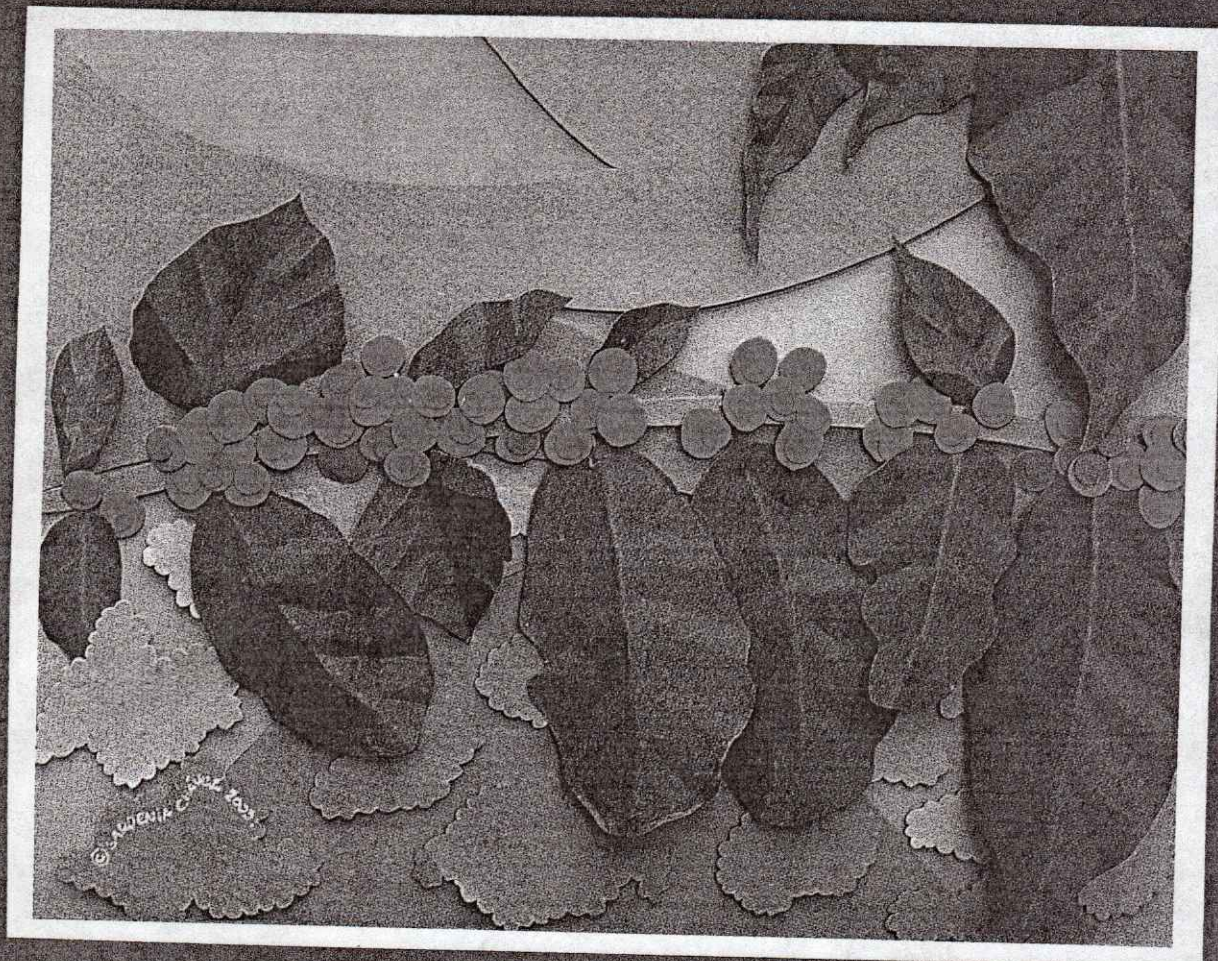


ISSN 0187-5779

TERRA

Latinoamericana

ENERO - MARZO DE 2004 • VOLUMEN 22 • NUMERO 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	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
EDITORES TECNICOS	Dr. David Cristóbal Acevedo
	Dra. Ma. del Carmen González Chávez
	Dra. Edna Álvarez Sánchez
	Dr. Mateo Vargas Hernández
	Dra. Carmen Gutiérrez Castorena
	Dr. David Espinosa Victoria
	Dr. Manuel Sandoval Villa
EDITORES DE ESTILO	M.C. Jorge Alvarado López
	M.C. Langen Corlay Chee
	Ina Aalmers de Aguilar
EDITORA DE ESTILO EN INGLES	Diane Fumiko Miyoshi Udo

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

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

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

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

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

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

TERRA

Latinoamericana

EDITORIAL COMMITTEE

EDITOR	Dr. Antonio Vázquez Alarcón
ASSOCIATE EDITOR	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
TECHNICAL EDITORS	Dr. David Cristóbal Acevedo Dra. Ma. del Carmen González Chávez Dra. Edna Alvarez Sánchez Dr. Mateo Vargas Hernández Dra. Carmen Gutiérrez Castorena Dr. David Espinosa Victoria Dr. Manuel Sandoval Villa
STYLE EDITORS	M.C. Jorge Alvarado López M.C. Langen Corlay Chee Ina Aalmers de Aguilar
ENGLISH EDITOR	Diane Fumiko Miyoshi Udo
EDITORIAL STAFF	Ina Aalmers de Aguilar Sofía Blancas Cando Ricarda Torres Estrada Gardenia Chávez Peña
Cover design	

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

TERRA

Latinoamericana

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 2003-2005

Presidente
Vicepresidente
Secretario General
Tesorero
Secretario Técnico
Secretaria de Relaciones Internacionales
Vocales

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

DIVISIONES Y DISCIPLINAS

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

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

División II: Relación Suelo - Clima - Biota

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

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

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

División IV: Educación y Asistencia Técnica

- a) Educación
- b) Crédito y Asistencia Técnica

TERRA Latinoamericana registro en trámite.
Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Enero - Marzo de 2004 Volumen 22 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

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

President
Vicepresident
Secretary
Treasurer
Technical Adviser
International Relations
Voters

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

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Assistance

TERRA Latinoamericana Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
January - March, 2004 Volume 22 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 2004 • VOLUMEN 22 • NUMERO 1
JANUARY - MARCH, 2004 • VOLUME 22 • NUMBER 1

DIVISION I

- 1 Sedimentos del ex-lago de Texcoco y su comportamiento con la aplicación de materiales calcáreos y compactación.
Sediments of the ex-lake of Texcoco, and their behavior with the application of calcareous materials and compactation.
Guillermo López-Avila, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena, Carlos A. Ortiz-Solorio, David Flores-Román y Miguel A. Segura-Castruita
- 11 Los tepetates de la ladera oeste del cerro Tláloc: Saprolita, sin endurecimiento pedológico.
Tepetates of the Western hillside of cerro Tláloc: Saprolite, without pedologic induration.
Silvia Rodríguez-Tapia, Carlos A. Ortiz-Solorio, Claudia Hidalgo-Moreno y Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena
- 23 Análisis de imágenes SPOT: Erosión en la región montañosa del sur de la península de Baja California, México.
Analysis of SPOT satellite imagery: Soil erosion in the mountainous region of the South of Baja California peninsula, Mexico.
Yolanda Maya, Bernard Lacaze, Mario Monteforte y Marie-Françoise Passini
- 35 Comportamiento de la compactación y humedad del suelo en función de los implementos de labranza.
Behavior of soil compaction and soil moisture under different tillage systems.
Enrique Martínez-Rubin de Celis, Horacio Barron-Reyna, José Dimas López-Martínez y Ricardo David Valdez-Cepeda

DIVISION II

- 41 Tratamiento de semilla de chile con ácidos salicílico y sulfosalicílico y respuesta de las plántulas al frío.
Pepper seed treatment with salicylic and sulfosalicylic acid and response of seedlings to cold stress.
Adalberto Benavides-Mendoza, Alicia Marcelina Salazar-Torres, Francisca Ramírez-Godina, Valentín Robledo-Torres, Homero Ramírez-Rodríguez y Ratikanta Maiti

- 49 Adaptación del frijol a sequía en la etapa reproductiva.
Adaptation of common bean to drought stress during the reproductive stage.

*Efraín Acosta-Díaz, Carlos Trejo-López,
Lucero del Mar Ruiz-Posadas, J. Saúl Padilla-Ramírez y
Jorge A. Acosta-Gallegos*

- 59 Respuesta de la planta y del suelo a inoculación con *Glomus intraradices* y rizobacterias en maíz en cultivo intensivo.
Response of plant and soil to *Glomus intraradices* and rhizobacteria inoculation of maize under intensive cultivation.

C. Robles y J. M. Barea

DIVISION III

- 71 Productividad del tepetate con sistemas rotacionales.
Productivity of hardened volcanic soil under rotatory systems.

*Hermilio Navarro-Garza, Antonia Pérez-Olvera y
Diego Flores-Sánchez*

- 81 Influencia del tipo de drenaje en el aprovechamiento de nitrógeno por la caña de azúcar.
Influence of type of drainage on nitrogen uptake by sugar cane.

*M. A. Estrada-Botello, I. Nikolskii-Gavrilov,
J. D. Etchevers-Barra, F. Gavi-Reyes, O. L. Palacios-Vélez,
J. D. Palma-López y J. D. Mendoza-Palacios*

- 91 Delimitación de áreas salinas en el distrito de riego de Caborca, Sonora, México.
Delimitation of saline areas in the irrigation district of Caborca, Sonora, Mexico.

*Benjamín Zamudio-González, Luis López-Pérez,
Gabriel Alcántar-González, Diego R. González-Eguiarte,
José Ariel Ruiz-Corral y Javier Z. Castellanos*

- 99 Rendimiento y concentración nutrimental foliar de árboles de limón mexicano fertilizados con nitrógeno, fósforo y potasio.
Yield and leaf nutrimental concentration in Mexican lime fertilized with nitrogen, phosphorus, and potassium.

