P-u) \quad (6)$$

Donde: y es la variable reducida y P la lluvia, en mm.

- Representar como mínimo dos pares de valores (y, P) sobre el papel de probabilidad de Gumbel y unirlos para obtener la recta.

- Determinar los valores de lluvia para los períodos de retorno deseados.

Los procedimientos descritos se repiten para cada duración de la lluvia (uno hasta cinco días) y los resultados obtenidos de la función de distribución de

probabilidad Gumbel Tipo I se grafican para obtener la curva lámina-duración-frecuencia.

Para comparar los resultados obtenidos por ambas metodologías, se graficaron los valores de lluvias con periodos de retorno de cinco y 10 años y se ajustaron a una línea recta de la forma $y = ax$, obteniéndose los coeficientes de correlación (r) y el error estándar (S), así como la pendiente de la recta que da la variación en cuanto a la selección de las lluvias máximas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la Lluvia

Como se muestra en la Figura 1, hay dos períodos bien definidos, uno húmedo que ocurre desde junio hasta octubre cuando precipita 70% de la lluvia promedio anual (1357 mm) y, otro, seco desde noviembre hasta mayo con 30% (568 mm). En esta figura se observa que el mes más lluvioso es septiembre con 315.8 mm, seguido de octubre con 307.9 mm, mientras que el mes más seco corresponde a abril con 46.2 mm.

Evaluación de las Metodologías de Cálculo

Metodología propuesta por el SCS (1972). En el Cuadro 1, se presentan las lluvias máximas consecutivas de uno a cinco días para cada año, así como el período de retorno y la media de cada duración. Las diferencias porcentuales encontradas entre las lluvias máximas consecutivas fueron: 42% para las precipitaciones promedio, 31% en precipitaciones máximas y 30% en mínimas.

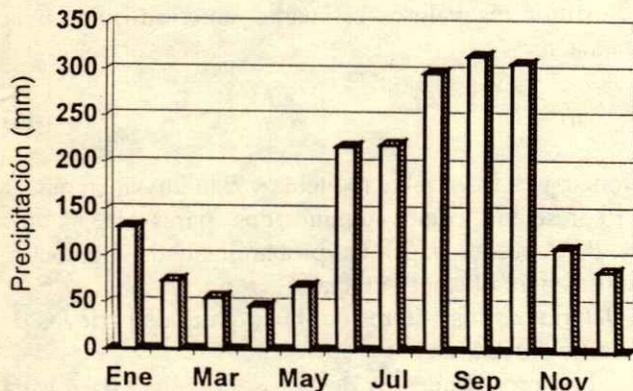


Figura 1. Comportamiento de la lluvia promedio mensual.

Las precipitaciones máximas, medias y mínimas tienden a incrementarse al agrupar los días consecutivos, dicha tendencia se encontró en el estudio realizado en la Estación Agua Blanca, Venezuela (Foremaiz, citado por Rojas, 1976).

Las precipitaciones máximas para un día tienen una gran variabilidad entre los años, ocurriendo cuatro de los 13 eventos de lluvias máximas diarias en el período seco, obteniéndose valores que varían entre 190.0 mm en enero de 1962 y 78.5 mm en julio de 1965. El valor máximo alcanzado es de 229.5 mm en septiembre de 1970.

Sin embargo, las precipitaciones máximas consecutivas para dos y tres días ocurrieron en septiembre de 1966 con valores de 225.0 y 315.0 mm, respectivamente, mientras que para duraciones de cuatro y cinco días las lluvias cayeron en agosto de 1962 con valores de 323.0 y 330.5 mm, respectivamente.

En el Cuadro 2 y en la Figura 2, se muestran las lluvias máximas (mm) de uno a cinco días consecutivos, obtenidas del procedimiento gráfico en el papel de probabilidad Gumbel Tipo I.

En el Cuadro 2, se observa que las variaciones de las precipitaciones máximas de un día para los periodos de retorno en estudio fueron de 33 mm entre cinco y 10 años, 23 mm para 10 y 20 años y de 56 mm entre cinco y 20 años. Para cinco días consecutivos, se encontraron diferencias de 53, 23 y 76 mm para cinco y 10 años, 10 y 20 años, y cinco y 20 años, respectivamente. Por lo tanto, al incrementar los periodos de retorno, se reducen las diferencias entre precipitaciones máximas consecutivas.

Metodología propuesta por el ILRI (1978). En el Cuadro 3, se presentan las lluvias máximas consecutivas de uno a cinco días del mes más crítico: septiembre, para la serie pluviométrica 1961-1974. Además, se muestran los valores promedio para cada duración y el período de retorno anual.

Al comparar las lluvias máximas para duraciones de uno a cinco días, se obtuvo una variación de 27.6%, siendo las diferencias porcentuales para los valores medios y mínimos de 41.7 y 51.8%, respectivamente. Las lluvias máximas y medias medidas tienen un porcentaje de variación muy similar en ambas metodologías, valores entre los que se encuentran los periodos de retorno recomendados para el diseño de los sistemas de drenaje. (Pizarro, 1985; Martínez, 1986).

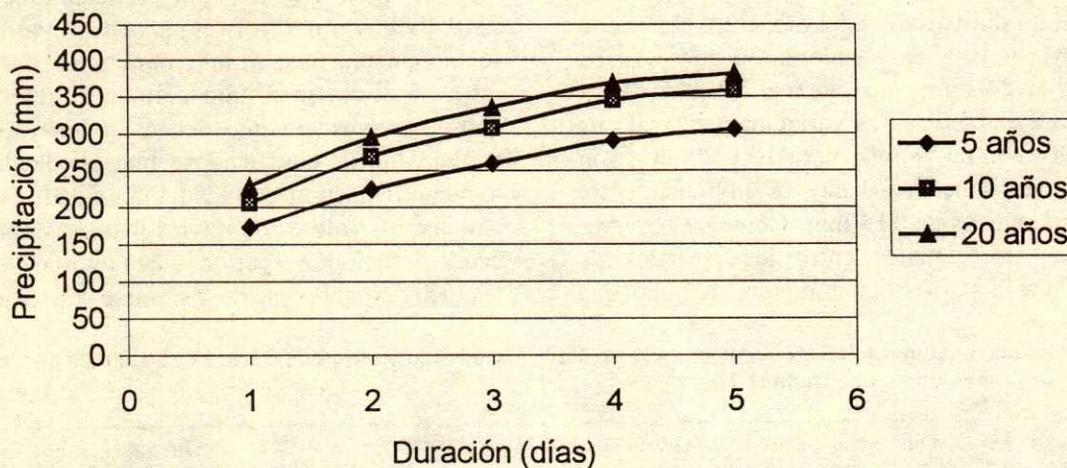
Cuadro 1. Lluvias máximas de uno a cinco días consecutivos y períodos de retorno (Tr). Método del Soil Conservation Service (SCS, 1972).

Año	1 día	Año	2 días	Año	3 días	Año	4 días	Año	5 días	Tr
	mm		mm		mm		mm		mm	
1970	229.5	1966	255.0	1966	315.0	1962	323.0	1973	330.5	14.0
1962	190.0	1970	254.0	1970	254.0	1966	317.0	1962	323.0	7.0
1969	173.0	1969	221.3	1974	248.5	1973	283.0	1966	317.0	4.7
1967	149.5	1962	213.0	1969	246.6	1969	281.6	1969	286.6	3.5
1966	138.0	1973	182.0	1973	240.0	1974	257.5	1970	261.4	2.8
1972	127.5	1974	181.5	1962	219.0	1970	256.5	1974	257.5	2.3
1974	126.5	1972	181.0	1972	181.5	1972	199.5	1961	213.5	2.0
1973	107.0	1967	151.9	1961	158.5	1961	175.0	1972	199.5	1.7
1961	106.0	1961	140.5	1967	151.9	1967	154.4	1967	164.0	1.5
1964	99.0	1964	118.0	1968	131.5	1964	140.3	1965	161.5	1.4
1968	88.0	1965	110.0	1964	131.0	1965	138.5	1964	148.3	1.3
1963	82.5	1963	97.0	1965	116.5	1968	131.5	1968	140.5	1.2
1965	78.5	1968	88.0	1963	101.0	1963	110.0	1963	112.0	1.1
Media	130.4		168.7		191.9		212.9		224.2	

Cuadro 2. Lluvias máximas para cada duración y período de retorno. Método del Soil Conservation Service (SCS, 1972).

Tr	1 día	Dif (%)	2 días	Dif (%)	3 días	Dif (%)	4 días	Dif (%)	5 días	Dif (%)
	mm		mm		mm		mm		mm	
5	172.7		223.5		259.1		289.6		304.8	
10	205.7	16.04 (33)	269.2	16.98 (45.7)	307.3	15.70 (48.2)	345.44	16.18 (55.84)	358.14	14.89 (55.34)
20	228.6	10.00 (22.9)	294.6	8.62 (25.4)	335.28	8.33 (27.98)	368.3	6.21 (22.86)	381.0	6.00 (22.86)

Tr = período de retorno; Dif = diferencia en porcentaje.

**Figura 2. Curvas lámina-duración-frecuencia. Método del Soil Conservation Service (SCS, 1972).**

Cuadro 3. Lluvias máximas de duración 1, 2, 3, 4 y 5 días consecutivos para el mes crítico; Septiembre.

Año	1 día	Año	2 días	Año	3 días	Año	4 días	Año	5 días	Tr
	mm		mm		mm		mm		mm	
1970	229.5	1966	255.0	1966	315.0	1966	317.0	1966	317.0	14.0
1969	173.3	1970	254.0	1970	254.0	1969	281.6	1969	286.6	7.0
1966	138.0	1969	221.3	1974	248.0	1974	257.0	1970	261.4	4.7
1974	126.0	1974	181.0	1969	246.6	1970	256.5	1974	257.0	3.5
1964	85.5	1964	90.5	1967	124.0	1967	136.3	1967	149.8	2.8
1962	66.0	1967	84.0	1962	102.0	1962	120.0	1962	120.0	2.3
1963	55.0	1962	70.0	1964	94.5	1961	101.0	1961	101.6	2.0
1967	48.5	1963	64.5	1961	83.0	1964	98.0	1964	101.0	1.7
1961	45.0	1961	63.5	1963	73.0	1963	76.5	1963	80.5	1.5
1965	43.0	1965	43.0	1965	47.5	1965	47.5	1965	50.0	1.4
1968	26.5	1968	32.5	1973	40.0	1973	42.0	1973	50.0	1.3
1972	26.5	1973	32.0	1968	39.0	1968	41.0	1972	42.0	1.2
1973	20.0	1972	29.0	1972	29.5	1972	40.5	1968	41.5	1.1
Media	83.3		109.2		130.5		139.6		142.9	

Tr = período de retorno.

Las lluvias máximas diarias tienen una variación de 209.5 mm, siendo el valor mayor de 229.5 mm precipitada en 1970. Para el caso de duraciones de dos hasta cinco días, éstas alcanzaron valores máximos de 255.0, 315.0, 317.0 y 317.0 mm, las cuales ocurrieron en 1966.

Al igual que para el método del SCS (1972), se calcularon las lluvias máximas para duraciones desde uno hasta cinco días. En el Cuadro 4 y en la Figura 3, se muestran los valores obtenidos según la distribución de probabilidad de Gumbel Tipo I, en su forma gráfica. Además, se muestran las diferencias porcentuales entre los períodos de retorno para cada duración de la lluvia.

Al analizar el Cuadro 4, se observa que las lluvias máximas para un día varían en 54 mm entre el período de retorno cinco y 10 años, siendo de 30 mm para 10 y 20 años y de 84 mm para cinco y 20 años. Para duración igual a cinco días, las variaciones entre Tr de cinco y 10 años son de 78 mm, para 10 y 20 años son de 41 mm, y para cinco y 20 años la diferencia entre las lluvias máximas es de 119 mm. Como se observa, las diferencias porcentuales entre los períodos de retorno disminuyen para cada duración, al igual que

ocurre para cada Tr entre uno y cinco días consecutivos.

Comparación entre las metodologías. En las Figuras 4 y 5, se presenta la comparación de los métodos de SCS (1972) y ILRI (1978) para los períodos de retorno cinco y 10 años. En el caso de Tr igual a cinco años se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.9973 y error estándar de 8.23 mm, lo que demuestra el buen ajuste de los datos a la ecuación de la recta modelada ($y = ax$), siendo el intercepto con el eje e igual a 0 y la pendiente 1.194. Esto demuestra que los valores obtenidos por ambas metodologías se distribuyen muy próximos a la recta $y = x$ que sería la condición ideal.

Para Tr igual a 10 años, el coeficiente de correlación es de 0.9969 y el error estándar de 10.44 mm, aunque se incrementó este último parámetro estadístico con respecto al obtenido para período de retorno de cinco años; se considera que existe un buen ajuste con el modelo lineal, obteniéndose una pendiente de 1.061, lo que refleja su proximidad a la unidad.

Aunque los valores de lluvias máximas obtenidos para cada duración y período de retorno varían entre las metodologías, puede asumirse el uso del mes más

Cuadro 4. Lluvias máximas para duraciones de uno a cinco días y períodos de retornos de cinco, 10 y 20 años, a partir de la función de distribución de probabilidades de Gumbel Tipo I.

Tr	1 día	Dif	2 días	Dif	3 días	Dif	4 días	Dif	5 días	Dif
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
5	138.7		193.0		226.8		240.3		247.1	
10	193.0	28.16	260.6	25.92	304.8	25.58	318.3	24.50	325.1	23.98
20	223.5	13.64	300.0	13.12	348.0	12.41	360.7	11.76	365.8	11.11

Tr = período de retorno; Dif = diferencia en porcentaje.

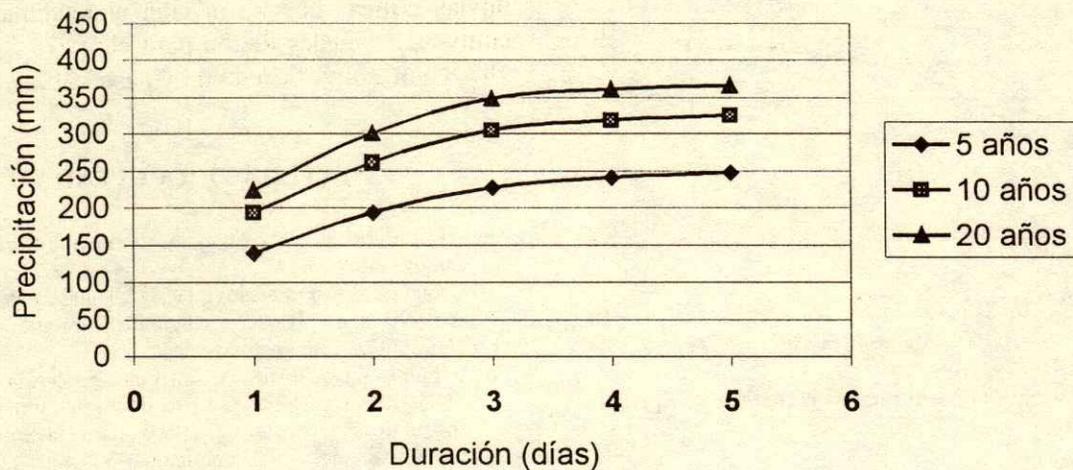


Figura 3. Curvas lámina-duración-frecuencia. Método del ILRI (1978).