Octavio Pérez-Zamora y José Orozco-Romero

- 109** Rendimiento, eficiencia agronómica del nitrógeno y eficiencia en el uso del agua en amaranto en función del manejo del cultivo.
Yield, agronomic efficiency of nitrogen and water use in amaranth as affected by crop management.
Araceli C. Díaz-Ortega, J. Alberto Escalante-Estrada, Antonio Trinidad-Santos, Prometeo Sánchez-García, Cristina Mapes-Sánchez y David Martínez-Moreno

- 117** Agricultura *nhanñhu*-otomí del valle del Mezquital, Hidalgo.
Nhanñhu-otomi agriculture in the Mezquital valley, State of Hidalgo, Mexico.
Diódoro Granados-Sánchez, Georgina F. López-Ríos y Juan Hernández-Hernández

ENSAYO / Essay

- 127** Radiodifusión: Un medio para impulsar el desarrollo rural en México.
The Radio: A means to promote rural development in Mexico.
Guillermo Galindo-González
- 133** Reseña de libros.
- 134** Revisores y Editores Técnicos de este número.
Reviewers and Technical Editors of this number

SEDIMENTOS DEL EX LAGO DE TEXCOCO Y SU COMPORTAMIENTO CON LA APLICACIÓN DE MATERIALES CALCÁREOS Y COMPACTACIÓN

Sediments of the ex-Lake of Texcoco, and their Behavior with the Application of Calcareous Materials and Compaction

Guillermo López-Ávila¹, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena^{1,2}, Carlos A. Ortiz-Solorio¹, David Flores-Román² y Miguel A. Segura-Castruita¹

RESUMEN

Durante mucho tiempo, los especialistas en mecánica de suelos han realizado esfuerzos para disminuir el hundimiento de los edificios en la Ciudad de México, a través de la inyección de cemento y mortero al subsuelo; sin embargo, no han explicado cómo ocurre este proceso a escala microscópica. Los objetivos de la presente investigación fueron identificar los cambios morfológicos que se presentan en los sedimentos lacustres con la aplicación de materiales calcáreos, evaluar sus propiedades físicas y mecánicas y determinar el comportamiento de la fracción fina en el proceso de compactación. Se colectaron muestras de sedimento lacustre del ex lago de Texcoco, México, de 3.2 kg y se realizaron seis experimentos en los cuales se aplicaron $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 y CaO a diferentes contenidos de humedad (de campo, y una y dos semanas de secado al aire). Se realizaron análisis físicos y mecánicos (comprensibilidad) y los cambios morfológicos que se presentaron en los sedimentos lacustres se registraron en secciones delgadas. Los resultados mostraron que los materiales calcáreos no se mezclaron con los sedimentos lacustres amorfos debido al pH fuertemente alcalino (> 10), que provocó su precipitación como CaCO_3 y al contenido elevado de humedad (hasta 316%) que evitó que los materiales entraran a los microporos. La retención de humedad y la densidad aparente baja se relacionan con la presencia de la sílice amorfa, debido a que las partículas tienen un acomodamiento esponjoso (90% es agua y 10% es sólido), lo que, a su vez, explica

la alta compresibilidad del material, proceso relacionado con los hundimientos de las construcciones.

Palabras clave: Carbonato de calcio, sílice amorfa, estabilización.

SUMMARY

For a long time, specialists in soil mechanics have made great efforts to keep buildings in Mexico City from sinking, by injecting cement and mortar into the subsoil. However, it has not been explained how this process occurs at the microscopic scale. The objectives of this work were to identify the morphological changes in lacustrine sediments with application of several calcareous materials, to evaluate their physical, chemical, and mechanical properties and to determine the behavior of the fine fraction in the compaction process. Bulk samples of 3.2 kg were collected from the bed of the former Lake Texcoco, and six experiments were carried out in which $\text{Ca}(\text{OH})_2$, (CaCO_3) , and CaO were applied to sediments with different moisture contents (in the field, and one and two weeks of air drying). In addition, physical, chemical, and mechanical (compressibility) analyses were performed. The morphological changes during the stabilization process were registered in thin sections. The results showed that calcareous materials did not mix with amorphous lacustrine sediments due to the strongly alkaline pH (> 10), which causes their precipitation, and the high moisture contents that prevented these materials from penetrating into the micropores. High moisture retention and low bulk density were related to the presence of amorphous silica because the particles have a spongy arrangement (90% is water and 10% is solid). This is a possible explanation for the high compressibility of the material, process related to the sinking of constructions.

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

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

² Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Index words: Calcium carbonate, amorphous silica, stabilization.

INTRODUCCIÓN

Los hundimientos en la ciudad de México se relacionan con la alta compresibilidad del material del cual está constituido el subsuelo, por condiciones estratigráficas de éste y por la extracción del agua. Estos factores han provocado que la superficie del área metropolitana haya descendido entre 6 y 10 m, con respecto al nivel de referencia, lo que ha repercutido en un daño extensivo de los cimientos de los edificios, sistema de alcantarillados y carreteras (Marsal y Mazari, 1969; Jaime, 1987, 1990; Mazari y Alberro, 1990; Ramírez, 1990; Mazari, 1996; Lesser y Cortés, 1998).

La ciudad está cimentada sobre estratos constituidos por arcillas blandas saturadas, frágiles a la tensión, con un límite líquido promedio de 236% y límite plástico promedio de 76% (Marsal y Mazari, 1969) y que retiene hasta 500% de humedad másica campo (Ramírez, 1985). Según la carga estructural y la profundidad de dichos materiales, pueden presentarse asentamientos por consolidación (Braja, 2001) o agrietamientos diferenciales por la extracción del agua (Mazari y Alberro, 1990), requiriéndose así procedimientos especiales de mejoramiento del suelo para minimizar dicho fenómeno.

Los aditivos más comunes utilizados para estabilizar suelos son: cal, cemento y ceniza volátil con cal (Braja, 2001), donde se genera una plancha sobre la cual se distribuye uniformemente la presión, pero no se logra abatir el problema del hundimiento; en tanto que Santoyo (1997) mencionó que la inyección al subsuelo con cemento o mortero es una de las técnicas que han dado mejor resultado para enfrentar el problema de los hundimientos en las construcciones (edificios, carreteras).

La cal es un aditivo poco activo que se integra a los sólidos finos de la tierra, aumenta su volumen y cambia sus propiedades físicas; también produce una cierta cohesión entre las partículas debido a una reacción físico-química; además, facilita el secado del suelo en áreas pantanosas (Madinaveitia y Mendoza, 1990); sin embargo, estos autores no dan evidencias de cómo ocurren esos procesos, por lo que Santoyo (1997) reconoció que debe hacerse investigación encaminada a predecir el comportamiento de la masa arcillosa, sin decir a qué grado.

Muciño (1997) y Santoyo (1997) reportaron que el subsuelo de la ciudad o del ex lago de Texcoco, está

compuesto por arcillas del Tipo 2:1 (esmeclitas), que se caracterizan por ser expansivas, es decir, aumentan o disminuyen en volumen conforme a su contenido de agua (Porta *et al.*, 1999); mientras que Gutiérrez (1997) señaló la presencia dominante de sílice amorfa en forma de gel y como esferas opalinas en la fracción arcillosa, la cual tiene una alta capacidad de intercambio catiónico; además, el pH fuertemente alcalino del medio, hace que esté en estado soluble.

Por otra parte, Gutiérrez *et al.* (2000) reportaron la presencia de estratos endurecidos cementados naturalmente por carbonato de calcio y sílice amorfa en la ribera del ex lago de Texcoco, formándose cristales de silicato de sodio. El silicato de calcio es la composición química más importante del cemento Pórtland (usado en el proceso de estabilización) y cuando se comparó con la composición química del jaboncillo (Gutiérrez, 1997) se encontró que son similares en óxidos (Si, Al, Fe, Mg, K y Na) y difieren en el contenido de óxido de calcio (CaO) (concentración baja) y óxido de silicio SiO₂ (concentración alta) (62.5% y 22.5% en el cemento y 4.68% y 59.43% en el sedimento, respectivamente). Se planteó la hipótesis de que la combinación de óxidos de calcio con materiales amorfos silíceos solubles forman silicato de calcio el cual actúa como estabilizante o cementante de los sedimentos lacustres, debido al intercrecimiento de cristales entre las partículas del suelo.

Los objetivos de este trabajo fueron: (1) identificar los cambios morfológicos y la formación de cristales que se presentan en los sedimentos lacustres amorfos al aplicar materiales calcáreos, (2) evaluar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas para entender el proceso de estabilización, y (3) determinar los cambios que sufre (arreglo y porosidad) la fracción fina durante la compactación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del Área de Estudio

La presente investigación se desarrolló en el municipio de Texcoco, dentro del Campo Experimental del Colegio de Postgraduados, situado entre las coordenadas 19° 24' y 19° 35' N y 98° 41' y 94° 03' O, y que corresponde a la parte central del ex lago de Texcoco, a una altitud de 2215 m. En este

sitio, se localizan los sedimentos lacustres después de 84 cm de profundidad.

Las formaciones que limitan a la cuenca de México están constituidas por rocas ígneas extrusivas compuestas por tobas, brechas, andesitas, basaltos y riolitas, correspondientes a depósitos del Cuaternario (Mooser, 1961). La región se considera como una planicie aluvial-lacustre, que se formó por sedimentos, producto de la alteración de las rocas ígneas presentes en la zona circundante al Valle de México (Del Valle, 1983).

Gutiérrez (1997) reportó que el suelo dominante en esta área es un Fluvaquentic Endoaquolls (Soil Survey Staff, 1994), que significa que es un mollisol, debido a la acumulación de materia orgánica promovida por el pasto salado (*Distichlis spicata*); con un régimen de humedad áquico (influencia del manto freático) y con propiedades flúvicas. Debajo de la capa de suelo se encuentra una capa de ceniza volcánica, seguido del sedimento lacustre o "jaboncillo", denominado así localmente por su sensación jabonosa.

En el ex lago pueden distinguirse varias comunidades vegetales: pirul (*Schinus molle*), lentejilla (*Lemna gibba*), pasto salado (*Distichlis spicata*), romerito (*Suaeda nigra*) y eucalipto (*Eucalyptus* spp.) (Rzedowski y Huerta, 1985).

Etapa de Experimentación

Se excavó un pozo pedológico, se removieron el suelo y la capa de ceniza volcánica y a partir de 84 cm de profundidad se localizó el sedimento lacustre o jaboncillo. Se recolectaron muestras inalteradas en el material lacustre (de 84 a 100 cm de profundidad), en recipientes cilíndricos con una capacidad de 3.2 dm³. Estas muestras se utilizaron posteriormente como unidades experimentales.

Se utilizaron tres fuentes comerciales de calcio: hidróxido de calcio [Ca(OH)₂], carbonato de calcio (CaCO₃), y óxido de calcio (CaO), aplicando cada uno en tres dosis de acuerdo con la cantidad de CaO reportada para el cemento Pórtland: alto (125%), medio (62.5%) y bajo (31.25%). (Cuadro 1). Estos experimentos se llevaron en forma consecutiva, pues se desconocía el comportamiento del material lacustre a los agentes estabilizantes (Cuadro 2). Para registrar los cambios morfológicos, se recolectaron dos muestras inalteradas en cilindros de 32 cm³ por tratamiento para su posterior impregnación con resina poliéster.

Etapa de Caracterización

Para la fase de caracterización del sedimento lacustre, se recolectaron muestras de diferentes tamaños, alteradas e inalteradas, dependiendo del tipo de análisis a realizar. Se tomaron muestras cada 10 cm después de 84 cm y hasta 1.80 cm de profundidad.

Análisis físico. Se determinó, en muestras alteradas, el porcentaje de humedad gravimétrica (% H) en condiciones de campo (HC), a capacidad de campo (CC) (33 kPa) y a punto de marchitez permanente (PMP) (1500 kPa). Además, se determinó la capacidad máxima de saturación (Rijtema, 1969) y el color (tabla de colores Munsell) en muestras con humedad de campo y secadas a temperatura ambiente.

Cuadro 1. Cantidades aplicadas de materiales calcáreos y por dosis durante el desarrollo de los experimentos.

Dosis	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	CaO	Dilución
	----- g -----			L
Bajo	43.91	47.89	57.82	0.3
Medio	95.57	104.23	26.57	0.3
Alto	198.87	216.91	120.32	0.3

Cuadro 2. Factores estudiados con tres repeticiones durante los seis experimentos realizados.

Experimento	Materiales calcáreos	Nivel	Tiempo de secado	Distancia de varillas	Diámetro de varillas	Total de unidades
			días	----- cm -----		
1	Ca(OH) ₂	Medio, Bajo, Alto	1	2 y 4	2	36
2	Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ , CaO	Medio, Bajo, Alto	8	2	5	54
3	Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ , CaO	Medio, Bajo, Alto	15	2	5	54
4	Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ , CaO	Medio, Bajo, Alto	8	2	5	54
5	Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ , CaO	Medio, Bajo, Alto	15	2	5	54
6	Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ , CaO	Medio	1	Mezclado [†]		9

[†] el jaboncillo se mezcló con los materiales calcáreos.

Por otra parte, se recolectaron muestras inalteradas en tubos de PVC con una capacidad de 32 cm³, con la finalidad de realizar las siguientes determinaciones: densidad aparente (Dap) con el método del cilindro con los tres contenidos de humedad (HC, CC y PMP), volumen de sólidos (Vs), volumen ocupado por agua (Va), volumen total (Vt) y coeficiente de extensibilidad lineal (Soil Survey Staff, 1999).

Análisis mecánico. Para registrar los cambios micromorfológicos de los sedimentos lacustres (jaboncillo) cuando se someten a presión, se recolectaron muestras inalteradas en tubos de PVC con una capacidad de 203 cm³, con dos repeticiones por capa. Para aplicar la presión, se utilizó una prensa hidráulica marca "ERKO" modelo PHE-20; la presión aplicada a cada muestra fue de 56.24 kg cm⁻², durante 2 h en intervalos de 15 min. Se tomó como parámetro para finalizar dicha prueba cuando al aplicar la presión ya no era visible la pérdida de agua. Las muestras comprimidas de jaboncillo se metieron a la estufa a 105 °C hasta peso constante y, posteriormente, se impregnaron con resina poliéster.

Análisis micromorfológico. Se recolectaron muestras de jaboncillo en estado natural con recipientes de 4 x 4 x 10 cm con tres repeticiones. Como los sedimentos lacustres retienen una gran cantidad de agua, se les eliminó, intercambiándola con acetona a través de inmersión en una fase líquida, utilizando las siguientes relaciones de agua-acetona: 50:50, durante dos semanas; 30:70, durante dos semanas; y 0:100 durante 12 semanas.

Para la etapa de impregnación con resina, se tomaron cinco muestras de jaboncillo comprimido, 12 muestras de los tratamientos con las diferentes aplicaciones de materiales calcáreos y 30 muestras del jaboncillo en estado natural y se impregnaron con resina poliéster insaturada diluida con monómero, en una relación 7:3; después, se sometieron a vacío durante 8 h y a un proceso de gelación de cuatro semanas para garantizar así la completa impregnación. Una vez endurecidas

las muestras, se cortaron con un disco de punta de diamante, en forma horizontal y vertical, y se pulieron con diferentes abrasivos hasta obtener una sección delgada de 30 µm de espesor. La descripción micromorfológica se realizó con base en el manual de Bullock *et al.* (1985).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fase de Experimentación

En el primer experimento que se realizó, en el cual sólo se aplicó Ca(OH)₂ a diferentes concentraciones, en muestras de sedimento recién sacado del perfil y con perforaciones de varilla con un diámetro de 2 a 4 cm, el hidróxido se precipitó como CaCO₃ y se pensó que el problema era la fuente de calcio, el alto contenido de humedad del material (Cuadro 3) y el espacio poroso reducido. Con el segundo y el tercer experimento se corrigieron esos errores, se utilizaron tres fuentes de materiales calcáreos [Ca(OH)₂, CaCO₃ y CaO], se secó el material (hasta 15 días de exposición al ambiente) y se creó un espacio poroso de 5 mm, para facilitar el intercambio, pero el material se precipitó de nuevo. Después de analizar las características micromorfológicas del jaboncillo en las diferentes profundidades, se observó que el material que se utilizó como unidades experimentales (de 84 a 100 cm de profundidad) contenía un alto porcentaje de microorganismos (ostrácodos) y pocos amorfos, por lo que se decidió utilizar jaboncillo sólo de un estrato compuesto de este último material (120 cm de profundidad), el cual se reconoce micromorfológicamente por su fábrica-b indiferenciada. En todos los experimentos, las fuentes de calcio se precipitaron en las perforaciones hechas con las varillas, o bien, se precipitaron en las grietas que se generaron en los sedimentos lacustres una vez que éstos perdieron humedad, pero no en los microporos.

Cuadro 3. Contenido de humedad en el jaboncillo.

Profundidad cm	Campo	CC [†]	PMP [†]	SMo [†]	CC [‡]	PMP [‡]	SMo [‡]
----- % -----							
84-104	328.56	303.65	191.37	347.55	88.43	69.33	94.95
104-124	384.71	274.27	207.23	297.70	80.97	44.65	96.37
124-144	530.80	453.37	332.41	496.45	83.92	52.90	96.05
144-164	446.90	386.99	259.74	434.87	77.62	46.10	94.29
164-184	504.50	392.76	233.12	457.50	83.84	50.43	97.28

CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; SMo = capacidad máxima de saturación; [†] = muestras con humedad de campo; [‡] = muestra seca a temperatura ambiente.

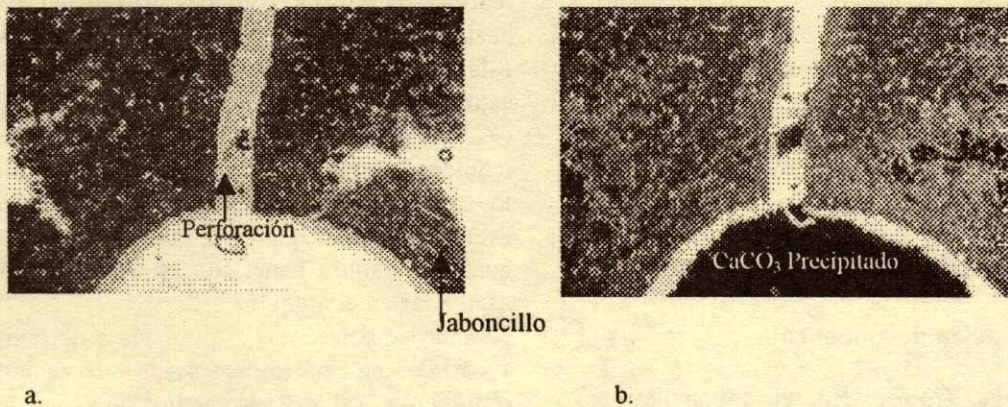


Figura 1. Efecto del carbonato de calcio a nivel microscópico en el jaboncillo. En LPP y LPC. Longitud del marco 2.7 mm.

El contacto entre los materiales siempre fue abrupto (Figuras 2a y b), lo que significa que no hubo mezcla de materiales y, por lo tanto, de intercrecimiento de cristales de silicato de calcio, como lo reporta Gutiérrez *et al.* (2000), a pesar de que la sílice estaba en estado soluble. El material no se estabilizó y quedó con una consistencia frágil y quebradiza y perdió humedad pero no lo suficiente como para secarlo y no se incrementó el volumen del suelo, como lo reportan Madinaveitia y Mendoza (1990).

En ingeniería de cimentaciones, se menciona que cuando se adiciona cal hidratada a suelos arcillosos blandos con menos de 60% de humedad, ocurren reacciones químicas sobre todo de intercambio catiónico, floculación-aglomeración y puzolánicas que provocan que se incremente el límite plástico, que el suelo cambie de plástico a sólido y tome una apariencia reseca (Braja, 2001).

La precipitación de las fuentes de calcio en los macroporos creados artificialmente se debió a que están en forma no reactiva, por lo tanto no soluble; además, la alta capacidad de retención de humedad del material (Cuadro 3) impidió el movimiento de los materiales entre los microporos por el estado saturado del jaboncillo.

Para que se dé la formación del bicarbonato de calcio (la forma soluble) con cualquiera de las tres fuentes de calcio utilizadas, es necesaria la presencia de bióxido de carbono (CO_2), la cual puede ser mediante la actividad biológica (respiración radical o descomposición de materia orgánica), o bien, aplicándolo. Braja (2001) mencionó inyecciones de CO_2 para estabilizar suelos tipo loess y colapsables secos y húmedos. El bicarbonato soluble puede

moverse en los poros, no obstante, si el suelo está saturado como en el jaboncillo (Cuadro 3), la velocidad gaseosa es prácticamente nula y, por lo tanto, no existe movimiento.

Otro problema que se presentó fue el pH fuertemente alcalino del sedimento (mayor que 10); Ortega (1983) señaló que la solubilidad del carbonato de calcio disminuye drásticamente a pH mayores que 8, condiciones que favorecieron la precipitación rápida del carbonato de calcio en la superficie del jaboncillo o en los canales creados.