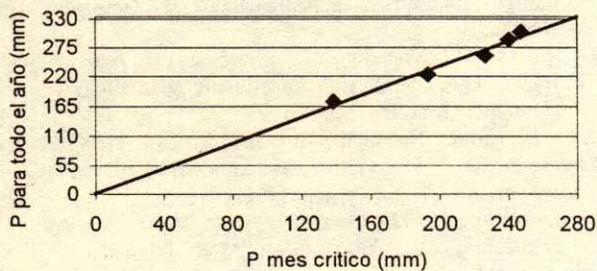


Figura 4. Valores de lluvias máximas para las duraciones de uno a cinco días y periodo de retorno de cinco años y modelo ajustado para ambas metodologías.

crítico como vía para determinar la lluvia de diseño, por ser el periodo cuando realmente se requiere del funcionamiento óptimo del sistema de drenaje superficial. Cuando se analiza el año completo, para la selección de la lluvia máxima se incorporan a los cálculos valores que ocurren en los periodos secos, debido a condiciones atmosféricas adversas, que no son típicas de los mismos, por lo que será menor su frecuencia de ocurrencia.

En consecuencia, cuanto más elevada sea la lluvia de diseño, implica un proyecto más costoso, tanto menor es el riesgo de perder la producción agrícola. Sin embargo, hay un cierto punto en el que el costo para garantizar mayor seguridad excede a los beneficios derivados de una reducción adicional en el número de pérdidas de cosecha.

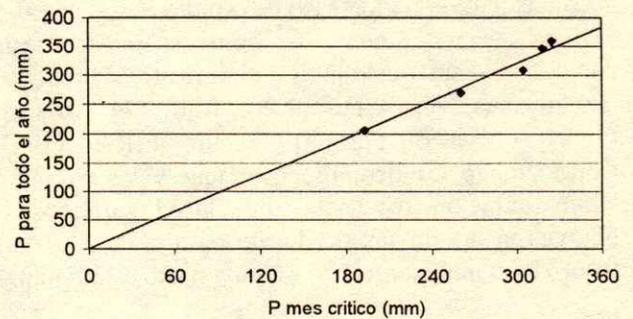


Figura 5. Valores de lluvias máximas para las duraciones de uno a cinco días y periodo de retorno de 10 años y modelo ajustado para ambas metodologías.

Determinación de la Lluvia de Diseño para los Cultivos

En la Figura 6, se muestra la curva lámina-duración-frecuencia para el periodo de retorno de 10 años, para lo cual se siguió el criterio del método planteado por el ILRI (1978). Este modelo explica mejor el comportamiento de las lluvias máximas de tipo potencial:

$$P = a(1 - e^{-bD})$$

Donde: P es la precipitación máxima en mm; D es la duración de la lluvia en días; y a, b son constantes adimensionales.

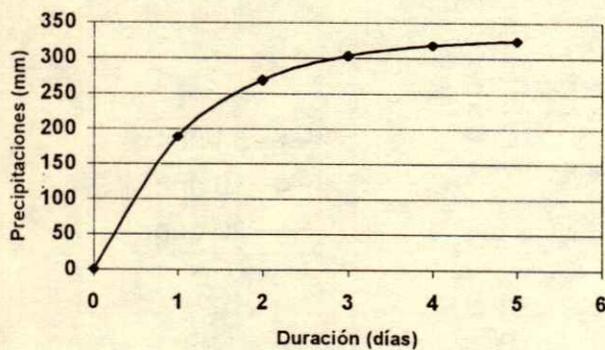


Figura 6. Curva lámina-duración-frecuencia ajustada ($T_r = 10$ años).

Las constantes determinadas para el modelo fueron $a = 328.8573$ y $b = 0.8463$ con un coeficiente de correlación de 0.9994 y un error estándar de 4.799 mm, lo que indica que el modelo explica satisfactoriamente el comportamiento de las lluvias máximas para la región caso de estudio.

Los tiempos que los cultivos pueden estar inundados, sin disminuir significativamente sus rendimientos, son: chile (8 h), frijol (24 h), sorgo (36 h) y pasto (72 h), según FIRA (1985). Considerando los tiempos de drenaje y las curvas de lámina-duración-frecuencia de la Figura 6, se obtuvieron las lluvias de diseño para chile 73.7 mm, frijol 187.8 mm, sorgo 236.4 mm y pasto 302.9 mm.

CONCLUSIONES

- El método ILRI encontró que el mes más lluvioso fue septiembre de los 13 años de registro diario de lluvias.
- Las lluvias máximas consecutivas para uno a cinco días fueron: 209.5, 255, 315, 317 y 317 mm, respectivamente.
- Considerando los tiempos de drenaje y las curvas de lámina-duración-frecuencia, se determinaron las

lluvias críticas que no afectan el rendimiento de los cultivos, las cuales fueron para chile: 73.3 mm, frijol: 187.8 mm, sorgo: 236.4 mm y pasto: 302.9 mm.

LITERATURA CITADA

- Aparicio-Mijares, F. 1994. Fundamentos de hidrología superficial. Limusa. México, D.F.
- CP (Colegio de Postgraduados). 1991. Manual de conservación de suelo y agua. Tercera edición. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Chapingo, México.
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). 1985. Riego y Drenaje. Serie de Agricultura. Volumen 2. Instructivos técnicos de apoyo para la formulación de proyectos de financiamiento y asistencia técnica. Subdirección de Evaluación de Proyectos y Asistencia, División de Agricultura. México, D.F.
- Hudson, N.W. 1981. Soil conservation. 2nd ed. Cornell University Press. Ithaca, NY.
- ILRI (International Institute for Land Reclamation and Improvement). 1978. Principios y aplicaciones del drenaje. Tomo III. Estudios e investigaciones. Wageningen, The Netherlands.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1995. Extractor rápido de información climatológica. ERIC Versión 2.0. Jiutepec, Morelos, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1999. Anuario estadístico de Tabasco. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Martínez-Beltrán, J. 1986. Drenaje agrícola. Vol. I. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.
- Pizarro, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. 2a edición. Editorial Agrícola Española. Madrid, España.
- Rojas, M. 1976. Drenaje superficial de tierras agrícolas. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. Caracas, Venezuela.
- SCS (Soil Conservation Service). 1972. National Engineering Handbook. Hydrology Section 4, Chapter 4-10, 19. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Villón-Béjar, M. 2001. Hidrología estadística. Serie en Ingeniería Agrícola. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Yap-Salinas, H. 1974. Efectos del nivel freático en la producción de cultivos. Departamento de Recursos de Agua y Tierra. Universidad Nacional Agraria "La Molina". Lima, Perú.

PRODUCTIVIDAD DEL ESPÁRRAGO EN CONDICIONES DE RIEGO Y FERTILIZACIÓN NITROGENADA

Asparagus Productivity Under Irrigation and Nitrogen Fertilization

J.A. Cristóbal Navarro-Ainza^{1†}, Adán Fimbres-Fontes¹ y Arturo López-Carvajal¹

RESUMEN

En el año 2001, en México, el espárrago se cultivaba en una superficie aproximada de 15 000 ha. En la región de Caborca, Sonora, este cultivo tiene un gran impacto socioeconómico. La aplicación de insumos y recursos en grandes cantidades, aunado a las condiciones desérticas prevalecientes en la región promueve, con frecuencia, un desarrollo vigoroso de las plantaciones; además de mayor incidencia de problemas fitosanitarios; todo ello influye en los costos de producción y en el ambiente. Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia que la humedad y la fertilización nitrogenada tienen en la productividad del espárrago. El trabajo se realizó en una plantación joven (1993) y otra adulta (1998); en la plantación joven se aplicaron tratamientos que consistieron en la combinación de niveles de humedad aprovechable del suelo y nitrógeno (N), aplicados durante el período de crecimiento vegetativo. El diseño utilizado fue de parcelas divididas en arreglo de bloques al azar con tres repeticiones. En la plantación adulta se aplicaron niveles de humedad del suelo (40, 20, 10% y Testigo) en todo el año (1998). El diseño utilizado fue en bloques al azar con seis repeticiones. En los dos estudios, se evaluó la producción de turiones empacables. En la plantación joven sobresalió 35-35% de humedad y 200 kg ha⁻¹ de N con 367 cajas ha⁻¹; el peor tratamiento de humedad resultó ser el testigo y 600 kg ha⁻¹ de N, con 261 cajas ha⁻¹. El factor humedad tuvo un mayor efecto en la producción que N, sobresaliendo 35-35%. En la plantación adulta, los niveles de 40% y 20% de humedad mostraron la mayor y menor producción, respectivamente; además, se observó que menor humedad favoreció, en los primeros cortes, una mayor

producción. Asimismo, la mayor producción se presentó a partir de marzo.

Palabras clave: humedad aprovechable del suelo, nitrógeno, turiones.

SUMMARY

In 2001 in Mexico asparagus was cultivated in an area of about 15 000 ha. In the Caborca region, State of Sonora, Mexico, this crop has great social and economic impact. The application of large amounts of resources and agrochemicals plus the climatic conditions of the desert often promote vigorous growth of the asparagus plant but also greater pest problems are observed. This situation influences crop production costs and the environment. The objective of this study was to evaluate the influence of soil moisture and nitrogen on asparagus productivity. The study was carried out in a young and an adult asparagus plantation; in the young asparagus plantation, treatments were a combination of available soil moisture levels and nitrogen (N) applied during the fern growth. A randomized complete block design with a split plot arrangement with three replications was used. In the adult asparagus plantation only soil moisture treatments were applied (40, 20, 10%, and control) during the entire growth cycle. A randomized complete block design with six replications was used. In both studies, exportable spear production was evaluated. In the young asparagus plantation, the treatment 35-35% plus 200 kg ha⁻¹ N yielded 367 boxes ha⁻¹ while the control plot plus 600 kg ha⁻¹ N yielded 261 boxes ha⁻¹. The soil moisture factor had a greater effect on production than N, being superior the 35-35% treatment. In the adult plantation, the 40% and 20% soil moisture levels showed the highest and the lowest yield, respectively. Furthermore, it was observed that during the first cuttings (harvests) less soil moisture favored higher production. Moreover, the highest production occurred as of March.

Index words: available soil moisture, nitrogen, spears.

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Caborca. Apartado Postal 125, 83600 Caborca, Sonora, México.

[†] Autor responsable (jacnamx@yahoo.com.mx)

INTRODUCCIÓN

En el año 2001, se reporta que el espárrago se cultivaba en una superficie aproximada de 15 000 ha en todo México (Benson, 2001) distribuido, principalmente, en los estados de Sonora, Guanajuato, Baja California y Baja California Sur (SAGAR, 1995). En la actualidad, la superficie de espárrago en el estado de Sonora, y fundamentalmente en la región de Caborca, es de aproximadamente 6000 ha, todas con riego, lo cual representa alrededor de 40% de la superficie nacional. El rendimiento promedio en la región es de 250 cajas de 30 libras ha^{-1} . Esta hortaliza tiene un gran impacto en las regiones donde se cultiva debido a la derrama económica y al gran número de jornales requeridos, en especial durante el período de cosecha. La producción de espárrago en esta región está orientada al mercado de exportación, siendo usualmente la producción temprana la de mayor atractivo por los precios existentes del producto en el mercado.

El sistema de producción de espárrago regional se caracteriza por la aplicación, frecuentemente excesiva, de agua y fertilizantes, lo cual, aunado a las condiciones climáticas prevalecientes, favorece un desarrollo vigoroso de la planta, además de problemas fitosanitarios importantes de plagas, maleza y enfermedades. En lo referente a las aplicaciones de agua, se ha estimado que se llegan a aplicar más de 3 m de lámina de riego y hasta una tonelada de nitrógeno (N) por hectárea, con las consecuentes pérdidas de agua y fertilizante por lixiviación, aumento en los costos de producción, problemas de contaminación, además de los problemas mencionados anteriormente.

El agua en la región de Caborca, al igual que en otras zonas desérticas, es un recurso escaso y, sin embargo, muy poco valorado; por ello, es indispensable el realizar un buen uso y manejo del mismo, con fines de producción y conservación. Por otro lado, la fertilización es una práctica esencial debido a la baja fertilidad de los suelos de estas regiones, así como es un factor importante para lograr producciones aceptables y rentables, tanto en cantidad, como en calidad. Finalmente, el uso racional de estos dos rubros permite una reducción importante en los costos de producción, a la vez que se disminuye el impacto ambiental. De ahí la importancia de llevar a cabo una aplicación más racional del agua y la fertilización nitrogenada en el cultivo de espárrago.

La cantidad de agua utilizada por el espárrago varía estacionalmente en proporción con la cantidad de follaje presente. El riego incrementa el rendimiento mediante un aumento en el número de turiones o incrementando el tamaño de éstos. Dicho incremento en producción probablemente es causado por un incremento en la reserva de carbohidratos de la planta conforme el riego aumenta el crecimiento del follaje y, con ello, su capacidad fotosintética. La mayoría de los nutrimentos requeridos para soportar la cosecha en la primavera provienen de las reservas de la corona, aunque puede presentarse algo de absorción de N, calcio y azufre durante la cosecha. En consecuencia, la aplicación de fertilizantes después de cosecha tiene un mayor efecto benéfico en la producción que la aplicación anterior a la cosecha, aunque la aplicación de N en primavera puede promover el crecimiento de la raíz (Robb, 1984).

Con respecto al requerimiento de riego del espárrago en zonas áridas, Roth y Gardner (1989) indicaron que para lograr rendimientos máximos se necesita aplicar una lámina de riego promedio anual de 250 cm, con riego superficial. Asimismo, estos autores indicaron que se requieren de aplicaciones de 400 a 500 $kg\ ha^{-1}$ de N con una lámina de riego de 250 cm, para obtener rendimientos máximos en el área de Yuma, Arizona. En otro reporte, estos mismos autores (Roth y Gardner, 1990) mencionaron que la aplicación de cantidades de N menores que el óptimo limitan más el rendimiento que la reducción de la lámina de riego considerada óptima; lo mismo se observa para el número total de turiones. Aplicaciones reducidas de N no sólo disminuyen el rendimiento total, sino también afectan la distribución del tamaño de los turiones (mayor porcentaje de tamaños chicos y medianos).

Comparando el crecimiento y la fotosíntesis de plántulas de espárrago, se reportó que el crecimiento es más afectado cuando la humedad del suelo se reduce de -0.05 a -0.30 MPa, que cuando se reduce de -0.30 a -1.50 MPa (Wilcox-Lee y Drost, 1990). Igualmente ocurre con la producción de plantas adultas de espárrago al presentarse pequeñas reducciones en la humedad del suelo (Cannell y Takatori, 1970).

Se han realizado estudios sobre la influencia de la fertilización, del riego y del espaciamiento entre plántulas e hileras de espárrago sobre su sanidad y se encontraron diferencias en la pudrición de raíces sólo entre plantas fertilizadas (150 a $750\ kg\ ha^{-1}$ NPK)

versus no fertilizadas, sin diferencia entre dosis. Por otro lado, el riego y la densidad de plantas no influyeron significativamente en la ocurrencia de pudrición de raíces en plántulas de un año de edad (Knaflewski y Sadowski, 1990).

En un ensayo sobre la respuesta del espárrago a la fertilización nitrogenada en Michigan no se encontró diferencia entre aplicar 85 kg ha⁻¹ de N y no aplicar N al suelo; los rendimientos fueron 3749 y 3342 kg ha⁻¹, con un mayor peso de turiones tamaño pequeño, grande y jumbo en 1996 (Kelly y Bakker, 1996). Para 1997 y 1998 se obtuvieron resultados similares (Kelly y Bakker, 1997; 1998). Por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la influencia del riego y la fertilización nitrogenada sobre la productividad del espárrago.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en una plantación comercial de espárrago denominada "Los Parrales", ubicada aproximadamente a 65 km de la ciudad de Caborca, Sonora, México, durante dos ciclos de desarrollo (1993 y 1998). En el trabajo, se utilizaron plantas jóvenes (tres años) y adultas (ocho años) de espárrago 'UC-157' plantadas en el mismo lugar; las plantas se establecieron en bordos con 1.5 m de separación y aproximadamente 30 cm entre plantas. El suelo es un Aridisol con textura de arena franca. El sistema de riego fue de gravedad y se utilizaron sifones para la aplicación del agua a los surcos.