Sí se presentaron reacciones químicas en la superficie de los poros creados, pero no a nivel de partícula, sobre todo en los sitios de intercambio donde domina el Na^{2+} . Teóricamente con la aplicación de materiales calcáreos, el Ca^{2+} desplazaría al Na^+ (Cajuste, 1977; Ortega, 1983); sin embargo, este proceso no se dio de manera significativa, por las altas concentraciones del Na, la fuerte retención de humedad del material y el deficiente drenaje. Por lo tanto, la incorporación de materiales calcáreos al jaboncillo no modificó su volumen, no hay reacciones del intercambio catiónico ni cohesión entre partículas.

Por otra parte, si se aplica CO_2 , como lo señala Braja (2001), en condiciones fuertemente alcalinas, éste tiende a formar bicarbonatos que reaccionan más con el Na que con el Ca (Brady y Weil, 1999) y que, a su vez, incrementan aun más la alcalinidad y, por lo tanto, cualquier aditivo aplicado en estas condiciones se precipita.

Al revisar las condiciones en las cuales Gutiérrez *et al.* (2000) encontraron los estratos cementados con carbonato de calcio y sílice amorfa, se apreció que éstos presentan un pH neutro a ligeramente alcalino,

donde domina el Ca^{2+} en los sitios de intercambio; además, se presentan periodos secos y húmedos estacionales que permitieron la mezcla de ambos materiales.

Finalmente, se rechaza la hipótesis de la formación de cristales de silicato de calcio en el jaboncillo a través de la mezcla de materiales calcáreos con materiales amorfos, por el ambiente fuertemente alcalino y alta retención de humedad.

Fase de Caracterización del Jaboncillo

Propiedades físicas. Color. En el jaboncillo se presentan tres tipos de colores en húmedo: gris pardo claro (10 YR 6/2), pardo oscuro (10 YR 3/3) y rojo oscuro (10 R 3/2), mientras que en seco cambian a gris claro (10 YR 7/1).

Capacidad de retención de humedad. El porcentaje de humedad en condiciones de campo varía con la profundidad, teniendo un promedio de 439% (Cuadro 4), mientras que a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) en muestras con humedad de campo es menor (362 y 244%, respectivamente); esta disminución entre CC y PMP se debe al incremento en la tensión de humedad. Este elevado contenido de humedad indica que la mayor parte del material está compuesto por agua, datos que concuerdan con los reportados por Del Valle (1983), Gutiérrez (1997) y Ramírez (2000). Sin embargo, la retención fuerte del agua (a 1500 kPa tiene 244%) impide que ésta se pierda fácilmente, de ahí que después de dos semanas de exposición al ambiente no se crea el espacio microporoso para el intercambio de materiales en los experimentos realizados.

Gutiérrez (1997) encontró que el jaboncillo es un material formado por amorfos silíceos en forma de esferas opalinas que, al depositarse, se arreglaron con un empaquetamiento suelto; Iler (1955) por su parte

reportó que estos compuestos pueden retener agua hasta 100 veces su peso, lo que significa que cada esfera está rodeada por una capa gruesa de agua; si a esto, además, se le añade su alta superficie específica ($475 \text{ m}^2 \text{ cm}^{-1}$; Del Valle, 1983), entonces se puede explicar la alta capacidad de retención de humedad de los sedimentos lacustres y lo fuertemente retenida que está a 1500 kPa, que evita que se pierda fácilmente, lo cual es algo benéfico para las construcciones asentadas en el área.

Cuando se determinó el porcentaje de humedad a CC y PMP en muestras secas y rehidratadas, se obtuvieron valores promedio muy inferiores a las determinaciones en muestras con humedad de campo (83 y 53%, respectivamente); esto se debe a que la superficie específica disminuyó por colapsamiento de partículas (Gutiérrez, 1997) y, por lo tanto, la capacidad para adsorber humedad una vez que se rehidrataron, de ahí que la pérdida de humedad sea irreversible. Este comportamiento no lo tienen las arcillas expansivas (esmeclitas).

En lo que respecta a la capacidad máxima de saturación (SMo), tanto en muestras con humedad de campo, como en muestras secas, se obtuvieron valores promedio inferiores (407 y 97%) (Figuras 2a y b) en comparación con la humedad de campo (439%), quedando de manifiesto la pérdida irreversible de la humedad una vez que se expone a la intemperie.

Densidad aparente. La densidad aparente con humedad de campo, CC y a PMP, presentó valores promedio muy bajos, varían de 0.24, 0.26 y 0.28 Mg m^{-3} , respectivamente (Cuadro 4).

La baja densidad aparente se debe a la pérdida de humedad una vez que el material se seca; sin embargo, a CC y PMP se obtienen valores promedio superiores con respecto a la humedad de campo, lo cual se debe a la reducción del volumen con el incremento de la presión (33 y 1500 kPa). Ramírez

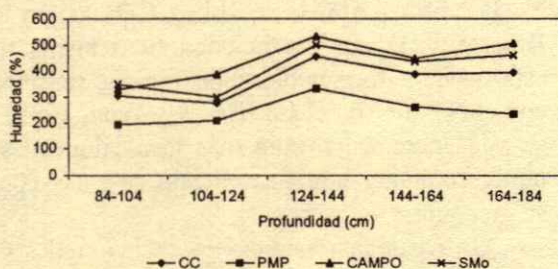


Figura 2a. Muestras con humedad de campo.

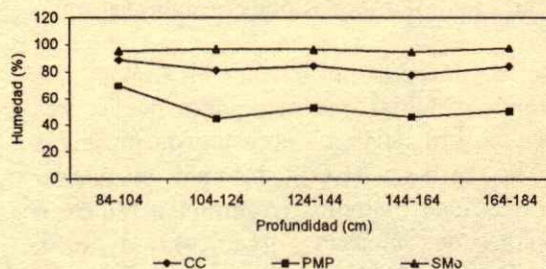


Figura 2b. Contenido de humedad en muestra seca.

Cuadro 4. Resultados de densidad aparente y volumen en muestras de jaboncillo.

Profundidad cm	Dap [†]	Dap [‡]	Dap [§]	Vs	Va	Vt	COEL1	COEL2
	Mg m ⁻³			cm ³				
84-94	0.31	0.33	0.34	4.28	28.16	32.44	0.50	0.49
94-104	0.26	0.28	0.30	4.17	28.44	32.61	0.60	0.52
104-114	0.26	0.27	0.29	3.56	29.31	32.87	0.60	0.57
114-124	0.27	0.29	0.31	3.65	29.31	32.96	0.58	0.61
124-134	0.18	0.20	0.20	2.99	29.69	32.68	0.71	0.74
134-144	0.17	0.19	0.22	2.30	30.46	32.76	0.88	0.80
144-154	0.19	0.20	0.23	1.90	30.95	32.85	0.42	0.49
154-164	0.20	0.21	0.22	0.81	31.56	32.37	0.88	0.84
164-174	0.20	0.21	0.23	2.20	30.57	32.77	0.92	0.78
174-184	0.36	0.39	0.44	4.17	28.71	32.88	0.37	0.45

Dap = densidad aparente; [†] = humedad de campo; [‡] = capacidad de campo; [§] = punto de marchitez permanente; Vs = volumen de sólidos; Va = volumen ocupado por agua; Vt = volumen total; COEL1 = coeficiente de extensibilidad lineal en longitud; COEL2 = coeficiente de extensibilidad lineal en diámetro.

(2000) reportó valores de densidad aparente de 0.20 g m⁻³ y explicó que es debido a la composición de los sedimentos lacustres; mientras que Gutiérrez *et al.* (2000) señalaron que son los materiales amorfos silíceos los responsables de esta baja densidad aparente.

El volumen total de las muestras en condiciones de campo disminuyó considerablemente, ya que inicialmente se partió de un valor total promedio de 32.72 cm³ y terminó en un volumen promedio de sólidos de 3.00 cm³, por lo que el volumen promedio ocupado por agua es de 29.72 cm³. Estos resultados indican que de 100% de la muestra, 90.8% es agua y 9.2% es sólido. Si todo es agua, ¿porque no se hundan más rápidamente las construcciones? Una respuesta sería otra vez la fuerte retención de humedad, hasta 332.41% a 1500 pKa de 530.80% de humedad de campo (Capa 124-144, Cuadro 3).

Coficiente de Extensibilidad Lineal (COEL). Según Franzmeier y Ross (1968), los suelos en que predominan las kaolinitas o las micas tienen valores de COEL menores que 0.03, mientras que si predomina la montmorillonita los valores son mayores que 0.03. Los valores promedio que se obtuvieron en cuanto a este parámetro en el jaboncillo varían de 0.65 para el caso de la reducción en longitud, mientras que para la reducción en diámetro se tiene un valor de 0.63, lo cual, de acuerdo con estos autores, son valores muy críticos para cualquier construcción. Esta contracción se puede explicar por la composición química del jaboncillo donde dominan los amorfos silíceos (Gutiérrez *et al.*, 2000), que son capaces de retener altos contenidos de agua, pero que la pierden irreversiblemente y por el bajo contenido de sólidos.

Propiedades Mecánicas

Compresibilidad. La compresibilidad del suelo es una disminución del volumen cuando está sujeto a una presión mecánica (Hillel, 1982; Narro, 1994). La compresión se debe a la exclusión del aire o agua de los espacios porosos, reacomodo de las partículas del suelo, compresión y deformación de partículas sólidas y compresión del líquido dentro de los poros (Bradford y Gupta, 1986). En el Cuadro 5, se presenta una comparación entre el volumen inicial y el final de las muestras después de la compresión (58.43 kg cm⁻²) y el secado (105 °C).

El volumen después de la compresión en húmedo (58.43 kg cm⁻²) se redujo en 75.12% en promedio y, en seco, en 85.62% en todo el perfil. Mazari y Alberro (1990) señalaron que ante una sobrecarga local (construcciones), el material arcilloso expulsa lentamente el agua menos estructurada, la cual se pierde lateralmente por los estratos más permeables y se consolida. Los resultados obtenidos muestran una disminución de hasta 75% del volumen total, cuando se aplica una presión a los sedimentos lacustres y cuando se extrae completamente el agua, lo cual implica un riesgo serio si se planean construcciones en esa área. Marsal y Mazari (1969) mencionaron que el espesor de la formación arcillosa varía de 15 a 40 m de profundidad en la zona más densamente poblada de la Ciudad de México, por lo tanto, no es sorprendente que cargas relativamente moderadas causen asentamientos totales que, en algunos casos, superan un metro.