Los tratamientos aplicados a la plantación joven resultaron de la combinación de niveles de humedad aprovechable en el suelo y dosis de N; en este primer ciclo los niveles de humedad se mantuvieron exclusivamente durante el período del crecimiento vegetativo (marzo-octubre), manejándose el riego de manera uniforme, en todos los tratamientos, durante el período de cosecha. Cada tratamiento consistió de dos niveles de humedad: el primero representó el porcentaje de humedad mantenido desde el final de la cosecha hasta la maduración del fruto (abril-julio); y el segundo nivel de humedad representó la humedad mantenida de la maduración del fruto hasta el final de los riegos (julio-octubre). El cambio de un nivel a otro se llevó a cabo cuando más de 75% del fruto cambió del color verde a rojo en las parcelas estudiadas. En la plantación adulta sólo se evaluó el factor de humedad aprovechable del suelo aplicándose los tratamientos: 40%, 20%, 10% y el Testigo (productor). En este ciclo, se manejó un nivel de humedad del suelo

constante a través de todo el ciclo del cultivo (enero-diciembre), es decir no se cambió el nivel de humedad como fue el caso en la plantación joven.

La humedad del suelo se monitorizó utilizando el método gravimétrico con muestreos periódicos durante todo el período de estudio; se escogieron varios puntos en las parcelas de riego tomándose muestras de los estratos de suelo de 0 a 30, de 30 a 60, de 60 a 90 y de 90 a 120 cm, transportadas en botes de aluminio herméticos y procesadas como lo prescribió Velasco (1983). Una vez que el nivel de humedad se aproximaba al predeterminado, se programaba el riego y durante su aplicación se estimaba el gasto de los sifones, midiendo la carga hidráulica de los mismos; con la información anterior, el área a regar y el tiempo de riego, se procedía a calcular la lámina de riego aplicada en cada riego. La humedad aprovechable del suelo resultó de la diferencia entre los valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP); dicha diferencia representó 100% de la humedad aprovechable de ese suelo.

En el caso de la fertilización con N en el tratamiento Testigo, éste se aplicó con base en el criterio del productor, el cual consistió en la aplicación de 100 kg ha⁻¹ con una frecuencia aproximada de un mes, utilizándose como fuente el amoníaco anhidro (82% N) distribuido con el agua de riego. En el caso de la aplicación de 600 kg ha⁻¹, el N se aplicó mensualmente de marzo a agosto; en el caso de 200 kg ha⁻¹, el N se aplicó en marzo y en mayo, y la dosis de 400 kg ha⁻¹ se aplicó en marzo, abril, mayo y julio. Lo anterior se realizó dado que en otros trabajos se ha encontrado que a largo plazo la época de aplicación no influye sustancialmente en la producción de turiones y en la utilización de N, aunque pueden existir diferencias en la toma y removilización del N en espárrago (Ledgard *et al.*, 1992; 1994). Con el fin de determinar cuál era el estado nutricional de la plantación joven de espárrago, se llevó a cabo un muestreo foliar el 25 de junio, el cual se hizo en dos repeticiones de las parcelas en estudio, de acuerdo con lo indicado por Doerge *et al.* (1991). Se analizó la concentración de N, fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na).

La cosecha se inició a mediados de enero (plantación joven) y en la tercera semana de enero (plantación adulta) y se terminó a finales de marzo en ambos ciclos. En la plantación joven, se tomaron muestras de turiones de parcelas de 45 m² (tres hileras de 1.5 m de ancho por 10 m de longitud). Durante los

cortes efectuados en las parcelas, se determinó la producción (cajas de 30 lb), número de turiones y su clasificación (turiones comerciales). En la plantación adulta, se tomaron muestras de turiones de parcelas de 15 m² (una hilera de 1.5 m por 10 m de longitud) y, en ellas, se determinaron las mismas variables anteriores. El diseño experimental utilizado en la plantación joven fue de bloques al azar con arreglo en parcelas divididas y con tres repeticiones; los niveles de humedad se establecieron en las parcelas grandes y las dosis de N en las parcelas chicas. En la plantación adulta, sólo se evaluó el factor niveles de humedad para lo cual se utilizó un diseño de bloques al azar con seis repeticiones. El paquete estadístico utilizado fue el de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Olivares, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Plantación Joven

En la plantación joven no existió diferencia estadística entre los tratamientos evaluados. Esa falta se debió a la variación [coeficiente de variación (CV)] encontrada, la cual fue ligeramente alta (mayor que 10%) y, posiblemente, al bajo número de repeticiones. A pesar de lo anterior, es de resaltar el hecho de que el tratamiento con la mayor producción de turiones se logró con la combinación de 35-35% humedad del suelo y 200 kg ha⁻¹ de N, siguiéndole la combinación de 50-75% humedad y también 200 kg ha⁻¹ de N, con 367.3 y 351.8 cajas ha⁻¹, respectivamente. Por otra parte, los tratamientos que mostraron la menor producción estuvieron representados por el Testigo (< 10% humedad aprovechable) con las tres dosis de N, siendo la dosis de 600 kg ha⁻¹ de N la que mostró el menor rendimiento de turiones con 261.6 cajas ha⁻¹.

El efecto del factor humedad aprovechable del suelo sobre el rendimiento de turiones no manifestó diferencias estadísticas. En este caso, se tuvo un CV muy alto al lograrse un valor superior a 30%. Sin embargo, se observa que el tratamiento de humedad intermedio-bajo de 35-35% mostró la mayor producción de turiones, le siguieron los tratamientos de 50-75% y 75-50%; el tratamiento testigo (< 10% humedad) mostró la menor producción con 274 cajas ha⁻¹. La diferencia entre el mejor tratamiento (35-35%) y el peor tratamiento (Testigo), en rendimiento de turiones, fue de casi 67 cajas ha⁻¹,

lo cual, en términos económicos (asumiendo un precio promedio de US \$ 30.00 caja⁻¹), representa alrededor de US \$ 2000.00 en ingresos para el productor. Sin embargo, lo anterior también implicó la aplicación de 68 cm de lámina de riego extra con este tratamiento de 35-35% humedad aprovechable del suelo, en relación con el testigo. Asimismo, se anotaron la frecuencia promedio de riego en cada uno de los tratamientos estudiados, oscilando ésta de nueve hasta más de 30 días entre los riegos aplicados.

El efecto del N sobre el rendimiento de turiones, al igual que en el caso anterior, no evidenció diferencia significativa entre los diferentes niveles de este factor. Aquí, al igual que en el caso de los tratamientos evaluados, el CV fue ligeramente alto, lo que podría explicar, en parte, la falta de respuesta obtenida. En este caso, la mejor dosis de N resultó ser la más baja (200 kg ha⁻¹), mientras que la peor dosis de N fue la de 600 kg ha⁻¹; la diferencia entre los dos fue de casi 29 cajas ha⁻¹, representando aproximadamente 40% de la diferencia encontrada para el factor humedad del suelo. Asimismo, lo anterior indica que el mayor efecto en la producción de turiones, en este primer año, fue para la humedad del suelo. Lo anterior resulta contrario a lo señalado por Roth y Gardner (1990), quienes indicaron que cantidades de N menores que el óptimo limitan más el rendimiento que la disminución de la lámina de riego considerada óptima. Aunque en el caso del presente estudio no puede decirse que el mejor tratamiento sea el óptimo, además de las diferencias en manejo, suelo y condiciones climáticas que pudieron haber influido en estos resultados; además, está el hecho de que, en este caso, se trata de una plantación joven, la cual aún no muestra su máximo potencial de producción.

La concentración de N fue elevada en todos los casos, mientras que la de P fue baja en todos los tratamientos con excepción del testigo que mostró valores adecuados de este nutrimento. En lo que respecta a K, los valores encontrados fueron altos en todos los tratamientos; Ca se mostró adecuado en todos los casos, excepto en el testigo que mostró valores altos en el tejido. Finalmente, Mg y Na se encontraron en valores adecuados en todos los tratamientos. De lo anterior se desprende que con la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N se logra una buena condición nutrimental en la planta en lo referente a este nutrimento, aunque habría que comentar que el cultivo sigue utilizando N para crecer en los meses siguientes de gran actividad vegetativa, como son los

meses de verano (julio, agosto y septiembre), lo cual podría abatir los valores foliares de algunos de los nutrientes anteriormente reportados.

Lo anterior es en especial crítico en espárrago desarrollado en este tipo de climas áridos que muestran un crecimiento más vigoroso y con mayor duración, además del aspecto del tipo de suelo que promovería más pérdidas de N por lixiviación. En el caso de P, se requeriría llevar a cabo la aplicación de este nutriente con el fin de mejorar su contenido en la planta.

Plantación Adulta

En cuanto al rendimiento de turiones en la plantación adulta, en el Cuadro 1 puede observarse que hubo grandes diferencias significativas en producción de turiones entre los tratamientos de humedad del suelo, además de que se tuvo un mayor número de repeticiones, comparado con la plantación joven. El mejor tratamiento resultó ser el que mantuvo una mayor humedad en el suelo durante el ciclo (40% de humedad aprovechable), siendo estadísticamente diferente al resto de los tratamientos; en este tratamiento se obtuvieron 434 cajas ha⁻¹, siguiéndole el testigo con 333 cajas ha⁻¹, y finalmente los tratamientos de 10 y 20% de humedad con 219 y 152 cajas ha⁻¹, respectivamente.

El testigo fue el segundo mejor tratamiento debido a que a estas parcelas se les aplicó agua en esa proporción, en relación con el mejor tratamiento (40%); en este caso, a diferencia del testigo en la plantación joven, el nivel de humedad mantenido por el productor fue relativamente alto, cercano a 40% de la humedad aprovechable del suelo. Otra

Cuadro 1. Rendimiento de turiones en la plantación adulta de espárrago 'UC-157' en respuesta a la humedad aprovechable del suelo.

Humedad del suelo	Lámina de riego [†]	Rendimiento de turiones
%	cm	cajas ha ⁻¹
40	575	434 a [‡]
20	414	152 c
10	367	219 c
Testigo	430	333 b
CV = 14.37%		

[†] Lámina de riego aplicada en todo el ciclo del cultivo (enero-diciembre).

[‡] Medias con la misma letra en la columna son iguales estadísticamente. Tukey (P > 0.05).

consideración es que, en la plantación adulta, los niveles de humedad evaluados se mantuvieron durante todo el ciclo del cultivo (crecimiento vegetativo incluido el período de cosecha), situación que no se dio en el caso de la plantación joven.

La diferencia entre el mejor tratamiento (40% de humedad) y 20% de humedad del suelo significó un incremento de 185% en la producción, lo cual es muy significativo en términos de cantidad de turiones, ya que si se considera un precio de US \$ 30.00 caja⁻¹, se estaría hablando de alrededor de US \$ 8500.00 más de ingresos, al aplicar este tratamiento de 40% de humedad en el suelo. En relación con el uso de agua, este tratamiento de 40% consumió una lámina de 161 cm más, en comparación con el tratamiento de 20% de humedad, y, sin embargo, la diferencia en rendimiento es muy grande entre estos tratamientos. La plantación adulta mostró una mayor producción y un mayor consumo de agua, a pesar de que se manejaron niveles de humedad relativamente bajos en esta plantación. Esta situación es normal dado que conforme la planta es de mayor edad su capacidad productiva (si no existe alguna limitante fuerte) es mayor; lo anterior es válido, en general, para plantaciones comerciales de cinco a 12 años de edad (Tapia, 1987) y, en el caso de este estudio se trabajó con una plantación adulta de ocho años de edad.

En la Figura 1, puede apreciarse la dinámica de la cosecha de turiones en los meses de enero a marzo; en el mismo período, se ve que la cantidad de turiones cosechados (expresado en %) en cada fecha es muy

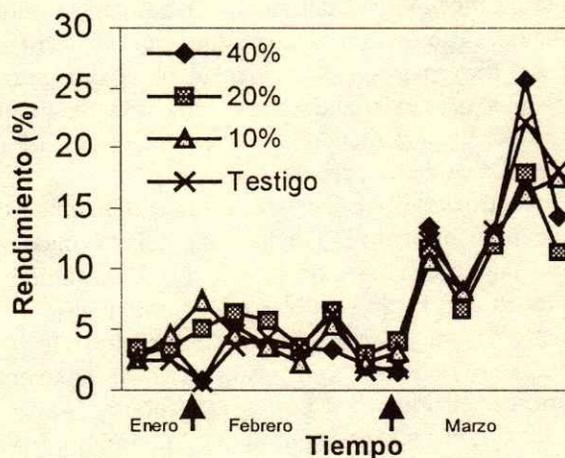


Figura 1. Dinámica del rendimiento actual de espárrago adulto 'UC-157' con diferentes niveles de humedad aprovechable del suelo.

baja durante los meses de enero y febrero, mientras que durante marzo las cantidades cosechadas son mucho mayores. De hecho, hay tratamientos en los cuales se llegaron a cortar, en un período corto de tiempo (durante marzo), hasta 25% de la producción total de turiones. Se estimó que lo anterior responde a las condiciones climáticas presentes en dicho lapso, fundamentalmente a la temperatura del suelo; aunque la temperatura del suelo no se registró, el comportamiento de la temperatura del aire en el período comprendido de enero a marzo de este año (1998) mostró una tendencia ascendente, en especial a partir de finales de febrero, lo cual se refleja, con cierto desfase de tiempo, en la temperatura del perfil del suelo (Oke, 1987).

Además de la temperatura ambiental y del suelo, se observó un efecto de la humedad del suelo en la cantidad de turiones cosechados; se puede ver claramente en la Figura 1 que los tratamientos intermedios de humedad del suelo (10 y 20%) muestran una tendencia ascendente (primeros tres cortes para el tratamiento de 10% y los primeros nueve cortes para el tratamiento de 20% de humedad), en la cantidad de turiones cosechados, mientras que los tratamientos "más húmedos" mostraron una menor cantidad de turiones cosechados en los primeros cuatro a cinco cortes. Lo anterior puede deberse al efecto de enfriamiento que la misma humedad del suelo provoca en el suelo al haber mayor humedad en el mismo, reflejándose en disminuciones importantes de la temperatura en el suelo, en especial en la zona de ubicación de la corona (alrededor de los primeros 20 a 30 cm de profundidad del suelo); dadas las anteriores condiciones de menor temperatura en el suelo, la cantidad de yemas y/o la velocidad de crecimiento de las yemas brotadas pudo verse afectada de manera importante, repercutiendo en la cantidad de turiones cosechados en dicho período.

Por otro lado, en el caso de los tratamientos con menor humedad en el suelo, este efecto pudo ser menos importante, o nulo, lográndose los resultados mostrados en la Figura 1. Los tratamientos "más húmedos" cambiaron su comportamiento de producción actual, mostrando rendimientos superiores, en todos los cortes realizados a partir de principios de marzo (Figura 1); lo anterior pudo deberse al cambio en las condiciones climáticas prevalecientes (mayor temperatura, mayor duración del día, mayor evaporación), por lo que, en estas condiciones, el requerimiento de humedad es cada vez mayor y los tratamientos "más secos" aportaron

cantidades insuficientes de este recurso para favorecer el desarrollo de los turiones ya brotados y/o emergidos, asumiendo que la temperatura ya no era un factor limitativo para su desarrollo. Por otra parte, los tratamientos "más húmedos" sí aportaron la suficiente humedad para favorecer el desarrollo de los turiones, dejando de ser la temperatura un factor limitativo en este período, dado el ambiente más cálido que prevaleció en marzo.