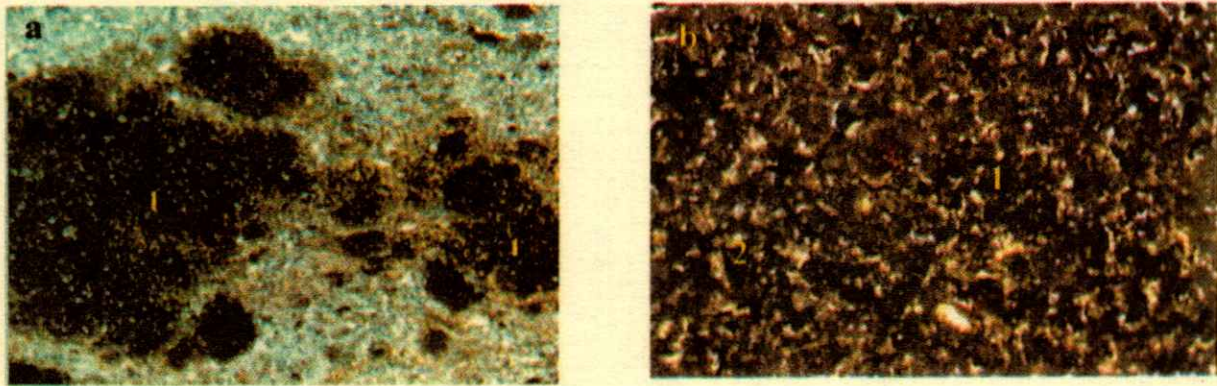


Figura 3. a) Nódulos isotrópicos amorfos silicios (1). b) fábrica-b indiferenciada (amorfos) (1), con cristales en la superficie de los agregados (2); LPC; longitud del marco 2.9 mm.

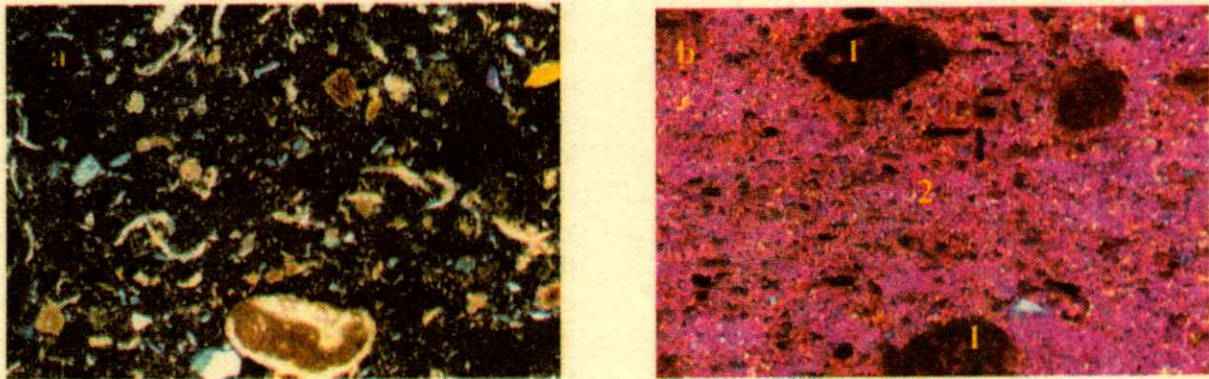


Figura 4. Partículas con un acomodamiento suelto: a) ostrácodos, cristales y amorfos, en LPC, longitud del marco 2.9 mm. b) nódulos silicios (1) y cristales aislados; el espacio poroso es de color rosa y las partículas son de color amarillo pálido (2); LPC con compensador; longitud del marco 1 mm.

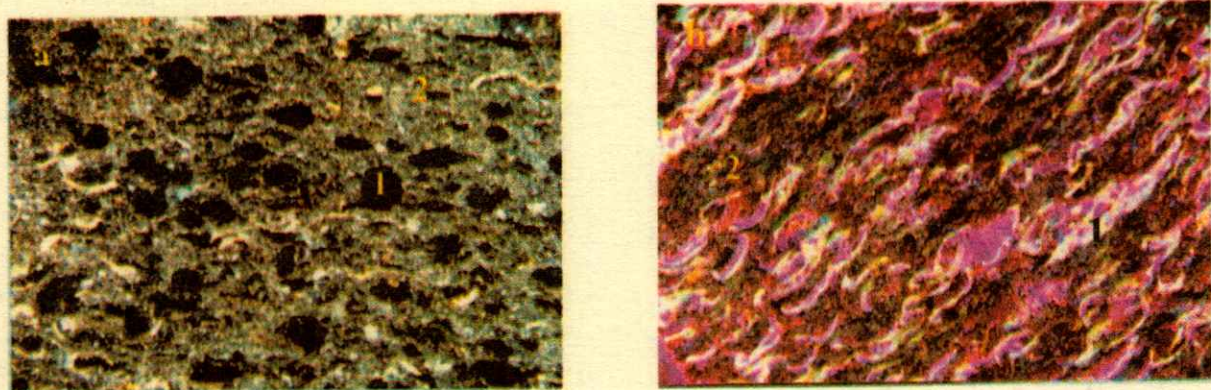


Figura 5. Jaboncillo. a) sin comprimir, con nódulos isotrópicos (1) y cristales (2) con una distribución aleatoria; fábrica-b moteada; LPC. b) comprimido, se aprecian los restos de ostrácodos (1) y arcilla orientada (2) paralelamente al compensador. Ambas con una longitud del marco 2.9 mm.

Cuadro 5. Variación del volumen en muestras de jaboncillo cuando se someten a compresión y secado.

Prof.undidad cm	Campo	Compresión cm ³	Secado
84-94	203.57	63.51	39.03
94-104	203.57	53.74	29.58
104-114	203.57	49.26	30.52
114-124	203.57	55.37	40.37
124-134	203.57	48.45	26.72
134-144	203.57	52.52	30.33
144-154	203.57	54.96	36.38
154-164	203.57	35.42	17.94
164-174	203.57	48.45	21.67
174-184	203.57	44.78	20.33

Micromorfología

El jaboncillo es un material formado por amorfos silíceos en forma de nódulos isotrópicos y como constituyente de la masa basal (Figuras 3a y b); además, se presentan residuos de microorganismos, principalmente ostrácodos y diatomeas, que se distribuyen aleatoriamente en la masa basal y cristales de alta birrefringencia y corresponden a dolomita (Gutiérrez *et al.*, 2002) por lo que pueden presentarse fábricas-moteada cristalítica o bien indiferenciada. Todas las partículas tienen un empaquetamiento suelto, sobre todo los materiales amorfos (Figuras 4a y b).

Es importante recordar que para extraer el agua al jaboncillo se sometió a un intercambio con acetona para mantener su estructura intacta. De esta forma, los nódulos de sílice amorfa conservaron su distribución espacial y el espacio poroso se rellenó después con resina. Este espacio poroso se aprecia muy bien cuando se utilizó el compensador (color rosa) (Figura 4b).

Cuando el jaboncillo se comprimió, el agua se eliminó y se quedó sólo la parte sólida, redujeron considerablemente los nódulos (1 cm a 150 μ m) y apareció una fábrica-b estriada paralela total uniestructural, con colores de interferencia de amarillo o azul de acuerdo con su orientación al compensador (Figura 5b). Estas propiedades ópticas son características de las arcillas silicatadas. Gutiérrez (1997) reportó que las arcillas silicatadas están pobremente cristalizadas, de ahí que se expresen en débiles reflexiones en rayos X aún después de 10 lavados para eliminar los amorfos silíceos que las enmascaran. Cuando el material se comprime, las arcillas se concentran en bandas de hasta 100 μ m y

son excluyentes de los amorfos de ahí que presenten birrefringencia. Las preguntas que surgen son, ¿las arcillas silicatadas se cristalizaron bajo presión a partir de materiales amorfos silíceos? o ¿ya estaban formadas y la presión separó a los diferentes materiales?

Finalmente, si se relacionan las diferentes propiedades físicas y mecánicas con los resultados obtenidos con micromorfología, se concluye que el hecho de que el jaboncillo tenga un acomodamiento suelto de sus partículas explica su baja densidad aparente en seco (0.2 g cm⁻¹) y su alta comprensibilidad por su alto contenido de agua y bajo porcentaje de sólidos.

CONCLUSIONES

- Los sedimentos lacustres (jaboncillo) no se mezclan con óxido de calcio (CaO), carbonato de calcio CaCO₃ e hidróxido de calcio [Ca(OH)₂] por las condiciones de fuerte alcalinidad y condiciones de saturación permanente, lo cual propicia su precipitación y, por lo tanto, no se lleva a cabo ninguna reacción química (intercambio catiónico) entre estos materiales, ni formación de cristales de silicato de calcio de intercrecimiento en la masa basal del sedimento.

- La comprensibilidad alta y muy baja densidad aparente del jaboncillo se deben al acomodamiento esponjoso de las partículas; este acomodamiento y la presencia de sílice amorfa son los responsables de la retención alta de humedad, inclusive hasta 1500 kPa.

- La fracción fina de los sedimentos (arcillas) sufre un proceso de reacomodo después de la compresión; los materiales amorfos silíceos pierden su acomodo esponjoso y reducen su tamaño y las arcillas silicatadas (neoformadas o depositadas *in situ*) opacas en condiciones normales (enmascaramiento), se separan de los amorfos y forman una fábrica-b birrefringente paralela total.

LITERATURA CITADA

- Bradford, J.M. y S.C. Gupta. 1986. Compressibility. pp. 479-491. In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Brady, N.C. y R.R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. Tenth edition. MacMillan. New York.
- Braja, M.D. 2001. Principios de ingeniería de cimentaciones. Trad. al español por J. de la Cera A. Cuarta edición. International Thompson. México, D.F.

- Bullock, P., N. Federoff, A. Jongerius, G. Stoops y T. Tursina. 1985. Handbook for soil section description. Waine Research Publications. Wolverhampton, England.
- Cajuste L., J. 1977. Química de suelos con un enfoque agrícola. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Del Valle C., H. 1983. Los procesos de acumulación de sales e intemperismo en cubetas lacustres, en la zona de transición del ex lago de Texcoco. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Franzmeier, D.P. y S.J. Ross. 1968. Soil swelling: Laboratory measurement and relation to other soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 573-577.
- Gutiérrez C., Ma. del C. 1997. Los suelos de la ribera oriente del ex lago de Texcoco (Macro y micromorfología). Tesis de Doctorado. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Gutiérrez C., Ma. del C., C.A. Ortiz S. y G. López A. 2000. Caracterización de los estratos lacustres cementados en el ex lago de Texcoco. pp. 108-125. *In: La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo I. R. Quintero L., T. Reyna T., L. Corlay Ch., A. Ibáñez H. y N. García E. (eds.)*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Hillel, D. 1982. Fundamentals of soils physics. Academic Press. New York.
- Iler, R.K. 1955. Colloid chemistry of silica and silicates. Cornell University Press. Ithaca, NY.
- Jaime P., A. 1987. Características dinámicas de la arcilla del Valle de México. Tesis de Doctorado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Jaime P., A. 1990. Problemática de la ingeniería de cimentaciones en el Valle de México. I. Aspectos generales y condiciones del suelo. pp. 115-145. *In: Kumate, J. y M. Mazari (coord.)*. Problemas de la cuenca de México. El Colegio Nacional. México, D.F.
- Lesser I., J.M. y M.A Cortés P. 1998. El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje. *Ingeniería Hidráulica en México XIII-3*: 13-18.
- Madinaveitia J., M. y C.J. Mendoza E. 1990. Estabilización de tierras para construcción de viviendas. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Marsal, R.J. y M. Mazari. 1969. El subsuelo de la ciudad de México. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Mazari M., M. 1996. La isla de los perros. El Colegio Nacional. México, D.F.
- Mazari, M. y J. Alberro. 1990. Hundimiento de la ciudad de México. pp. 83-114. *In: Kumate, J. y M. Mazari (coord.)*. Problemas de la cuenca de México. El Colegio Nacional. México, D.F.
- Mooser, F. 1961. Informe sobre la geología de la Cuenca del Valle de México. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Comisión Hidrológica de la cuenca del Valle de México. México D.F.
- Muciño C., R. 1997. Cimentaciones superficiales sobre suelos expansivos. Vector de Ingeniería Civil 5. Federación del Colegio de Ingenieros Civiles de la República Mexicana. México D.F.
- Narro E., F. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Trillas. México, D.F.
- Ortega T., E. 1983. Química de suelos. Departamento de Suelos, Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.
- Pape, Th. y D. Legger. 1995. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science and Geology. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 1999. Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente. 2a edición revisada y ampliada. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Ramírez A., C. 1985. Comportamiento de la conductividad eléctrica y parámetros físicos y químicos en el "jaboncillo" de Montecillo. Reporte técnico 1. Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Ramírez A., C. 2000. Importancia del proceso de secado en suelos de Montecillos, Estado de México. pp. 191-198. *In: La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo I. R. Quintero L., T. Reyna T., L. Corlay Ch., A. Ibáñez H. y N. García E. (eds.)*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Ramírez S., C. 1990. El agua en la cuenca de México. pp. 61-82. *In: Kumate, J. y M. Mazari (coord.)*. Problemas de la cuenca de México. El Colegio Nacional. México, D.F.
- Rijtema, P.E. 1969. Soil moisture forecasting. Nota 513. I.C.W. Wageningen, The Netherlands.
- Rzedowski, J. y L. Huerta. 1985. La vegetación de México. Limusa. México, D.F.
- Santoyo V., E. 1997. Inyección del subsuelo del Palacio de Bellas Artes. Un caso injustamente desvirtuado. Vector de Ingeniería Civil 4: 18-30. México, D.F.
- Soil Survey Staff. 1994. Claves para la Taxonomía de Suelos. Trad. al español por C.A. Ortiz S. y Ma. del C. Gutiérrez C. Publicación Especial 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture. Madison, WI.

LOS TEPETATES DE LA LADERA OESTE DEL CERRO TLÁLOC: SAPROLITA, SIN ENDURECIMIENTO PEDOLÓGICO

Tepetates of the Western Hillside of Cerro Tláloc: Saprolite, Without Pedologic Induration

Silvia Rodríguez-Tapia^{1‡}, Carlos A. Ortiz-Solorio¹, Claudia Hidalgo-Moreno¹ y
Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena¹

RESUMEN

En México, se le llama tepetate a una variedad de materiales de dureza intermedia, entre suelo y roca, sin aptitud para la agricultura. Desde tiempos prehispánicos, se ha tratado de incorporarlos a la agricultura, fragmentándolos y abonándolos. Genéricamente, algunas rocas piroclásticas se señalan como tepetates. En Edafología, algunos autores las denominan como suelos volcánicos endurecidos y atribuyen su consolidación a los productos de alteración y a los revestimientos arcillosos. Sin embargo, los análisis macro y micromorfológicos, mineralógicos, físicos y químicos, realizados en este trabajo, revelan que las tobas se están transformando a arcillas, por procesos de intemperismo, no endureciéndose. La red de fracturas y la microporosidad intrínseca de la roca facilitan la penetración del agua; ésta promueve el intemperismo químico que forma arcillas y óxidos de Fe y Mn. El Fe y Mn migran hacia las capas más profundas y las arcillas se reorganizan en la matriz o se transportan con el agua percolada, para depositarse en las fracturas. Las arcillas de la matriz, por procesos de expansión y contracción, reducen la consolidación efectiva de la toba e inhiben la formación de un agente cementante; las arcillas de los revestimientos, ubicadas en las fracturas (zonas inestables de la roca), quedan expuestas al arrastre por nuevos flujos de agua y no actúan como aglutinantes. El intemperismo (minerales alterados y halos de alteración) y la pedogénesis (revestimientos arcillosos y dominios de arcilla en la matriz) han disminuido la importancia de los rasgos litológicos, a un grado tal, que aún retienen su estructura. Estas características son las de una toba intemperizada. La geología y la edafología la denominan como saprolita (de *sapros*, podrido y *litos*,

roca), término que refleja mejor a una roca ígnea intemperizada *in situ*.

Palabras clave: *Intemperismo, roca piroclástica, toba, micromorfología.*

SUMMARY

In Mexico, "tepetate" is the name used for a variety of materials of intermediate hardness, between soil and rock, without aptitude for agriculture. Since prehispanic times, farmers have attempted to incorporate it into agriculture, breaking them into fragments and fertilizing them with manure. Generically, some pyroclastic rocks have been denominated "tepetates". In Edaphology, some authors have called them indurated volcanic soils and attributed hardening to products of alteration and to clay coatings. However, the macro- and micro-morphological, mineralogical, physical, and chemical analyses carried out in this work, reveal that tuffs are being transformed into clays through weathering processes, and are not hardening. The network of fractures and the intrinsic micro-porosity of the rock facilitate penetration of water; this promotes chemical weathering that forms clays and Fe and Mn oxides. Fe and Mn move toward deeper layers and the new clays reorganize in the matrix or they are transported with percolated water, to be deposited in the fractures. Because of swelling and shrinking processes, the clays in the matrix reduce lithification of the tuff and prevent the formation of a cementing agent. The coating clays, located in the fractures (unstable rock zones), are subject to translocation by new flows of water, and do not act as agglutinants. Weathering (altered minerals and alteration halos) and pedogenesis (clay coatings and clay domains in the matrix) reduce lithological features of the tuffs, to such a degree that they still retain their structure. These characteristics belong to a weathered tuff. In geology and edaphology it is denominated saprolite (*sapros*, putrid, and *litos*, rock), a term that better designates an igneous rock weathered *in situ*.

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

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

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

Publicado en *Terra Latinoamericana* 22: 11-21.

Index words: Weathering, pyroclastic rock, tuff, micromorphology.

INTRODUCCIÓN

Los Aztecas denominaban como "tepetatl" a una variedad de materiales de dureza intermedia entre suelo y roca, que afloraba por la erosión y no tenía aptitud agrícola (Gibson, 1996), y como "tepetatlalli" al tepetatl desmenuzado y abonado para uso agrícola. Por la presión de contar con la tierra, algunos campesinos del centro y sur de México se ven obligados a trabajar, según los principios prehispánicos, áreas relativamente pequeñas de tepetates no cultivables para hacerlos de labor; el conocimiento campesino, heredado del prehispánico y aprendido por el cercano contacto con la tierra, es de gran detalle. Por el contrario, el conocimiento científico occidental ha estudiado estos materiales en escalas menos precisas, por lo que la generalización de conclusiones ha permitido la pérdida de información de características locales específicas (Ortiz, 1999).

Estudios pedológicos de los tepetates del centro de México los han definido como formaciones rocosas estratificadas (Shaw, 1929) y rocas piroclásticas, desde tobas con cemento arcillo-ferruginoso o calcáreo poco intemperizadas (Salazar, 1938), tobas andesíticas y pumicitas (Miehlich, 1984), tobas (Nimlos, 1990; Quantin *et al.*, 1993) y brechas volcánicas, cementadas con sílice (Cajuste y Cruz, 1987; Quantin *et al.*, 1993).

El mayor grado de generalización en el estudio de los tepetates ha sido considerarlos como suelos volcánicos endurecidos. Este nombre, al sugerir que en un momento dado éstos materiales fueron suelos, permitió que los estudios pedológicos se enfocaran a explicar su proceso de endurecimiento. Para Quantin *et al.* (1993), el endurecimiento pedogenético del tepetate se sobrepuso a la litificación de la toba, reduciendo su dureza en un clima húmedo y reforzándola en un clima subárido. La acumulación y distribución, en la matriz y en los poros, de los productos de la alteración reforzaron su consolidación (Quantin *et al.*, 1993; Hidalgo, 1995). Miehlich (1984) atribuyó su endurecimiento a la presencia de revestimientos y rellenos arcillosos, en los macroporos. Los productos de alteración del tepetate se han relacionado con su endurecimiento: esmectitas, haloisitas, arcillas interestratificadas 1:1/2:1, arcillas tipo 2:1, óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso,

ópalo A (Quantin *et al.*, 1993; Hidalgo, 1995) y geles de sílice (Cajuste y Cruz, 1987; Hidalgo, 1995). Sin embargo, Rodríguez *et al.* (1999) mencionaron que los productos de intemperismo no cohesionan a las rocas piroclásticas denominadas como tepetates, por el contrario, debilitan su litificación desde que se inicia la formación de arcillas, el cual es uno de los procesos más importantes. A una altitud de 2700 m, con un clima más húmedo, estos mismos autores reportaron tobas andesíticas bajo cenizas no consolidadas, cuyo intemperismo químico generó principalmente arcillas cristalinas, más que minerales amorfos, como en el caso de las cenizas sueltas.