En la Figura 2, se aprecia el comportamiento de la cosecha acumulada, observándose lo mismo que se comentó anteriormente: los tratamientos intermedios "más secos" tienden a diferenciarse de los otros dos tratamientos en la cantidad acumulada de turiones cosechados llegando a registrarse diferencias máximas, a finales de febrero, de hasta 15% de cosecha acumulada entre los tratamientos más húmedos (testigo y 40% de humedad), lo cual representó, hasta esa fecha, 60% más de turiones cosechados, en el tratamiento de 20% de humedad en relación con el testigo. Lo anterior es de suma importancia comercial dado que los mejores precios del producto en el mercado, históricamente, se han obtenido durante enero y febrero. Aproximadamente, a partir de esta fecha la diferencia se siguió manteniendo, aunque cada vez fue menor; aquí resalta el hecho de que los tratamientos "más húmedos" mostraron una producción acumulada prácticamente igual hasta el final del período de cosecha (tercera decena de marzo). El tratamiento de 10% de humedad mostró un comportamiento intermedio en la cantidad

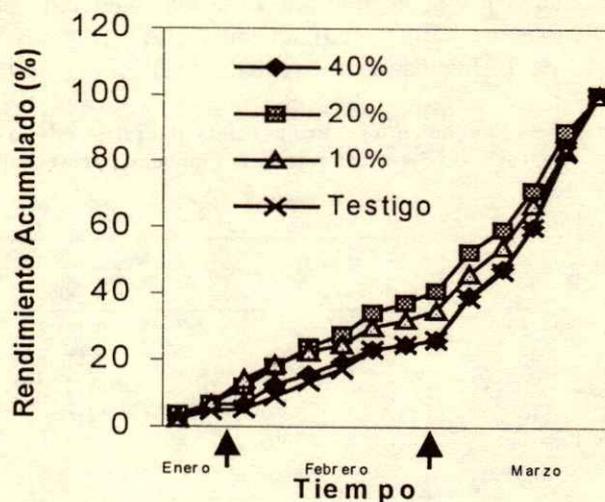


Figura 2. Rendimiento acumulado de espárrago adulto 'UC-157' con diferentes niveles de humedad aprovechable del suelo.

de turiones cosechados, del sexto corte hasta casi finales del período de cosecha.

CONCLUSIONES

- En el caso de la plantación joven sobresalió el tratamiento de 35-35% humedad aprovechable del suelo y 200 kg ha⁻¹ de N con 367 cajas ha⁻¹; en cambio, el tratamiento menos productivo resultó de la combinación de < 10% de humedad aprovechable (testigo) y 600 kg ha⁻¹ de N con 262 cajas ha⁻¹. El factor humedad mostró una mayor influencia en la producción que la fertilización nitrogenada sobresaliendo 35-35% humedad (341 cajas ha⁻¹).

- En el caso de la plantación adulta, mantener la humedad a 40% mostró la mayor producción, mientras que el nivel de 20% de humedad produjo la menor cantidad de turiones con 434 y 152 cajas ha⁻¹, respectivamente. Además, aparentemente una menor humedad en el suelo, en los primeros cortes, favoreció la obtención de una mayor cantidad de turiones cosechados en el período enero-febrero, lo cual parece estar relacionado con la temperatura del suelo y del ambiente.

LITERATURA CITADA

- Benson, B.L. 2001. Update of the world's asparagus production areas, spear utilization and production periods. <http://www.calif-asparagus-seed.com/home.html>
- Cannell, G.H. y F.H. Takatori. 1970. Irrigation-nitrogen studies in asparagus and measurement of soil moisture changes by the neutron method. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 501.
- Doerge, T.A., R.L. Roth y B.R. Gardner. 1991. Nitrogen fertilizer management in Arizona. College of Agriculture, University of Arizona. Tucson, AZ.
- Gardner, B.R. y R.L. Roth. 1989. Plant analysis for nitrogen fertilization of asparagus. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 114: 741-745.
- Kelly, J.F. y J. Bakker. 1996. Nitrogen trial. Michigan Asparagus Research. Michigan State University. East Lansing, MI.
- Kelly, J.F. y J. Bakker. 1997. Nitrogen trial. Michigan Asparagus Research. Michigan State University. East Lansing, MI.
- Kelly, J.F. y J. Bakker. 1998. Nitrogen source trial. Michigan Asparagus Research. Michigan State University. East Lansing, MI.
- Knaflewski, M. y Cz. Sadowski. 1990. Influence of irrigation, fertilization and spacing on the healthiness of asparagus seedlings. *Acta Horticulturae* 271: 269-271.
- Ledgard, S.F., J.A. Douglas, J.M. Follett y M.S. Sprosen. 1992. Influence of time of application on the utilization of nitrogen fertilizer by asparagus, estimated using ¹⁵N. *Plant Soil* 147: 41-47.
- Ledgard, S.F., J.A. Douglas, M.S. Sprosen y J.M. Follett. 1994. Uptake and redistribution of ¹⁵N within an established asparagus crop after application of ¹⁵N-labelled nitrogen fertilizer. *Ann. Bot. (London)* 73: 169-173.
- Navarro-Ainza, J.A.C., F. Robles, A. Fimbres y R.L. Grijalva. 1997. Necesidades de agua y fertilización en espárrago. *Horticultura Mexicana* 5: 93.
- Oke, T.R. 1987. Boundary layer climates. Second Edition. Routledge. London, England.
- Olivares, S.E. 1994. Paquete de diseños experimentales FAUANL. Versión 2.5. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, Nuevo León, México.
- Robb, A.R. 1984. Physiology of asparagus (*Asparagus officinalis*) as related to the production of the crop. *N.Z. J. Exp. Agric.* 12: 251-260.
- Roth, R.L. y B.R. Gardner. 1989. Asparagus yield response to water and nitrogen. *Trans. ASAE* 32: 105-112.
- Roth, R.L. y B.R. Gardner. 1990. Asparagus spear size distribution and earliness as affected by water and nitrogen applications. *Trans. ASAE* 33: 480-486.
- SAGAR (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural). 1995. Anuario estadístico agropecuario de México. Centro de Estadística Agropecuaria. México, D.F.
- Velasco-Molina, H. 1983. Uso y manejo del suelo. LIMUSA. México, D.F.
- Wilcox-Lee, D. y D.T. Drost. 1990. Effect of soil moisture on growth, water relations and photosynthesis in an open-pollinated and male hybrid asparagus cultivar. *Acta Horticulturae* 271: 457-465.

RESPUESTA DE HÍBRIDOS DE MAÍZ NORMALES Y DE ALTA CALIDAD DE PROTEÍNA A LA FERTILIZACIÓN QUÍMICA

Response of Common and High Quality Protein Corn Hybrids to Chemical Fertilization

Artemio Palafox-Caballero^{1‡}, Oscar Hugo Tosquy-Valle¹, Mauro Sierra-Macías¹,
Antonio Turrent-Fernández² y Alejandro Espinosa-Calderón²

RESUMEN

En Veracruz, México, la productividad del maíz de temporal es afectada por el manejo inadecuado del cultivo, principalmente por la falta de uso de semillas mejoradas y deficientes prácticas de fertilización. Con la finalidad de mejorar la tecnología de producción y, con ello, incrementar su productividad y rentabilidad, durante el temporal 2001 y 2002, se establecieron dos experimentos agronómicos. Se utilizó un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones, con arreglo en parcelas divididas. Las parcelas grandes correspondieron a 24 tratamientos de N-P-K con dosis que variaron de 0 a 160, 0 a 120 y 0 a 120 kg ha⁻¹, respectivamente. En las parcelas chicas, durante 2001, se sembraron los híbridos H-363 C, H-519 C y HV-521 C de alta calidad de proteína y H-520, H-512 (T) y C-343 (T) normales. En 2002, estas parcelas comprendieron los híbridos H-519 C, H-553 C y H-558 C de alta calidad de proteína y H-518, H-520 y C-343 (T) normales. Se midió el rendimiento de grano y rastrojo, encontrándose que la aplicación de N con dosis igual o superior a 129 kg ha⁻¹ es determinante en la obtención de mayor rendimiento. H-520, H-518, H-553 C y H-519 C superaron al híbrido H-512 y compitieron con C-343. En general, existió respuesta positiva de los genotipos en rendimiento de grano con dosis altas de fertilización. La mayor rentabilidad se obtuvo con la dosis 129-23-23, con utilidad neta de \$ 3296.00 ha⁻¹ y una relación beneficio-coste de 1:1.53.

Palabras clave: maíz, manejo agronómico, trópico húmedo.

¹ Campo Experimental Cotaxtla, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 429, 91700 Veracruz, México.

[‡] Autor responsable (palafox012@hotmail.com)

² Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 56230 Chapingo, estado de México.

Recibido: Junio de 2003. Aceptado: Octubre de 2004.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 23: 129-135.

SUMMARY

During the rainy season, productivity of maize in Veracruz, Mexico, is affected by inadequate management, mainly lack of use of improved seeds and deficient practices of fertilization. Thus, to improve production technology and increase the productivity and profitability of corn, during the spring summer seasons 2001 and 2002, two agronomic experiments were carried out. The experimental design was randomized blocks arranged in split plots. The large plots corresponded to 24 treatments of N-P-K ranging from 0-160, 0-120, and 0-120 kg ha⁻¹, respectively. In 2001, in the small plots the hybrids H-363 C, H-519 C, and HV-521 C with high protein quality and H-520, H-512 (check 1) and C-343 (check 2) were planted. In 2002, in these plots the hybrids H-519 C, H-553 C, H-558 C of high protein quality and H-518, H-520, and C-343 (check) of normal protein quality were used. Grain yield and harvest index were evaluated. Nitrogen application at levels above 129 kg ha⁻¹ was determinant in obtaining the highest yield. The hybrids H-520, H-518, H-553 C and H-519 C were significantly different from check 1 H-512 and competed with C-343. In general, positive response in grain yield was found with high levels of fertilization. The best economic and sustainable alternative was the dosage 129-23-23, with a net utility of \$ 3296.00 ha⁻¹ and a rate benefit-cost of 1:1.53.

Index words: corn, agronomic management, humid tropic.

INTRODUCCIÓN

En el estado de Veracruz, la superficie cultivada con maíz supera 530 000 ha, de las cuales 80% son siembras de temporal. En esta condición, se presenta una producción muy baja, con un rendimiento medio de 2 t ha⁻¹ (Cano *et al.*, 2001). Esto obedece, entre otros factores, al escaso uso de semillas mejoradas y a un deficiente manejo tecnológico, principalmente en

lo que respecta a dosis y oportunidad de fertilización. En relación con el primero, sólo 22% de la superficie es sembrada con semilla certificada de variedades e híbridos y el resto con generaciones avanzadas de material mejorado y criollos regionales (Tosquy *et al.*, 1998); a pesar de que en esta entidad existen áreas con alto potencial productivo que reúnen las condiciones de suelo y clima para el buen desarrollo de genotipos mejorados, principalmente en lo que respecta al uso de híbridos, es necesario contar con una adecuada tecnología de producción (Tosquy y Castañón, 1998). Con respecto a la fertilización, estudios realizados mediante el método productor-experimentador, en diferentes áreas maiceras de Veracruz, han determinado que uno de los principales factores que afectan al rendimiento del cultivo es la fertilización, ya que aunque la totalidad de los productores realizan esta labor, no lo aplican en la cantidad ni en el momento en que la planta lo requiere, lo cual ocasiona disminución en el rendimiento e incremento en los costos de producción (Flores y Villarreal, 1997). La fertilización se considera como uno de los factores controlables clave en la obtención de un mejor rendimiento en maíz, ejerciendo alta influencia sobre los componentes de rendimiento y sobre las características agronómicas (Tosquy *et al.*, 1998).

Sin embargo, aun cuando se conoce el efecto por separado de cada uno de estos factores, es importante definir su combinación óptima, debido a que, en la mayoría de los casos, los factores de la producción se han estudiado en un solo genotipo. Por otro lado, en la formación de variedades mejoradas de maíz, muchos mejoradores aplican la selección en una sola dosis de fertilización estándar, de tal forma que se desconoce la respuesta de las variedades generadas a diferentes dosis de este factor de producción, cuando éstas son puestas a disposición del productor para su uso comercial (Maya y Ramírez, 2002).

Por lo anterior, y considerando que en los últimos años el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en colaboración con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) ha generado híbridos de maíz normales y de alta calidad de proteína, 40 a 50% más ricos en lisina y 35 a 40% en triptofano (Sierra *et al.*, 2004), los cuales han mostrado buen comportamiento en las condiciones del trópico húmedo de Veracruz. En este Estado, se estableció el presente trabajo de investigación, el cual tiene como objetivo determinar la respuesta de estos nuevos híbridos a la fertilización mineral N-P-K, con

el fin de ofrecerle al productor una tecnología que permita lograr una mayor productividad y rentabilidad del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el ciclo primavera-verano de 2001 y 2002, en condiciones de temporal, se condujeron experimentos agronómicos en terrenos del Campo Experimental Cotaxtla, del INIFAP, el cual se ubica en el municipio de Medellín de Bravo, Veracruz, México; a 18° 50' N y 96° 10' O. El clima es cálido subhúmedo Aw^w(w)(g), de acuerdo con Köppen, modificado por García (1981), con una media anual de temperatura y precipitación de 25 °C y 1400 mm, respectivamente, y un período de lluvias comprendido entre junio y octubre. El tipo de suelo, donde se establecieron los experimentos, es de origen aluvial, de textura franco arcillosa, con 2% de materia orgánica; nitrógeno total, 0.113%; fósforo, 50 mg kg⁻¹; potasio, 300 mg kg⁻¹; capacidad de intercambio catiónico, 15.24 cmol_c kg⁻¹; densidad aparente, 1.47 g cm⁻³; y pH de 6.6.

Los experimentos se establecieron utilizando un arreglo de tratamientos en parcelas divididas en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. Las parcelas grandes correspondieron a 24 tratamientos de fertilización química seleccionados mediante una matriz en hipercubo doble con dosis que variaron de 0 a 160, 0 a 120 y 0 a 120 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente; las parcelas chicas estuvieron integradas por seis híbridos de maíz. En el temporal 2001 fueron H-363 C, H-519 C y HV-521 C de alta calidad de proteína, los híbridos normales H-520 y H-512, testigo comercial del INIFAP y C-343, testigo de empresa particular. Durante el temporal 2002, H-519 C, H-553 C y H-558 C de alta calidad de proteína, los híbridos normales H-518 y H-520, y C-343 testigo de empresa particular. En ambos ciclos de evaluación, se utilizó una densidad de 65 000 plantas ha⁻¹ y cada parcela dividida constó de ocho surcos de 6 m de largo, separados a 0.80 m, en la cual se establecieron los seis genotipos, ocupando una hilera cada uno, con un surco bordero al lado de cada parcela. Como principales parámetros de respuesta se consideraron al rendimiento de rastrojo [RR (en t ha⁻¹)] y rendimiento de grano [RG (en t ha⁻¹)] ajustado a 14% de humedad. Se realizaron análisis de varianza y, para el caso de los tratamientos que mostraron significancia, se aplicó la prueba diferencia mínima significativa a 5% de probabilidad de error

Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia encontrada en las variables rendimiento de rastrojo y de grano en los experimentos agronómicos, primavera-verano (P-V) 2001 y 2002.