Miehlich (1984, 1991) denominó tres tobas como unidades de tepetates 1T, 2T y 3T. Por la semejanza con las tobas de Miehlich, Peña y Zebrowski (1992) nombraron otras como T1, T2 y T3. Por la semejanza con las anteriores, Hidalgo (1995) clasificó como series T1, T2, T3 y T4 a cuatro depósitos piroclásticos, cada uno con un estrato de tepetate t2a, t2b y t3. Sin embargo, esta correlación se cuestiona por poco precisa, ya que mientras Miehlich reportó unidades andesíticas tipo "duripán", los demás autores las reportaron como riolíticas, tipo "fragipán". Flach *et al.* (1992) también han cuestionado las denominaciones duripán y fragipán para los tepetates, por no cumplir con los requisitos de diagnóstico de la Taxonomía de Suelos. Para Quantin *et al.* (1993), el tema de la génesis de los "suelos volcánicos endurecidos" no necesita más investigaciones. Sin embargo, los tepetates son diferentes materiales a los que se ha intentado generalizar a partir de muy pocos perfiles, sin considerar la complejidad del terreno volcánico en el cual éstos se presentan, ni su relación con los suelos que los sobreyacen.

El objetivo de esta investigación fue demostrar que el tepetate de la ladera oeste del cerro Tlálloc no tiene procesos de endurecimiento pedológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se localiza entre los paralelos 19° 26' y 19° 27' N y los meridianos 98° 49' y 98° 51' O, sobre la ladera occidental del cerro Tlálloc, cerca del poblado de Coatlincháui, en la Cuenca de México, dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano, una provincia volcánica de edad miocénica a reciente (Figura 1).

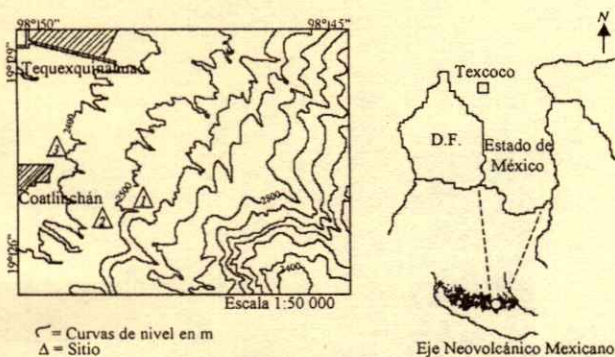


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Su litología comprende productos piroclásticos y derrames lávicos de composición andesítica, dacítica, riolítica y, en menor grado, riodacítica y, en menor grado, riodacítica y, en menor grado, riodacítica (Morán, 1984); su relieve, no mayor que 60 000 años, muestra los efectos de acumulaciones volcánicas de diverso tipo y magnitud, de movimientos tectónicos de elevación y hundimiento, y de acumulaciones originadas por corrientes fluviales (Lugo, 1986).

El cerro Tláloc, volcán cinerítico del Mioceno, se originó por erupciones moderadas y violentas; las primeras fueron de composición dacítica y las últimas, andesíticas (Morán, 1984). El tepetate no se presenta a más de 3000 m de altitud; entre 3000 y 2200 m, éste está expuesto o soporta suelos arcillosos, y la red fluvial que lo ha profundizado y los cortes de las minas a cielo abierto muestran que su espesor alcanza hasta varias decenas de metros; inferior a 2200 m, en el piedemonte, éste se localiza aproximadamente a 3 m de profundidad, cubierto por material coluvial, hasta llegar a amplias zonas aluviales (Nimlos y Ortiz, 1987). De acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen, modificado por García (1981), el clima es templado subhúmedo, el intermedio de los subhúmedos, con lluvias en verano (Cw(w)b(i)). La precipitación media anual es de 900 mm, con mayor precipitación en junio, julio y agosto, esporádicamente en julio alcanza 1100 mm; en febrero y en diciembre caen lluvias ocasionales. La temperatura media anual es de 17 °C; la extrema más caliente, de 37 °C, es en mayo, y la más fría, de -2 °C, en enero; pueden suceder heladas eventuales entre octubre y abril. La evaporación potencial, notablemente más alta que la precipitación, oscila entre 900 y 2300 mm año⁻¹; el viento sopla hacia el noreste y noroeste a una velocidad promedio de 10 km h⁻¹. El régimen de humedad del suelo es ústico, el de temperatura es isotérmico (Van Wambeke, 1987).

Trabajo de Campo

Se eligió la ladera oeste del cerro Tláloc, cerca de Coatlinchán, estado de México, debido a la poca información sobre el tepetate de esta área. Se seleccionaron dos sitios con tepetate enterrado y uno con éste aflorando (Figura 2), para explicar sus diferencias macro y micromorfológicas. El material considerado como tepetate es duro para cultivar, pero suave para ser una roca. Se rompe con la mano, se excava con pala y pico, no es suelo, ni se ha perturbado por la actividad humana.

En cada sitio, se excavó un perfil que se describió de acuerdo con Cuanalo (1990) y con FAO (1990). De cada capa de tepetate, se tomaron muestras de dos tipos: alteradas, para sus análisis físicos, químicos y mineralógicos, y muestras inalteradas para su análisis micromorfológico.

Trabajo de Laboratorio

Para el análisis micromorfológico, de cada capa, se elaboraron secciones delgadas tamaño mamut, de acuerdo con Murphy (1986). Las observaciones se realizaron con un microscopio petrográfico, bajo luz natural y luz polarizada, y la descripción se hizo de acuerdo con Bullock *et al.* (1985). La microestructura (relación espacial entre el material sólido y los poros) y el arreglo interno (relación espacial entre los constituyentes sólidos), se describieron con una resolución 2X (5000 μ); los rasgos texturales (revestimientos y rellenos arcillosos), se detallaron bajo resoluciones 2X (5000 μ) y 20X (250 μ); la matriz (fracción limo-arcillosa) y los granos minerales, con una resolución de 20X (250 μ).

Para el análisis mineralógico de la fracción arena, se separó la fracción pesada de la fracción ligera, de acuerdo con Moreno (1985). De cada fracción, se contabilizaron 100 puntos para obtener el porcentaje de cada especie mineral y con ambos resultados, micromorfológicos y mineralógicos, se clasificó el material petrográficamente (Huang, 1968; Williams *et al.*, 1968). La mineralogía de la fracción arcilla (< 2 μ) se determinó por difracción de rayos X (tubo con ánodo de Cu y radiación CuK α) en agregados orientados al natural, saturados con etilén glicol y calentados a 490 °C.

Los análisis físicos y químicos, como tamaño de partícula (método de la pipeta), color (carta de colores Munsell), densidad aparente (método de la

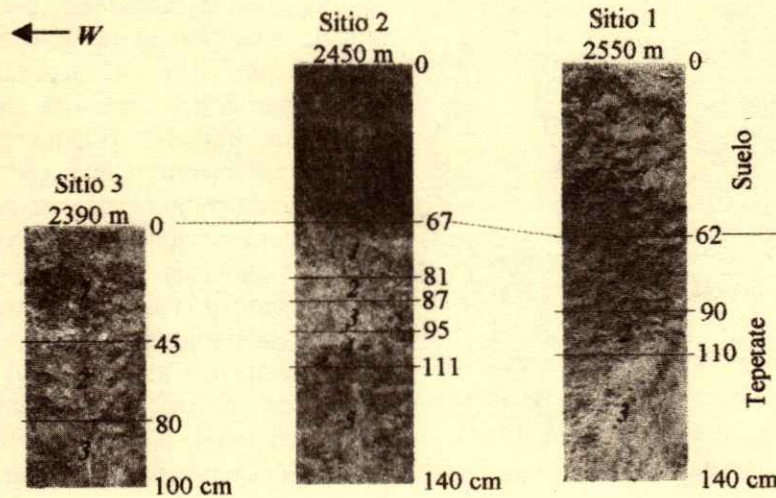


Figura 2. Posición relativa de las capas de tepetate estudiadas.

parafina), capacidad de intercambio catiónico (acetato de amonio 1 N pH 7) y pH en una relación suelo:agua 1:1, se basaron en los procedimientos de análisis de suelos de Van Reeuwijk (1999), propios para la clasificación y correlación de suelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Morfología