F.V.	G.L.	P-V 2001		P-V 2002	
		RR [†]	RG [†]	RR	RG
Repeticiones	3	23.299	3571712.0	19.164	2.569
Fertilización (F)	23	12.294 **	869572.0 **	15.345 **	27.287 **
Error	69	4.627	604697.0	6.054	1.254
Genotipos (G)	5	3.884 ns	948428.8 ns	32.946 **	33.985 **
F x G	115	3.081 ns	922454.8 ns	2.442 **	0.512 ns
Error B	360	3.363	938453.3	1.671	0.445
Total	575				
CV (%)		23.43	17.86	26.74	13.11

[†] RR = rendimiento de rastrojo; [†] RG = rendimiento de grano; CV = coeficiente de variación; ** = altamente significativo; ns = no significativo.

(DMS a 0.05); también se realizó un análisis económico para definir la rentabilidad de los mejores tratamientos de N-P-K, de acuerdo con la metodología del CIMMYT (1988).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1, se presenta el resumen de los análisis de varianza realizados a las variables evaluadas durante los ciclos agrícolas de primavera-verano (P-V) 2001 y 2002. En este cuadro, se visualiza que para la fuente de variación, fertilización, se detectó alta significancia en rendimiento de rastrojo y de grano en ambos años, lo cual indica que los tratamientos que suministraron N-P-K, arrojaron valores diferentes para estos parámetros.

En el factor genotipo, sólo se encontró significancia a 1% en el segundo año de evaluación en ambas variables, lo que señala que, durante el primer año, los híbridos, en general, se comportaron de manera similar. La acción conjunta de estos dos factores, genotipo x fertilización, sólo fue significativa a 1% en el rendimiento de rastrojo durante el ciclo P-V 2002. Los coeficientes de variación se ubicaron en un intervalo aceptable, de acuerdo con lo reportado por Reyes (1990), al considerar que los experimentos se condujeron bajo temporal.

Para el factor fertilización, en el ciclo P-V 2001 (Cuadro 2), 19 tratamientos resultaron estadísticamente iguales y superiores al resto en su rendimiento de grano, sobresaliendo las fórmulas 129-23-97, 160-120-0, 160-120-120 y 129-97-23, con más de 6 t ha⁻¹. En contraste, en los tratamientos 0-0-0, 0-120-120, 31-23-97, 0-120-0 y 31-97-23, se encontraron los rendimientos más bajos, que variaron entre 4.1 y 4.7 t ha⁻¹. Con relación a la variable rendimiento de rastrojo, los más altos valores se registraron cuando se utilizaron las fórmulas

Cuadro 2. Prueba de DMS a 5% para las variables que causaron significancia en el factor fertilización química. Primavera-Verano 2001.

Tratamiento	Fertilización			Rendimiento	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	de rastrojo	de grano
				----- t ha ⁻¹ -----	
1	0	0	0	6.29 b	4.11 e
2	0	0	120	7.95 ab	4.97 abcde
3	0	120	0	7.30 ab	4.64 bcde
4	0	120	120	7.06 ab	4.39 de
5	160	0	0	8.57 ab	5.61 abcd
6	160	0	120	8.88 a	5.96 ab
7	160	120	0	8.07 ab	6.12 a
8	160	120	120	8.93 a	6.09 a
9	31	23	23	7.34 ab	5.51 abcd
10	31	23	97	7.22 ab	4.50 cde
11	31	97	23	6.88 ab	4.72 bcde
12	31	97	97	7.20 ab	5.13 abcde
13	129	23	23	8.84 a	5.95 ab
14	129	23	97	8.20 ab	6.19 a
15	129	97	23	8.53 ab	6.07 a
16	129	97	97	8.15 ab	5.60 abcd
17	31	60	60	6.93 ab	4.93 abcde
18	129	60	60	8.46 ab	5.82 abc
19	80	23	60	8.24 ab	5.67 abcd
20	80	97	60	7.83 ab	5.56 abcd
21	80	60	23	7.24 ab	5.77 abc
22	80	60	97	8.08 ab	5.66 abcd
23	80	60	60	8.12 ab	5.97 ab
24	80	60	60	7.52 ab	5.25 abcde

160-120-120, 160-0-120 y 129-23-23, con rendimientos de 8.93, 8.88 y 8.84 t ha⁻¹, respectivamente, siendo estadísticamente similares al resto de los tratamientos, excepto al testigo sin fertilizar, el cual rindió 6.29 t ha⁻¹.

En el ciclo P-V 2002, como efecto del factor fertilización en la variable rendimiento de grano, resultó sobresaliente un grupo de 14 tratamientos, estadísticamente similares entre sí. Entre éstos destacan, con un rendimiento superior a 6 t ha⁻¹, las

fórmulas 160-120-0, 160-120-120, 129-97-23, 160-0-0, 129-60-60, 129-23-97 y 129-97-97 (Cuadro 3). Por el contrario, los tratamientos menos rendidores fueron: 0-120-120, 0-0-0, 0-0-120 y 0-120-0, con menos de 4 t ha⁻¹. Con respecto al rendimiento de rastrojo, 13 tratamientos se ubicaron en el grupo superior, de los cuales las combinaciones 160-0-0, 129-23-97, 160-120-120 y 160-120-0 superaron 5.5 t ha⁻¹. Los valores más bajos, con menos de 4 t ha⁻¹, correspondieron a 0-120-120, 0-0-0 y 31-97-23.

En forma general, se observó que, en los dos ciclos de evaluación, el mayor rendimiento de grano y rastrojo se consiguió cuando se incluyeron dosis de 129 a 160 kg ha⁻¹ de N en la fertilización, sin marcarse la influencia de la aplicación de fósforo y potasio, lo cual se debe, en buena medida, a que el suelo, donde se establecieron ambos experimentos, es medianamente pobre en su contenido de N (0.113%), pero posee buen contenido de P disponible (50 mg kg⁻¹) y es rico en K intercambiable (300 mg kg⁻¹) (López, 1998). Esto se corrobora con los tratamientos que registraron los menores rendimientos, ya que éstos correspondieron al testigo sin fertilizar y a los tratamientos en los que se incluyeron las dosis más bajas de N. El Instituto de la Potasa y Fósforo (1990) señaló que cantidades bajas de nitrógeno causan clorosis en las hojas por una disminución de la clorofila, lo cual incide, de manera directa, en la disminución del rendimiento de grano, así como en el contenido de proteína en la semilla. Todo lo anterior pone de manifiesto que el N ocupa una posición excepcional en la nutrición vegetal por la alta cantidad en que las plantas lo requieren (Cruz *et al.*, 2002).

En lo concerniente al factor genotipo, en la evaluación correspondiente al ciclo P-V 2001, aunque el análisis de varianza no detectó significancia para ninguno de los dos parámetros de respuesta, el mayor rendimiento de grano se obtuvo con los híbridos H-512 (T) y H-519 C con 5549 y 5518 kg ha⁻¹, respectivamente, seguidos de HV-521 C y H-363 C con 5438 y 5417 kg ha⁻¹. Con valores de 5323 kg ha⁻¹ y 5303 kg ha⁻¹, respectivamente, H-520 y C-343 (T) presentaron menor capacidad productiva. Estos resultados indican que los híbridos de alta calidad de proteína compiten en rendimiento con los híbridos normales y que, por su valor agregado, representan una opción para mejorar el grado nutricional, principalmente en la población rural que depende de este cereal para cubrir sus necesidades alimenticias (Tinoco *et al.*, 2002). En cuanto a la

Cuadro 3. Pruebas de DMS a 5% para las variables que causaron significancia en el factor fertilización química. Primavera-Verano 2002.

Tratamiento	Fertilización			Rendimiento	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	de rastrojo	de grano
----- t ha ⁻¹ -----					
1	0	0	0	3.24 de	3.29 gh
2	0	0	120	5.23 abc	3.63 gh
3	0	120	0	4.58 bcde	3.73 fgh
4	0	120	120	3.16 e	3.04 h
5	160	0	0	6.60 a	6.19 ab
6	160	0	120	4.53 bcde	5.90 abcd
7	160	120	0	5.51 abc	6.45 a
8	160	120	120	5.59 abc	6.33 ab
9	31	23	23	4.11 cde	4.11 efgh
10	31	23	97	4.58 bcde	4.14 efgh
11	31	97	23	3.81 cde	4.15 efgh
12	31	97	97	4.63 bcde	4.39 defgh
13	129	23	23	5.01 abcd	5.94 abcd
14	129	23	97	5.98 ab	6.05 abc
15	129	97	23	5.07 abc	6.31 ab
16	129	97	97	5.07 abc	6.04 abc
17	31	60	60	4.21 bcde	4.58 cdefgh
18	129	60	60	5.35 abc	6.18 ab
19	80	23	60	4.31 bcde	4.82 bcdefg
20	80	97	60	4.78 bcde	5.23 abcdef
21	80	60	23	4.83 abcde	5.31 abcde
22	80	60	97	5.04 abc	5.30 abcdef
23	80	60	60	5.43 abc	5.82 abcd
24	80	60	60	4.85 abcde	5.27 abcdef

producción de rastrojo, los híbridos normales y de alta calidad proteica obtuvieron rendimientos similares que variaron de 7607 a 8120 kg ha⁻¹.

El análisis estadístico de la información del ciclo P-V 2002 (Cuadro 4) mostró que los mejores genotipos fueron C-343 (T), H-520, H-553 C y H-518 con un rendimiento de grano superior a 5.3 t ha⁻¹. La producción de rastrojo en los genotipos fue similar, excepto en el híbrido C-343 (T) que presentó un rendimiento inferior a 4 t ha⁻¹, debido a que dicho material es de menor altura de planta y follaje. El comportamiento de estos híbridos, con respecto a este parámetro, indica que, a excepción de C-343 (T), cualquiera de ellos se puede cultivar para forraje, principalmente si se trata de híbridos de porte intermedio a alto (Elizondo y Boschini, 2002).

En el ciclo homólogo siguiente (Cuadro 5), aunque para rendimiento de grano tampoco se detectó significancia, sobresalió un grupo de 10 tratamientos que superaron 6.8 t ha⁻¹, donde los más altos rendimientos correspondieron a las fórmulas 160-120-0 aplicada en H-553 C y H-520, 160-120-120 en H-553 C y 129-60-60 en H-520. El menor

Cuadro 4. Prueba de DMS a 5% para las variables que causaron significancia en el factor Genotipos. Primavera-Verano 2002.

No.	Genotipo	Rendimiento	
		de rastrojo	de grano
----- t ha ⁻¹ -----			
1	H-518	4.83 ab	5.30 a
2	H-520	5.00 ab	5.51 a
3	H-519 C	4.99 ab	4.74 ab
4	H-553 C	5.58 a	5.38 a
5	H-558 C	4.84 ab	4.04 b
6	C-343	3.78 b	5.81 a

rendimiento se obtuvo con las combinaciones 0-120-0 aplicada en H-558 C, 0-120-120 en H-519 C, 31-23-97 y 0-120-120 ambas dosis utilizadas en el híbrido H-558 C, cuyo rendimiento no alcanzó 3 t ha⁻¹. Estos resultados denotaron que, en general, los genotipos evaluados respondieron a tratamientos que incluyeron dosis altas de N sin un marcado efecto positivo del P y K. A su vez, cuando este macronutriente no se incluyó en la dosis de fertilización o se adicionó en baja proporción, aún empleando dosis elevadas de P y K, los valores alcanzados en los genotipos fueron considerablemente menores.

En cuanto al rendimiento de rastrojo, la interacción de estos mismos factores en el ciclo P-V 2002 arrojó un grupo de 12 tratamientos sobresalientes de acuerdo con la DMS a 0.05 (Cuadro 6), con rendimiento de 6.42 a 8.15 t ha⁻¹,

Cuadro 5. Tratamientos sobresalientes en cuanto a rendimiento de grano en la interacción Fertilización x Genotipo. Primavera-Verano 2002.

N	P	K	Genotipo	Rendimiento de grano
----- t ha ⁻¹ -----				
160	120	0	H-553 C	7.50
160	120	0	H-520	7.37
160	120	120	H-553 C	7.23
129	60	60	H-520	7.02
160	120	0	C-343	6.98
160	0	0	C-343	6.88
160	0	0	H-553 C	6.88
129	97	23	C-343	6.88
129	97	23	H-520	6.82
129	97	97	H-520	6.81
0	120	0	H-558 C	2.82
0	120	120	H-519 C	2.73
31	23	97	H-558 C	2.55
0	120	120	H-558 C	2.44

donde, a su vez, se observó que los genotipos presentaron diferente respuesta en rendimiento de rastrojo a las dosis de N-P-K empleadas.

Para el análisis económico de los tratamientos de N-P-K, cubiertos con las fuentes urca (46% de N), superfosfato triple de calcio (46% de P₂O₅) y cloruro de potasio (60% de K₂O), respectivamente, se siguió la metodología utilizada por el Departamento de Economía del CIMMYT (1988). Se consideró el promedio de rendimiento de grano obtenido en cada tratamiento de fertilización, de los ciclos P-V 2001 y 2002 y un precio de \$ 1600 t⁻¹ de grano; así como el costo de producción que, según datos oficiales del Distrito de Desarrollo Rural 007 de Veracruz perteneciente a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), para el ciclo P-V 2002, fue de \$ 6598 ha⁻¹, basado en el sistema tradicional del cultivo y que incluyó la dosis de fertilización testigo 129-60-60. El Cuadro 7 muestra que seis tratamientos de fertilización lograron mayores utilidades que el testigo, entre los cuales sobresalen, con las mayores ganancias netas por hectárea, las dosis 160-0-0 y 129-23-23 con una relación beneficio/costo para ambas de 1.53, que indica que, por cada peso que invierte el productor, él obtiene una ganancia de \$ 0.53. Estos resultados superaron al testigo comercial

Cuadro 6. Tratamientos sobresalientes de acuerdo con la DMS a 5% para la variable rendimiento de rastrojo en la interacción Fertilización x Genotipo. Primavera-Verano 2002.

N	P	K	Genotipo	Rendimiento de grano
----- t ha ⁻¹ -----				
160	0	0	H-519 C	8.15*
160	0	0	H-518	7.58*
129	23	97	H-553 C	7.38*
129	23	97	H-518	7.28*
160	0	0	H-558 C	7.18*
80	60	60	H-553 C	7.16*
160	120	0	H-553 C	7.11*
129	23	97	H-520	6.98*
160	0	0	H-553 C	6.88*
0	0	120	H-519 C	6.85*
80	60	97	H-553 C	6.63*
160	0	120	H-553 C	6.42*
31	23	97	H-558 C	2.85
0	0	0	C-343	2.54
0	120	120	C-343	2.41
0	120	120	H-519 C	2.37
0	0	0	H-558 C	2.23
0	120	120	H-518	2.16

* = significancia a 0.05 de probabilidad.

Cuadro 7. Análisis económico del cultivo de maíz bajo diferentes tratamientos de fertilización química.

Tratamiento	N-P-K	Costo fertilización [†]	Costo de producción	Rendimiento de grano	Beneficio bruto	Beneficio neto	Relación B/C	Costo/t de grano
		----- \$ ha ⁻¹ -----	-----	t ha ⁻¹	----- \$ ha ⁻¹ -----	-----		\$
5	160-0-0	1098	6169	5.9	9440	3271	1.53	1046
13	129-23-23	1153	6224	5.95	9520	3296	1.53	1046
14	129-23-97	1466	6537	6.12	9792	3255	1.5	1068
15	129-97-23	1587	6658	6.19	9904	3246	1.49	1076
23	80-60-60	1245	6316	5.89	9424	3108	1.49	1072
7	160-120-0	1803	6874	6.28	10048	3174	1.46	1095
18	129-60-60 (T)[‡]	1526	6598	6	9600	3002	1.45	1100
21	80-60-23	1089	6160	5.54	8864	2704	1.44	1112
6	160-0-120	1606	6677	5.93	9488	2811	1.42	1126
9	31-23-23	500	5571	4.81	7696	2125	1.38	1158
19	80-23-60	1028	6099	5.24	8384	2285	1.37	1164
8	160-120-120	2310	7381	6.21	9936	2555	1.35	1189
22	80-60-97	1402	6473	5.48	8768	2295	1.35	1181
16	129-97-97	1900	6971	5.82	9312	2341	1.34	1198
24	80-60-60	1245	6316	5.26	8416	2100	1.33	1201
20	80-97-60	1462	6533	5.4	8640	2107	1.32	1210
17	31-60-60	874	5945	4.75	7600	1655	1.28	1252
2	0-0-120	598	5669	4.3	6880	1211	1.21	1318
12	31-97-97	1248	6319	4.76	7616	1297	1.2	1327
11	31-97-23	935	6006	4.43	7088	1082	1.18	1356
1	0-0-0	0	5071	3.7	5920	849	1.17	1371
10	31-23-97	813	5884	4.32	6912	1028	1.17	1362
3	0-120-0	794	5866	4.19	6704	838	1.14	1400
4	0-120-120	1302	6373	3.72	5952	-421	0.93	1713

Costo de producción oficial DDR 007 Veracruz: \$ 6598 ha⁻¹. Precio de venta: \$ 1600 t⁻¹. Precio por kilogramo: N, \$ 5.74; P₂O₅, \$ 5.87; y K₂O, \$ 4.23.

[†] Incluye insumos y uno o dos jornales de aplicación, según el tratamiento. [‡] T: Dosis testigo recomendada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

que, aunque obtuvo un rendimiento de grano similar (6 t ha⁻¹), su utilidad y relación beneficio/costo fueron inferiores, lo cual se explica porque su costo de fertilización superó en 28 y 24.4% a los dos tratamientos mencionados. Además, este testigo tuvo un precio de \$ 1100 t⁻¹ de grano producida, que resultó en \$ 54 más caro que los dos tratamientos que alcanzaron mayor relación beneficio/costo. Sin embargo, aunque económicamente los tratamientos 160-0-0 y 129-23-23 son equiparables con la primera dosis, a largo plazo se tendría un mayor costo económico y de conservación del recurso suelo, debido a la pérdida de la fertilidad y recuperación del mismo, lo que provocaría desbalances nutrimentales en el cultivo y una disminución en el rendimiento de grano (Acosta, 1988). Por el contrario, las menores utilidades y más bajas relaciones beneficio/costo se presentaron con los tratamientos 0-120-120, 0-120-0, 31-23-97 y 0-0-0, en los que se observa que la ausencia y dosis muy bajas de N son determinantes en

el rendimiento y en la rentabilidad del cultivo, a pesar de la adición de P y K.

CONCLUSIONES

- Una fertilización balanceada, que incluya la adición de nitrógeno en dosis iguales a o mayores que 129 kg ha⁻¹, es determinante en la obtención de un mayor rendimiento de grano y rastrojo en maíz de temporal.
- Todos los híbridos presentaron similar capacidad productiva, excepto H-558 C y C-343 que obtuvieron el menor rendimiento de grano y rastrojo, respectivamente. Por lo que, por su valor agregado de alta calidad de proteína, C-363 C y H-553 C representan las mejores alternativas de siembra para las áreas tropicales del centro de Veracruz.
- La acción conjunta Fertilización x Genotipos denotó respuesta positiva en rendimiento de grano y rastrojo, tanto en híbridos normales, como en los de alta

calidad de proteína, al incrementar las dosis de fertilización, principalmente en los tratamientos que incluyeron dosis altas de nitrógeno, excepto en C-343 en rendimiento de rastrojo en el último ciclo de evaluación.

- La dosis de fertilización 129-23-23 de N-P-K fue la mejor opción económica y sustentable para el productor de maíz.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Sánchez, R. 1988. Influencia del fósforo en el rendimiento y acumulación de micronutrientes en maíz. *Fitotecnia Mex.* 11: 25-31.
- Cano-Reyes, O., O.H. Tosquy-Valle, M. Sierra-Macias y F.A. Rodríguez-Montalvo. 2001. Fertilización y densidad de población en genotipos de maíz cultivados bajo condiciones de temporal. *Agronomía Mesoamericana* 12: 199-203.
- CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo). 1988. La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: Programa de Economía. México D.F.
- Cruz-Flores, G., D. Flores-Román, G. Alcántar-González, A. Trinidad-Santos y R. Vivanco-Escobar. 2002. Eficiencia de uso de nitrógeno y fósforo en genotipos de trigo, triticale y maíz. *Terra* 20: 411-422.
- Elizondo, J. y C. Boschini. 2002. Producción de forraje con maíz criollo y maíz híbrido. *Agronomía Mesoamericana* 13: 13-17.
- Flores-Lui, L.F. y E. Villarreal-Farias. 1997. Metodología de capacitación en el manejo de programas de mejoramiento continuo de la productividad del maíz y diseño de empresas agropecuarias con capacidad para obtener una rentabilidad sostenible. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D.F.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema climático de Köppen. 3ª ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Instituto de la Potasa y Fósforo. 1990. Manual de fertilidad de suelos. Norcross, Georgia, USA.
- López-Collado, C.J. 1998. Interpretación de los resultados de los análisis químicos de suelos agrícolas. Colegio de Postgraduados. Instituto de Fitosanidad. Campus Veracruz. Manlio Favio Altamirano. Veracruz, México.
- Maya-Losano, J.B. y J.L. Ramírez-Díaz. 2002. Respuesta de híbridos de maíz a la aplicación de potasio en diferentes densidades de población. *Fitotecnia Mex.* 25: 333-347.
- Reyes-Castañeda, P. 1990. Diseño de experimentos aplicados. Editorial Trillas. México, D.F.
- Sierra-Macias, M., A. Palafox-Caballero, O. Cano-Reyes, F.A. Rodríguez-Montalvo, A. Espinoza-Calderón, A. Turrent-Fernández, N. Gómez-Montiel, H. Córdova-Orellana, N. Vergara-Ávila, R. Aveldaño-Salazar, J.A. Sandoval-Rincón, S. Barrón-Freyre, J. Romero-Mora, F. Caballero-Hernández, M. González-Corona y E. Betanzos-Mendoza. 2004. H-553C, híbrido de maíz de calidad proteica para el trópico húmedo de México. *Fitotecnia Mex.* 27: 117-119.
- Tinoco-Alfaro, C.A., F.A. Rodríguez-Montalvo, J.A. Sandoval-Rincón, S. Barrón-Freyre, A. Palafox-Caballero, V.A. Esqueda-Esquivel, M. Sierra-Macias y J. Romero-Mora. 2002. Manual de producción de maíz para los estados de Veracruz y Tabasco. Libro Técnico 9. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Veracruz, México.
- Tosquy, H. y G. Castañón. 1998. Respuesta de fertilización y densidad de siembra en líneas de maíz. *Agronomía Mesoamericana* 9: 113-118.
- Tosquy-Valle, O.H., R. de la Garza-Garza, G. Castañón-Nájera y R. Morones-Reza. 1998. Fertilización edáfica y densidades de población para producción de semilla de líneas de maíz. *Agric. Téc. en México* 24: 111-119.

RESPUESTA DEL PAPAYO AL RIEGO Y A LA FERTILIZACIÓN N-P-K EN UN VERTISOL

Response of Papaya to Irrigation and N-P-K Fertilization in a Vertisol

Adriana Mellado-Vázquez^{1‡}, Víctor Volke-Haller², Mario Tapia-Vargas¹, Prometeo Sánchez-García² y Abel Quevedo-Nolasco²

RESUMEN

Se evaluó la respuesta del papayo (*Carica papaya* L.), variedad Maradol, en términos de rendimiento, eficiencia del uso del agua y productividad económica, a sistemas de riego y fertilización N-P-K en fertirriego, y convencional por surcos y fertilización N-P-K al suelo, en un Vertisol del Valle de Apatzingán, Michoacán, México. Los niveles estudiados fueron: para riego por goteo, con una y dos cintillas; y para fertilización con fertirriego, 220-30-160, 250-40-180 y 280-50-200 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O; a la vez que el sistema convencional consistió de riego por surcos y fertilización al suelo de 200-100-200 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O. El sistema de riego con dos cintillas dio un rendimiento medio de 30.4 t ha⁻¹, el sistema de riego con una cintilla de 19.6 t ha⁻¹ y el riego convencional por surcos de 13.3 t ha⁻¹. No se observó respuesta a la fertilización N-P-K en fertirriego dentro de los sistemas de riego con una y dos cintillas. En los tres sistemas de riego y fertilización estudiados, se observaron concentraciones bajas de K en la planta, altas de Ca y B, y de suficiencia de N, P, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn. La eficiencia de uso del agua fue similar para los sistemas de riego con una y dos cintillas, del orden de 37.3 a 40.6 kg mm⁻¹ ha⁻¹, y menor en el sistema convencional, con un valor de 17.6 kg mm⁻¹ ha⁻¹. Los sistemas de riego con una y dos cintillas presentaron costos totales medios similares, del orden de 49 148 y 50 920 pesos ha⁻¹, respectivamente, y el sistema convencional de 33 912 pesos ha⁻¹. El sistema de riego con dos cintillas dio ingresos netos y tasas de retorno del capital medios de 58 742 pesos ha⁻¹ y 115.5%,

respectivamente, el sistema de riego con una cintilla dio valores de 21 207 pesos ha⁻¹ y 43.1%, respectivamente, y el sistema convencional presentó valores intermedios, de 30 123 pesos ha⁻¹ y 88.8%, respectivamente.

Palabras clave: rendimiento de fruto, eficiencia de uso del agua, respuesta económica.

SUMMARY

The study was conducted to evaluate the effect of drip irrigation and N-P-K fertilization under fertirrigation, and conventional furrow irrigation system and soil N-P-K fertilization, on yield, water use efficiency and economic productivity of papaya (*Carica papaya* L.), cv. Maradol, grown in a Vertisol of Apatzingán Valley, Michoacán, Mexico. The drip irrigation and N-P-K fertilization under fertirrigation system contained one- and two-drip lines and three fertilizer levels of 220-30-160, 250-40-180, and 280-50-200 kg ha⁻¹ of N-P₂O₅-K₂O. The conventional furrow irrigation system and soil fertilizer application contained 200-100-200 kg ha⁻¹ of N-P₂O₅-K₂O. The average yield under irrigation with two-drip lines system was 30.4 t ha⁻¹, with one-drip line system 19.6 t ha⁻¹, and with conventional system 13.3 t ha⁻¹. The concentration of K in plant under drip and furrow irrigation and fertilization systems was low, the concentration of Ca and B was high, and the concentration of N, P, Mg, Fe, Cu, Zn, and Mn was within sufficiency range. The water use efficiency was found to be similar for the one- and two-drip lines irrigation systems, with values of 37.3 and 40.6 kg mm⁻¹ ha⁻¹, respectively, whereas for the conventional irrigation system, the value was 17.6 kg mm⁻¹ ha⁻¹. The one- and two-drip lines irrigation systems had similar mean total costs, of 49 148 and 50 920 Mexican pesos ha⁻¹, respectively, and the conventional irrigation system had a total cost of 33 912 pesos ha⁻¹. The net income and capital return rates were 58 742 pesos ha⁻¹ and 115.5% for the two-drip lines irrigation system, respectively, 21 207

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Uruapan. Av. Latinoamericana 1101, 60080 Uruapan, Michoacán, México.

[‡] Autor responsable (amevaz@colpos.mx).

² Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.

pesos ha⁻¹ and 43.1% for the one-drip hose irrigation system, respectively, and 30 123 pesos ha⁻¹ and 88.8% for the conventional irrigation system, respectively.

Index words: fruit yield, water use efficiency, economic response.

INTRODUCCIÓN

México ocupó, en 2002, el segundo lugar mundial en producción de papayo (*Carica papaya* L.), con 20 445 ha y 876 150 t, y el primer lugar en exportación, con 68 558 t (FAO, 2002). Los principales estados productores son Veracruz, Chiapas, Michoacán, Oaxaca, Jalisco, Nayarit, Yucatán y Colima (SAGARPA, 2003).

El cultivo del papayo sobresale por su importancia social como fuente de empleo, ya que requiere de 150 a 250 jornales al año (un jornal = 8 h de trabajo) para el establecimiento y manejo de una hectárea (Mandujano, 1998). Además, el incremento en la demanda nacional e internacional hace que el cultivo se vislumbre con altas expectativas y excelente rentabilidad para los productores en México (FAO, 1990-1998).

El papayo, por su rápido desarrollo, es muy sensible a la falta de nutrimentos (FAO, 1990-1998), y requiere de suelos con buena capacidad de retención de humedad y buen drenaje (Mandujano, 1993). En cuanto a la fertilización, la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR, 1995) recomendó aplicar dosis de 115-65-100 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O para plantaciones de temporal, repartidas en dos aplicaciones, y dosis de 160-100-160 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O para plantaciones bajo riego, repartidas en tres aplicaciones.

Rico (1998) mencionó que una planta de papayo en pleno desarrollo requiere de un suministro constante de agua, pudiendo llegar a demandar más de 15 L planta⁻¹ d⁻¹ en condiciones de altas temperaturas. Yee *et al.* (1980) recomendaron aplicaciones de agua del orden de 14 L planta⁻¹ d⁻¹ durante periodos húmedos y de 27 a 36 L planta⁻¹ d⁻¹ durante periodos secos. Awada *et al.* (1979) recomendaron aplicar 1.3 veces la evaporación medida en el tanque evaporímetro Tipo A en la semana anterior al riego. La Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR, 1995) reportó que, en trabajos realizados en el municipio de Manlio Fabio en el estado de Guerrero, en un suelo de textura migajón arcillosa, la lámina total de agua a aplicar durante el

periodo sin lluvias varía entre 101 y 112 cm, la cual debe repartirse entre 13 y 16 riegos espaciados cada 12 a 16 días.

El fertirriego es una práctica importante en la agricultura de riego moderna e intensiva y, debido al reducido volumen de suelo humedecido por el riego a presión, permite lograr un adecuado suministro de nutrimentos al sistema radical, sincronizando el suministro de éstos y del agua. En estos términos, es posible realizar aplicaciones frecuentes y en bajas dosis de fertilizante, acopladas al desarrollo y a las fases fenológicas del cultivo, reducir las pérdidas por lixiviación y volatilización, y disminuir la presión osmótica de la solución del suelo (Medrano *et al.*, 1996). También, permite reducir las pérdidas de agua por infiltración y ahorrar mano de obra (Martínez, 1991), y regenerar aguas contaminadas, o de baja calidad, mediante el uso de mejoradores químicos (Cadahia, 1998).

En el trópico subhúmedo de México, en particular en los estados de Michoacán, Jalisco, Colima y Nayarit, la producción de papayo enfrenta problemas como una gran diversidad en los criterios de riego y fertilización, y la carencia de variedades alternativas más adaptadas a las condiciones ambientales, lo que origina bajos rendimientos unitarios, con una producción media regional de 35 t ha⁻¹, altos costos de producción por tonelada de fruta y bajos índices de calidad (Munrro, 1999). Esto indica que es necesaria la creación de patrones de riego y fertilización que conduzcan a mayor rendimiento, disminución de los costos de producción por tonelada de producto, ahorro de agua e incremento de los ingresos de los productores.

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la respuesta del papayo, variedad Maradol, en términos de rendimiento, eficiencia de uso del agua y productividad económica, a los sistemas de riego por goteo y fertilización N-P-K en fertirriego, y convencional por surcos y fertilización N-P-K al suelo, en un suelo del Valle de Apatzingán, Michoacán, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en el Campo Experimental Valle de Apatzingán, Michoacán, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado a 19° 09' N y 102° 03' O. El clima de la región es un BS₁(h')w(w)(i')g (García, 1987), que equivale a un

clima seco, con lluvias en verano, una oscilación térmica anual de las temperaturas medias mensuales entre 5 y 7 °C, una temperatura media anual de 22 °C y en el mes más frío de 18 °C, y una precipitación anual que varía de 400 a 700 mm, de los cuales 5% corresponden a precipitación invernal (INEGI-SEMARNAP, 1998). El suelo es un Vertisol pélico, de textura arcillosa, color gris a negro, con profundidades de 60 a 80 cm y presenta grietas anchas en época de sequía (INEGI, 1981).

El suelo y el agua empleados en el experimento se analizaron previamente con el fin de obtener información sobre la fertilidad del suelo y la calidad del agua de riego. En el Cuadro 1, se presentan algunas características químicas y físicas del suelo, en la profundidad de 0 a 40 cm para las primeras y de 0 a 20 cm y 20 a 40 cm para las segundas; en el Cuadro 2, se presenta el análisis químico del agua de riego.

De acuerdo con los análisis indicados en los Cuadros 1 y 2, el suelo tiene un pH alcalino, pero no presenta problemas de sales, y el agua, además de tener un pH alcalino, tiene una conductividad eléctrica de 0.47 dS m⁻¹ y una relación de adsorción de Na de 3.39, de tal manera que presenta baja probabilidad de desarrollar salinidad y alcanzar valores peligrosos de Na intercambiable (Richards, 1982).

Los factores y sus niveles evaluados, fueron:

- sistema de riego:
 - por goteo con una y dos cintillas
 - por surcos, convencional
- fertilización (kg ha⁻¹, N-P₂O₅-K₂O):
 - en fertirriego por goteo, 220-30-160, 250-40-180 y 280-50-200
 - al suelo, 200-120-200, convencional

Los factores riego por goteo y fertilización en fertirriego y sus niveles, se combinaron en un diseño factorial 2 x 3, adicionándose el tratamiento convencional de riego por surcos y fertilización al suelo, según se indica en el Cuadro 3. El diseño experimental fue de bloques completos al azar, considerándose dos repeticiones.

Las unidades experimentales correspondieron a parcelas de siete hileras, a 2.5 m entre hileras, y de 12 plantas sobre la hilera, a 1.4 m entre plantas, considerando como parcela útil cinco plantas de la hilera central. Las distancias entre hileras y plantas considerados equivalen a una densidad de 2840 plantas ha⁻¹.

La variedad de papayo fue Maradol y las semillas utilizadas se obtuvieron en la empresa Carisem®.

Cuadro 1. Características químicas y físicas del suelo del sitio experimental, a la profundidad de 0 a 40 cm.

Característica [†]	Valor	
Química	0 a 40 cm	
pH (1:2 H ₂ O)	8.3	
CE (1:5 H ₂ O) (dS m ⁻¹)	0.13	
MO (Walkley y Black) (g kg ⁻¹)	9.0	
N (Kjeldahl) (g kg ⁻¹)	0.5	
CIC (NH ₄ COOCH ₃ 1N) (cmol(+) kg ⁻¹)	37.1	
P Olsen (mg kg ⁻¹)	4	
K (NH ₄ COOCH ₃ 1N pH 7) (cmol(+) kg ⁻¹)	1.5	
Ca (NH ₄ COOCH ₃ 1N pH 7) (cmol(+) kg ⁻¹)	89.60	
Mg (NH ₄ COOCH ₃ 1N pH 7) (cmol(+) kg ⁻¹)	32.50	
N-NO ₃ (KCl 2N) (mg N-NO ₃ kg ⁻¹)	17	
Física	0 a 20 cm	20 a 40 cm
Arena (%)	37	47
Limo (%)	16	12
Arcilla (%)	47	41
Clase textural	Arcilla	Arcilla
Humedad a -30 kPa	40.4	32.5
Humedad a -1500 kPa	30.2	21.4
Humedad aprovechable (%)	10.2	11.1

[†]CE = conductividad eléctrica; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio de cationes.

Cuadro 2. Análisis químico del agua de riego.

Determinación [†]	Valor
pH	8.20
CE (dS m ⁻¹)	0.47
CO ₃ ²⁻ (mmol(+) L ⁻¹)	2.04
HCO ₃ ⁻ (mmol(+) L ⁻¹)	3.31
Cl ⁻ (mmol(+) L ⁻¹)	0.48
K ⁺ (mmol(+) L ⁻¹)	0.08
Ca ²⁺ (mmol(+) L ⁻¹)	0.88
Mg ²⁺ (mmol(+) L ⁻¹)	2.74
Na ⁺ (mmol(+) L ⁻¹)	3.07
RAS	3.39
PSI	3.60

[†]CE = conductividad eléctrica; RAS = relación de adsorción de sodio; PSI = porcentaje de sodio intercambiable.

Cuadro 3. Tratamientos de riego y fertilización.

Tratamiento	Sistema de riego	Fertilización N-P ₂ O ₅ -K ₂ O kg ha ⁻¹
1	Goteo, una cintilla	Fertirriego, 220-30-160
2		Fertirriego, 250-40-180
3		Fertirriego, 280-50-200
4	Goteo, dos cintillas	Fertirriego, 220-30-160
5		Fertirriego, 250-40-180
6		Fertirriego, 280-50-200
7	Surcos, convencional	Al suelo, 200-120-200, convencional

El vivero de papayo se estableció el 26 de julio de 1999, empleándose bolsas de plástico de 8 x 12 cm y, como sustrato, musgo esfaguíneo (peat moss). El trasplante se realizó el 25 de septiembre del mismo año, a 61 días.

Las dosis de fertilización para los tratamientos de fertirriego se distribuyeron, en porcentaje y cantidad, para las etapas de trasplante, floración y fructificación, según se indica en el Cuadro 4. Los fertilizantes empleados fueron urea (46% N), ácido fosfórico (55% P₂O₅) y nitrato de potasio (13% N y 26% K₂O).

La fertilización del tratamiento de riego y fertilización convencional se realizó con nitrato de amonio (33% N), superfosfato triple de calcio (46% P₂O₅) y cloruro de potasio (60% K₂O), y se aplicó por planta, repartida en tres oportunidades, a 61, 100 y 210 días después del trasplante (ddt), incorporándola al suelo con una escarda.

En todos los tratamientos de riego y fertilización, se realizaron aplicaciones foliares de Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B, cada 15 días durante los primeros 205 días del cultivo, a la vez que se aplicaron los insecticidas y fungicidas que se recomiendan para el cultivo en la región.

El riego se realizó con base en: la evapotranspiración potencial (cuando ésta alcanzó niveles de 80% de la evaporación de un tanque evaporímetro estándar Tipo A), la humedad aprovechable del suelo en la profundidad radical del cultivo (20 cm para los primeros 133 días de cultivo y 40 cm para el resto del ciclo), y la precipitación pluvial medida, tratando que la humedad disponible del suelo no bajase de 50% (Azevedo y Acosta, 1976). La frecuencia de riego fue, en la mayor parte del ciclo, diariamente para el riego por goteo y semanalmente para el riego convencional.

A 181 y 227 ddt, se realizaron muestreos de pecíolos de hojas recientemente maduras y desarrolladas, para determinar: N, mediante

semi-microkjeldahl y destilación por arrastre de vapor; P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn, por digestión húmeda, y medición en IPC; y B, a través de extracción con agua caliente y colorimetría con azometina-H (Westerman, 1990).

Con los valores de rendimiento y lámina de agua, se calculó la eficiencia de uso del agua para los sistemas de riego, en kilogramos de producto por hectárea por milímetro de lámina de agua.

El análisis económico se realizó con base en los ingresos netos y tasas de retorno del capital de los tratamientos de riego y fertilización con fertirriego y tratamiento convencional, considerados como:

$$- \text{Ingreso neto} = (\text{ingreso total}) - (\text{costo total})$$

Donde:

· ingreso total = producto x (precio del producto observado en la zona) - (costo de cosecha + costo de transporte del producto); y

· costo total, comprende: costo de vivero (sustrato, bolsas de plástico, semilla), labores de preparación del suelo (barbecho, cruza, rastreo, surcado y regaderas en sistema de riego convencional), sistema de riego por goteo (equipo y materiales), insumos (fertilizantes, agroquímicos, agua de riego), y mano de obra (trasplante, aplicación de agroquímicos y riego, deschupone, deshierbes).

$$- \text{Tasa de retorno del capital} = (\text{ingreso neto}) / (\text{costo total})$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lámina de Agua, Rendimiento, Eficiencia de Uso del Agua y Contenido Nutricional en Pecíolo

El período del experimento comprendió de 401 días, desde el trasplante el 25 de septiembre de 1999 hasta el último corte de fruto el 31 de octubre de 2000, comenzando la cosecha en el día número 243, el

Cuadro 4. Porcentaje y cantidad de fertilizante para cada etapa de aplicación.

Etapa	Porcentaje			Fertilización N-P ₂ O ₅ -K ₂ O		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
				----- kg ha ⁻¹ -----		
Trasplante	40	50	25	88-14-40	100-20-45	112-25-50
Floración	35	25	50	77-08-40	88-10-90	98-13-100
Fructificación	25	25	25	55-08-80	62-10-45	70-12-50
Total	100	100	100	220-30-160	250-40-180	280-50-200

26 de mayo de 2000. Sin embargo, las plantas continuaron produciendo con base en la segunda floración desde el día número 431 (30 de noviembre) hasta el día número 521 (28 de febrero de 2001), producción que fue considerada en el análisis económico.

De acuerdo con la cuantificación del agua aplicada en los riegos y la precipitación pluvial, en el Cuadro 5 se presentan la lámina de riego aplicada, la precipitación y la lámina total de agua durante el período comprendido entre el 25 de septiembre y el 27 de octubre de 2000, esto es 397 días, para los sistemas de riego con una y dos cintillas y el sistema de riego convencional.

Cabría señalar que en este período se presentaron algunos síntomas de deficiencia de agua durante el ciclo de crecimiento del cultivo, apreciándose como leves para el sistema de riego con dos cintillas y leves a moderados para los sistemas de riego con una cintilla y convencional.

El análisis de varianza realizado para el rendimiento presentó un coeficiente de variación de 21.2%, e indicó: significancia para el factor sistema de riego y no-significancia para el factor fertilización N-P-K en fertirriego. En el Cuadro 6, se presenta el rendimiento medio obtenido para los sistemas de riego con una y dos cintillas y fertilización en fertirriego, y para el sistema de riego y fertilización convencional, considerando la prueba de comparación de medias de acuerdo con el diseño de tratamientos de arreglo factorial, más el tratamiento convencional, el cual se comparó con los demás tratamientos según un diseño experimental de bloques completos al azar.

De acuerdo con este análisis, puede destacarse que (1) el sistema de riego con dos cintillas dio un rendimiento mayor que el sistema de riego con una cintilla, resultando en rendimientos medios de 30.4 y 19.6 t ha⁻¹ para ambos sistemas respectivamente; (2) el sistema de riego y fertilización convencional dio un rendimiento ligeramente menor que el sistema de

Cuadro 5. Lámina de riego aplicada y lámina total de agua correspondiente al período comprendido entre el 25 de septiembre de 1999 y el 27 de octubre de 2000, por sistema de riego.

Sistema de riego	Lámina aplicada	Precipitación	Lámina total
	----- mm -----		
Una cintilla	481	569	1050
Dos cintillas	816	569	1385
Convencional	755	569	1324

Cuadro 6. Rendimiento de papaya, por sistema de riego y fertilización.

Sistema de riego	Fertilización N-P ₂ O ₅ -K ₂ O kg ha ⁻¹	Rendimiento t ha ⁻¹
Una cintilla	220-30-160	17.892 b ¹
	250-40-180	19.449 b
	280-50-200	21.328 b
Dos cintillas	220-30-160	31.240 a
	250-40-180	32.816 a
	280-50-200	27.155 a
Convencional	200-120-200	13.308 b

¹ Las medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey, P = 0.05).

riego con una cintilla, con valores de rendimiento medios de 13.3 y 19.6 t ha⁻¹, respectivamente, aunque la diferencia no fue significativa estadísticamente.

El rendimiento medio máximo alcanzado con el sistema de riego con dos cintillas, de 30.4 t ha⁻¹, se logró en un período de cosecha de 158 días y fue similar al que los productores obtienen en la zona de estudio, de tal manera que no se lograron mejoras en el rendimiento. Un motivo de esto bajo rendimiento pudo ser la virosis presentada [determinación realizada según la metodología propuesta por Velasco *et al.* (2001)] del orden de: 70% con síntomas ligeros, 24% con síntomas moderados y 6% con síntomas severos, a 131 ddt, lo que pudo haber tenido un efecto no cuantificado en el rendimiento.

El menor rendimiento obtenido para el sistema de riego con una cintilla en relación con el sistema con dos cintillas, puede asociarse con la menor lámina de agua que recibió y, tal vez, con los síntomas leves a moderados de deficiencia de agua que se observaron en este sistema. Por su parte, el menor rendimiento obtenido para el sistema de riego convencional con respecto al sistema con dos cintillas, que recibió una lámina de agua similar a este último, puesto que también presentó síntomas leves a moderados de deficiencia de agua, habría que atribuirlo a una menor eficiencia del riego por surcos en comparación con el riego por goteo.

En relación con la eficiencia de uso del agua, en términos del rendimiento por lámina de agua aplicada, en el Cuadro 7 se presenta esta eficiencia para los sistemas de riego con una y dos cintillas y el sistema convencional.

De estos valores de eficiencia de uso del agua destacan los mayores valores obtenidos para los sistemas de riego con una y dos cintillas, de 37.3 y

Cuadro 7. Eficiencia de uso del agua por sistema de riego.

Sistema de riego	Eficiencia de uso del agua	
	km mm ⁻¹ ha ⁻¹	
Una cintilla	40.6	
Dos cintillas	37.3	
Convencional	17.6	

40.6 kg mm⁻¹ ha⁻¹, respectivamente, en comparación con el sistema convencional de riego por surcos, de 17.6 kg mm⁻¹ ha⁻¹, siendo ellos similares a los reportados por Srinivas (1996), quien encontró para papayo, regado mediante riego por goteo, una eficiencia de uso del agua de 37.2 kg mm⁻¹ ha⁻¹, aunque con un rendimiento mayor de 110.6 t ha⁻¹. Por su parte, el menor valor de eficiencia de uso del agua del sistema convencional de riego por surcos estaría indicando una menor eficiencia de aprovechamiento del agua por este sistema de riego.

La no respuesta del papayo a la fertilización con fertirriego en los sistemas de riego por goteo indica que las dosis de fertilización no afectaron el rendimiento. Tratando de entender este comportamiento, en el Cuadro 8 puede observarse que, de acuerdo con los estándares internacionales (Mills y Jones, 1991), en todos los sistemas de riego la concentración de K en peciolo se ubicó en un nivel deficitario en ambas fechas de muestreo, con valores menos bajos en los sistemas de riego con dos cintillas y convencional. Esta situación podría ser una causa del bajo rendimiento obtenido, al menos en el sistema de riego con dos cintillas, y que no hubiese respuesta a los niveles de fertilización en fertirriego estudiados.

Cuadro 8. Concentración media de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y B en peciolo de papayo, a 181 y 227 días después del trasplante, por sistema de riego y fertilización.

Nutriente	Sistema de riego y fertilización, y días desde el trasplante						Nivel de suficiencia
	Goteo-		Goteo-		Convencional:		
	1 cintilla, fertirriego		2 cintillas, fertirriego		surcos, al suelo		
	181	227	181	227	181	227	
N (%)	0.52	1.01	0.49	1.31	0.99	1.37	1.01-2.50 [†]
P (%)	0.14	0.25	0.20	0.38	0.14	0.26	0.22-0.40
K (%)	0.35	1.82	0.61	2.53	0.68	2.37	3.30-5.50
Ca (mg kg ⁻¹)	7.40	3.65	6.03	3.35	5.31	3.74	1.00-3.00
Mg (mg kg ⁻¹)	1.43	1.19	1.31	0.97	0.83	1.11	0.40-1.20
Fe (mg kg ⁻¹)	44	32	42	39	32	92	25-100
Cu (mg kg ⁻¹)	52	5	52	9	36	7	4-10
Zn (mg kg ⁻¹)	16	18	13	19	15	21	15-40
Mn (mg kg ⁻¹)	34	24	38	29	52	34	20-150
B (mg kg ⁻¹)	97	65	103	57	112	61	20-30

[†] Nivel de suficiencia, 1.01-2.50; nivel de deficiencia, < 1.01; nivel de toxicidad, > 2.50.

Llama la atención que los bajos valores de K coinciden con valores muy altos y altos de Ca a 181 y 227 ddt, respectivamente, situación que, en menor medida, se observa también para el Mg a 181 ddt para los sistemas de riego por goteo. Al respecto, cabría señalar que, en la primera fertilización en fertirriego, se utilizó nitrato de Ca como fuente de N y que, posteriormente, conjuntamente con el Mg, se continuó aplicando foliarmente a todo el experimento hasta 205 ddt.

Por otra parte, se observaron altas concentraciones de Cu a 181 ddt, las que bajaron a medias a 227 ddt, y concentraciones muy altas de B en ambas fechas, para todos los sistemas de riego. En este sentido, se debe aclarar que, en el caso del Cu, se aplicó el fungicida Cupravit antes de 181 ddt y, en el caso del B, se realizaron aplicaciones cada 15 días hasta 205 ddt. De los demás nutrimentos, el N pasó de un nivel deficitario a 181 ddt a uno de suficiencia a 227 ddt en los sistemas de riego por goteo, y mostró un nivel suficiente en el sistema de riego convencional; el P mostró un nivel deficitario a 181 ddt y suficiente a 227 ddt, en los tres sistemas de riego; y el Fe, Zn y Mn, presentaron niveles de suficiencia a 181 y 227 ddt en los tres sistemas de riego.

Análisis Económico

El análisis económico realizado comprendió el período: 1) para los costos totales, desde el establecimiento del vivero (26 de julio de 1999) hasta el final de la segunda cosecha (28 de febrero de 2001; 2) para la cosecha, del 26 de mayo al 31 de octubre de

2000 para la primera floración, y del 30 de noviembre de 2000 al 28 de febrero de 2001 para la segunda floración; y 3) para los ingresos netos y tasas de retorno del capital, desde el establecimiento del huerto (25 de septiembre de 1999) hasta el final de la cosecha (28 de febrero de 2001 (521 días).

La producción de la segunda cosecha se estimó con base en el número de frutos, con peso medio de 1.2 kg, y que para calcular los ingresos netos se consideró el precio promedio de mercado en la región de Apatzingán en el período de mayo a noviembre de 2000, de 2.17 pesos kg^{-1} , para la producción de la primera floración, y de diciembre de 2000 a febrero de 2001, de 0.93 pesos kg^{-1} , para la producción de la segunda floración, precios a los cuales se les descontó 0.40 pesos kg^{-1} , equivalente al costo de la cosecha y del transporte.

En el Cuadro 9, se observa que los sistemas de riego por goteo con una y dos cintillas presentaron costos totales similares, del orden de 48 377 a 49 915 pesos ha^{-1} para el primero y de 50 157 a 51 695 pesos ha^{-1} para el segundo, y superiores a aquel del sistema de riego y fertilización convencional, con un valor de 33 912 pesos ha^{-1} . Estos mayores costos totales obtenidos para el sistema de riego por goteo, fundamentalmente corresponden al mayor costo por concepto del riego por goteo (agua y aplicación) en comparación con el riego convencional por surcos, con valores de 22 400 y 5 355 pesos ha^{-1} , respectivamente. Por su parte, el sistema de riego convencional presentó un mayor costo por concepto de mano de obra que el sistema de riego por goteo, con valores de 7467 y 728 pesos ha^{-1} , respectivamente.

Dentro del sistema de riego por goteo y fertilización en fertirriego, el riego con dos cintillas proporcionó ingresos netos medios para los tres

niveles de fertilización mayores que el riego con una cintilla, con valores de 58 742 y 21 207 pesos ha^{-1} , respectivamente, lo que tendría su explicación en el mayor rendimiento que dio el primero, ya que ambos presentaron costos totales similares. A su vez, el sistema de riego y fertilización convencional proporcionó ingresos netos algo superiores al sistema de riego por goteo con una cintilla, del orden de 30 123 pesos ha^{-1} .

También dentro del sistema de riego por goteo y fertilización en fertirriego, el riego con dos cintillas presentó tasas de retorno del capital medias mayores que el riego con una cintilla, del orden de 115.5 y 43.1%, respectivamente, lo que también tendría su explicación en los mayores rendimientos e ingresos netos que proporcionó el primero. Por otra parte, el sistema de riego y fertilización convencional dio una tasa de retorno de 88.8%.

El criterio de decisión, en relación con el tratamiento óptimo económico corresponde, para: capital ilimitado, al máximo ingreso neto y una tasa de retorno del capital superior a un valor mínimo que, en este caso, se estableció en 40% (Cruz y Santiago, 1990); y, capital limitado, a una tasa de retorno del capital superior a un valor mínimo, de 40%.

De acuerdo con estos criterios de decisión, el sistema de riego y fertilización a recomendar sería, para capital ilimitado, el riego con dos cintillas y la menor fertilización, puesto que da los mayores ingresos netos y una tasa de retorno al capital superior a 40%.

El sistema de riego y fertilización convencional, si bien tiene menores costos y proporcionó una tasa de retorno del capital mayor del 40%, presentó una baja eficiencia de uso del agua, por lo que su recomendación no sería conveniente.

Cuadro 9. Costo de producción, rendimiento, ingreso neto y tasa de retorno del capital, por sistema de riego y fertilización.

Sistema de riego	Fertilización N-P ₂ O ₅ -K ₂ O kg ha ⁻¹	Costo total pesos ha ⁻¹	Rendimiento		Ingreso neto pesos ha ⁻¹	Tasa de retorno del capital %
			1ª flor. [†]	2ª flor.		
			- - - - t ha ⁻¹ - - - -			
Una cintilla	220-30-160	48 377	17.89	67.43	19 026	39.3
	250-40-180	49 148	19.45	67.43	21 017	42.8
	280-50-200	49 915	21.33	67.43	23 577	47.2
Dos cintillas	220-30-160	50 157	31.24	105.37	60 984	121.6
	250-40-180	50 920	32.82	105.37	63 017	123.8
	280-50-200	51 695	27.16	105.37	52 224	101.0
Tradicional	200-120-200	33 912	13.31	76.37	30 123	88.8

[†] flor. = floración.

CONCLUSIONES

- El sistema de riego con dos cintillas presentó un rendimiento medio superior al sistema de riego con una cintilla y al sistema de riego convencional por surcos, siendo similar el de estos dos últimos.
- La eficiencia de uso del agua fue similar entre los sistemas de riego con una y dos cintillas, de 37.3 y 40.6 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente, y menor para el sistema de riego convencional por surcos, de 17.6 kg ha⁻¹ mm⁻¹.
- Las dosis de fertilización en fertirriego no influyeron sobre el rendimiento obtenido en los sistemas de riego con una y dos cintillas, resultados que se asociaron con concentraciones deficitarias de K en la planta, lo que pudo afectar al rendimiento.
- Los costos de producción fueron similares entre los sistemas de riego con una y dos cintillas, y superiores a los del sistema de riego convencional por surcos, del orden de 142.7 a 147.9% superiores.
- El sistema de riego con dos cintillas presentó ingresos netos y tasas de retorno del capital mayores que el sistema de riego con una cintilla, a la vez que el sistema de riego convencional por surcos presentó valores intermedios.
- Considerando el rendimiento, los ingresos netos y una tasa de retorno mínima de 40%, el sistema de riego con dos cintillas resultó ser económicamente el mejor, en las condiciones del presente estudio.

LITERATURA CITADA

- Awada, M., I-pai Wu, R.H. Suehisa y M.M. Padgett. 1979. Effects of drip irrigation and nitrogen fertilization on vegetative growth, fruit yield, and mineral composition of the petioles and fruits of papaya. Hawaii Agri. Exp. Sta. Tech. Bull. 103. University of Hawaii. Honolulu, Hawaii.
- Cadahia L., C. 1998. Fertirrigación: Aspectos básicos. pp. 65-79. In: C. Cadahia L. (ed.). Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- De Azevedo N., J.M. y G. Acosta A. 1976. Manual de hidráulica. Harper and Row Latinoamericana. México, D.F.
- De la Cruz I., V. y M.J. Santiago C. 1990. La microempresa agropecuaria como instrumento de modernización del agro. Comercio Exterior 40: 853-858.
- Doorenbos, J.D. y H.A. Kassam. 1986. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Riego y Drenaje. 33. Food and Agricultural Organization. Roma, Italia.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2002. Faostat Database. Disponible en <http://faostat.fao.org/faostat/collections?subset=agriculture> (revisado el 30 de mayo de 2003).
- García M., E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Cuarta edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1981. Carta Edafológica (escala 1:1 000 000. pp. 152-169. In: Atlas Nacional del Medio Físico. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI-SEMARNAP (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 1998. Estadísticas del medio ambiente. México, 1997. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Mandujano B., R.A. 1993. El papayo. Ed. Agrofrut. Xalapa, Veracruz, México.
- Mandujano B., R.A. 1998. Papayo y su producción en México. pp. 86-106. In: Fruticultura avanzada: Cultivo, manejo y exportación. Fundación Salvador Sánchez Colín y CICTAMEX-CONACYT. Ixtapan de la Sal, estado de México.
- Martínez E., R. 1991. Riego localizado: Diseño y evaluación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Medrano S., E., A.C. Queiroz P. y J.A. Azevedo. 1996. Manejo de irrigação e fertigação na cultura da mangueira. Documento 61. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Planaltina, Brasil.
- Mills, H.A. y J.B. Jones, Jr. 1991. Plant analysis handbook. A practical sampling preparation analysis and interpretation guide. MicroMacro Publishing. Athens, GA.
- Munro O., D. 1999. Tecnología de producción de papayo (*Carica papaya* L.) para el trópico seco del Centro del Pacífico de México en el 2000. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Uruapan, Michoacán, México.
- Richards, L.A. 1982. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Trad. al español por N. Sánchez D., E. Ojeda T., R. Vera y Zapata, y R. Chena G. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Limusa. México, D.F.
- Rico P., S. 1998. Producción de papayo Maradol. Gobierno del Estado de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- SAGAR (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural). 1995. Sistema producto Papaya. México, D.F.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación). 2003. Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos, 2002. Por cultivo. México, D.F.
- Srinivas, K. 1996. Plant water relations, yield, and water use of papaya (*Carica papaya* L.) at different evaporation - replenishment rates under drip irrigation. Trop. Agric. 73: 75-80.
- Velasco-Velasco, V.A., G. Alcántar-González, P. Sánchez-García, E. Estañol-Botello, E. Zavaleta-Mejía, E. Cárdenas-Soriano, R. Rodríguez-Montessoro y A. Martínez-Garza. 2001. Efecto de N, P y K en plantas de chile jalapeño infectadas con el virus jaspeado del tabaco. Terra 19: 117-125.
- Westerman, R.L. 1990. Soil testing and plant analysis. Third edition. Book Series 3. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Yee, W.Y.J., T.T. Sekioka, H.Y. Nckasone, D.K. Ikehara, J.J. Ooka y E.K. Akamine. 1980. Evaluation of papaya lines and cultural practices at Moloaa, Island of Kanai, Hawaii. Hawaii Coop. Ext. Serv. Circ. 497. University of Hawaii. Honolulu, Hawaii.

Revisores de este número
Reviewers of this number

Alarcón, Alejandro	Montecillo, estado de México
Alcantar González, Gabriel	Montecillo, estado de México
Álvarez Sánchez, Ma. Edna	Chapingo, estado de México
Belloso, Claudio	Rosario, Argentina
Bullón Ames, Juan	Chillán, Chile
Buschiazzo, Daniel E.	Santa Rosa, Argentina
Campos Cascaredo, Adolfo	Xalapa, Veracruz, México
Cruz Flores, Gerardo	Distrito Federal, México
Espinosa E., José Refugio	Chapingo, estado de México
De la Horra, Ana María	Capital Federal, Argentina
Gallardo Lancho, Juan Fernando	Salamanca, España
García Legaspi, Guillermo	Torreón, Coahuila, México
Gardezi, Abdul Khalil	Montecillo, estado de México
Krasilnikov, Pavel V.	Distrito Federal, México
López Alcocer, Eduardo	Guadalajara, Jalisco, México
López Jiménez, Alfredo	Montecillo, estado de México
Maldonado Torres, Ranferi	Chapingo, estado de México
Martínez Rubin de Celis, Enrique	Torreón, Coahuila, México
Morales López, Alfredo Enrique	Temuco, Chile
Olalde Portugal, Víctor	Irapuato, Guanajuato, México
Palacios Mayorga, Sergio	Distrito Federal, México
Palma López, David J.	H. Cárdenas, Tabasco, México
Parada Carrasco, Ana María	Santiago, Chile
Pérez-Moreno, Jesús	Montecillo, estado de México
Pérez-Zamora, Octavio	Colima, Colima, México
Pinceda Pinceda, Joel	Chapingo, estado de México
Poch Claret, Rosa María	Lleida, España
Ramírez Gama, Rosa María	Distrito Federal, México
Sánchez del Castillo, Felipe	Chapingo, estado de México
Santibañez Quezada, Fernando	Santiago, Chile
Segura Castruita, Miguel Ángel	Torreón, Coahuila, México
Tijerina Chávez, Leonardo	Montecillo, estado de México
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México
Varnero Moreno, María Teresa	Santiago, Chile
Villegas Moreno, Javier	Morelia, Michoacán, México

Editores Técnicos de este número
Technical Editors of this number

Acevedo Sandoval, Otilio A.	Pachuca, Hidalgo, México
Aguirre Gómez, Arturo	Cuautitlan Izcalli, estado de México
Almaguer Vargas, Gustavo	Chapingo, estado de México
Álvarez Sánchez, Ma. Edna	Chapingo, estado de México
Corlay Chee, Langen	Chapingo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
Espinosa Victoria, David	Montecillo, estado de México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
López Alcocer, Eduardo	Guadalajara, Jalisco, México
Maldonado Mendoza, Ignacio E.	Ithaca, NY
Rodríguez Mendoza, Ma. Nieves	Montecillo, estado de México
Sánchez del Castillo, Felipe	Chapingo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México
Segura Castruita, Miguel	Torreón, Coahuila, México
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México



TERRA *Latinoamericana*

FORMATO PARA LA SUSCRIPCIÓN ELECTRÓNICA A LA REVISTA *TERRA Latinoamericana*

Para el envío de todos los números de un año (a partir de 2003), el costo de suscripción electrónica es de \$200.00 pesos o su equivalente en dólares.

a) Pago con de tarjeta de crédito

Envíe su solicitud con los siguientes datos:

Nombre: _____

Dirección: _____

Numero de tarjeta: _____

Fecha: _____ Monto (pesos): _____

Ciudad: _____ Estado: _____

País: _____ e-mail¹: _____

Teléfono: _____ Fax: _____

¹ 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.

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