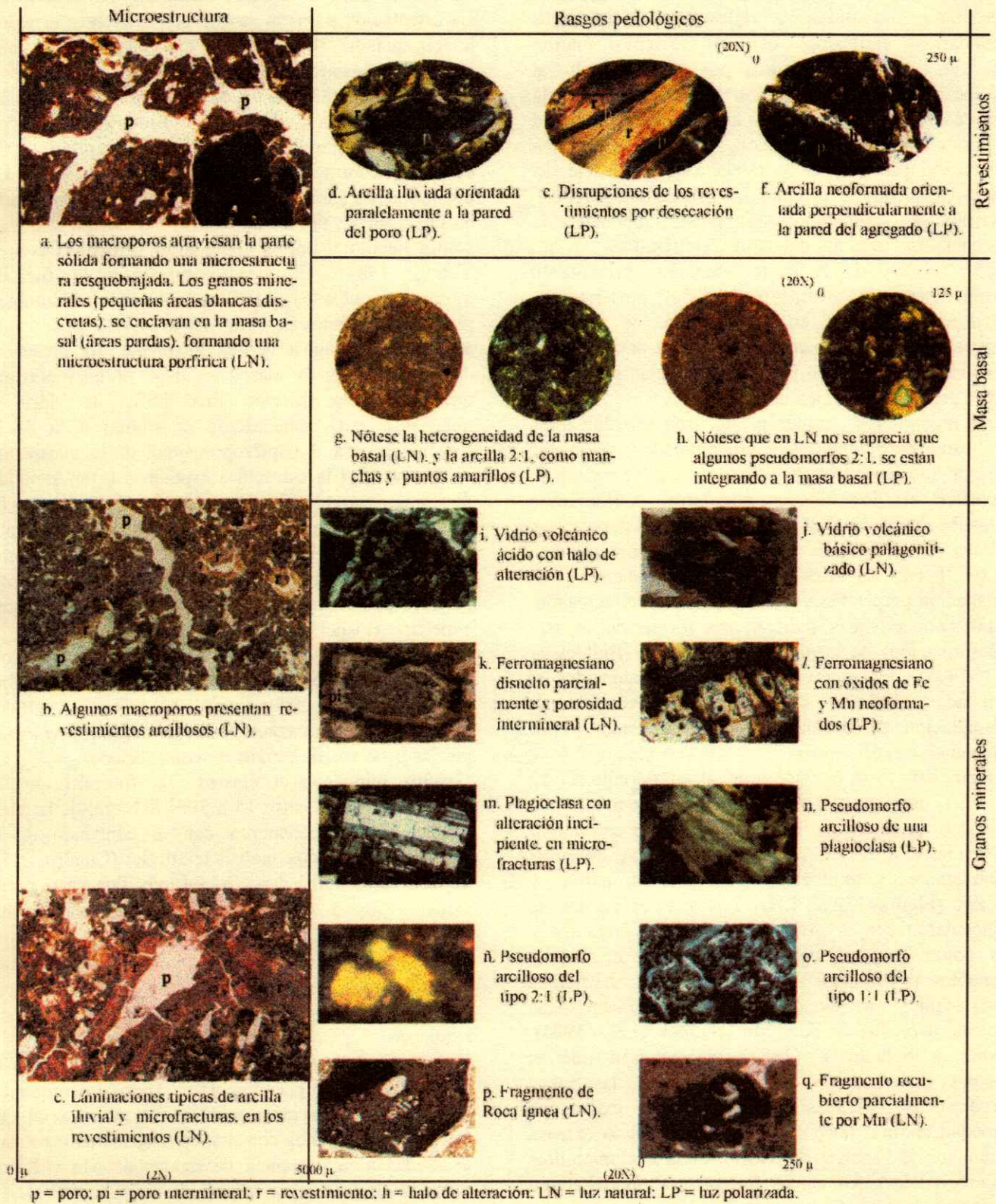
El perfil se subdividió en diferentes capas (Figura 2), atendiendo a los cambios cualitativos de color, textura y dureza. El color más oscuro, la textura más fina y la dureza menor se presentaron en la capa superior. Se exhibió triple estructura apedal: una parte se fragmentó en poliedros angulares, de tamaño muy fino a medio (1 a 20 mm), la otra fue semejante a un material incoherente y, ocasionalmente, una fracción fue masiva. Algunos de los fragmentos y la parte masiva presentaron una consistencia muy dura en seco, muy firme en húmedo, pegajosa y plástica al ser humedecidos. Se observaron grietas medianas (1 a 5 mm), algunas de las cuales mostraron revestimientos arcillosos; además, se identificaron nódulos de manganeso, más frecuentes en las capas inferiores.

Micromorfología

Las capas presentaron características micromorfológicas similares, detalladas a continuación.

Microestructura. Está compuesta por largos y grandes poros (macroporos) planos (de paredes opuestas acomodadas), la mayoría conectados entre sí, que fragmentan el material denso y, en ocasiones, atraviesan totalmente la lámina delgada. Este arreglo espacial conforma una microestructura resquebrajada, con bloques irregulares de varios tamaños (Figura 3a). Esta microestructura, constituida de redes de poros estructurales comunicados entre sí, se explica por la fragmentación de un lecho de roca, generado por descarga erosional o tectonismo, que actúa sobre él; estas redes de fracturas permiten la circulación del agua percolada, lo que produce alteración en su superficie (Billings, 1963). Los diámetros de estas fracturas variaron de unos cientos de micras a mayores que 2000 μ (Figuras 3a,b,c).

Arreglo interno. Es el arreglo espacial entre la matriz (fracción mineral < 2 a 50 μ), y los granos minerales (fracción de 50 μ a 2000 μ). Los granos minerales se presentaron enclavados, sin orientación, en la matriz, conformando un arreglo porfírico (minerales gruesos inmersos en una masa fina), con espaciamiento simple, pero también doble, en algunas áreas (Figura 3a,b,c).



p = poro; pi = poro intermineral; r = revestimiento; h = halo de alteración; LN = luz natural; LP = luz polarizada.

Figura 3. Micromorfología de la toba intemperizada.

Rasgos texturales. Algunos macroporos se presentaron revestidos y rellenos por productos secundarios arcillosos, con un arreglo interno laminado, el cual se explica por su origen iluvial (Bullock y Thompson, 1985). Bajo luz polarizada (Figuras 3d,e), las arcillas mostraron continuidad óptica y líneas de extinción, lo que indica una orientación preferencial, paralela a la superficie del poro. Atendiendo a su color intenso de interferencia, amarillo de segundo orden, puede suponerse la presencia de arcillas del tipo 2:1 (Bullock *et al.*, 1985). La mayoría de los revestimientos presentaron disrupciones, microfisuras (Figura 3e), posteriores a su deposición; éstas se asociaron a los procesos activos de humedecimiento y secado del perfil (Dixon y Young, 1981) y a su posterior remoción provocada por la percolación del agua.

Otros macroporos también presentaron revestimientos arcillosos, pero lípidos y no laminados, de menor espesor que los antes descritos, los cuales rodean la superficie de los bloques angulares, conformando halos de alteración (Figura 3f). En luz polarizada, sus colores de interferencia fueron grises de primer orden, y sin líneas de extinción, lo que indicaría una orientación perpendicular a la superficie del agregado. Estas características indican una formación *in situ* (neoformación) de la arcilla del tipo 1:1 (Bullock *et al.*, 1985). Estos revestimientos, no laminados y laminados, reflejan dos tipos de procesos de acumulación de arcillas, por intemperismo y por iluviación, respectivamente.

Matriz. Ésta es la fracción mineral limo-arcillosa (< 2 a 50μ), íntimamente mezclada. Bajo luz natural, la matriz es parda rojiza, pero, al observarla con mayor precisión, se nota gran cantidad de partículas obscuras contrastantes y microzonas blanquecinas, pardas y rojizas (Figuras 3g,h, LN). Los colores pardos se relacionaron con la presencia de materia orgánica y los colores rojizos con los hidróxidos de hierro, hematita o amorfos de hierro. Las partículas contrastantes correspondieron, por sus características ópticas, a óxidos de Fe y Mn (Bullock *et al.*, 1985). Fisher y Schmincke (1984) mencionaron que el análisis microscópico de la matriz de las rocas piroclásticas litificadas es difícil, porque existe una variedad textural poco clara que resulta de la extensa disolución del polvo de vidrio y de los microlitos (microcristales), los cuales forman microporos o son reemplazados por nuevos minerales.

Micromasa. Se refiere al material más fino de la matriz ($< 2 \mu$), sólo observable bajo luz polarizada,

cuando se trata de arcillas orientadas paralelamente. La orientación paralela resalta con diferentes arreglos birrefringentes (b-fábricas), los cuales son más evidentes si las arcillas son expansibles.

La arcilla orientada dentro de la matriz es la expresión micromorfológica de los procesos vérticos (organización paralela de la arcilla por procesos de expansión-contracción) (Bullock *et al.*, 1985). La presión actúa sobre un volumen de material confinado en dos formas: por la hinchazón del cuerpo y por el confinamiento y por la sobrecarga vertical (Dixon y Young, 1981). El arreglo birrefringente fue de mosaico punteado, pero se presentaron también granoestrias (Figuras 3g,h, LP), lo que indica una actividad pedológica vértica incipiente. La presencia de la arcilla en la matriz se debe al intemperismo químico de la fracción fina, polvo de vidrio y microlitos, cuya mineralogía es similar a la de la fracción gruesa. La microporosidad de la matriz fue discernible por la estructura esponjosa (gran cantidad de microporos interconectados). Esta red de microporos permitió un contacto generalizado por difusión con el agua percolada, la cual reaccionó con la superficie del polvo de vidrio y con los microlitos, para formar otras especies minerales en su misma superficie (Fisher y Schmincke, 1984).

En la matriz, se reflejan dos tipos de procesos: acumulación de arcillas y de óxidos de Fe y Mn, como productos del intemperismo, y procesos vérticos incipientes, reorganización de la matriz, favorecida por los procesos de expansión-contracción.

Granos minerales o clastos. La fracción mineral gruesa representó entre 15 a 30% del total de la parte sólida, lo que concuerda con el contenido de la fracción arena de los análisis texturales (Cuadro 1). Su tamaño comprendió desde arena muy fina hasta arena media (50 a 500μ), aunque eventualmente aparecieron granos mayores que 1000μ . La mayoría de éstos fueron angulares y se presentaron fracturados o rotos. Algunos granos minerales se presentaron parcialmente alterados, sobre todo en los bordes, o siguiendo el patrón de los clivajes, microfracturas e inclusiones (porosidad intramineral); otros granos se presentaron como pseudomorfos. Todos los minerales presentaron interacción química con el material que los rodeaba, algunos con manchas oscuras o rojizas, asociadas a la presencia de óxidos de Mn y Fe, y, otros, impregnados por la matriz.

La alteración del vidrio volcánico ácido, además de seguir las microfracturas perlíticas, presentó en los bordes un halo de alteración con material arcilloso

Cuadro 1. Análisis físicos y químicos.

Capa	Profundidad cm	Textura			Clase textural	Color		Dap Mg m ⁻³	CIC cmol kg ⁻¹	pH H ₂ O 1:1
		Arcilla	Limo %	Arena		Seco 10YR	Húmedo			
Sitio 1										
1	62-90	57	26	17	Arcillosa fina	5.5/1	3.5/1	1.6	33.5	6.2
2	90-110	51	35	14	Arcillosa	5.5/1	4/1	1.4	33.8	7.6
3	110-140	38	29	33	Franca arcillosa	7/1	4/1	1.4	39.9	7.9
Sitio 2										
1	67-81	60	29	12	Arcillosa fina	6.5/2	3.5/1	1.6	31.8	7.5
2	81-87	57	31	13	Arcillosa fina	6.5/2	2.5/2	1.7	29.3	8.5
3	87-95	57	31	13	Arcillosa fina	6/4	3.5/4	1.7	31.5	8.2
4	95-111	27	39	34	Franca	6.5/6	3.5/4	1.5	32.8	8.3
5	111-140	26	46	28	Franca	6.5/6	3.5/6	1.5	32.8	7.8
Sitio 3										
1	0-45	38	29	33	Franca arcillosa	4.5/6	3.5/4	1.3	28.1	6.4
2	45-80	32	43	25	Franca arcillosa	6.5/6	3.5/6	1.2	32.3	7.7
3	80-100	22	43	22	Franca arcillosa	6.5/6	3.5/6	1.2	39.4	8.0

Dap = densidad aparente; CIC = capacidad de intercambio catiónico.

neoformado (Figura 3i). El vidrio volcánico básico palagonitizado, identificado por su isotropía, color anaranjado y relieve negativo, eventualmente se observó en el Sitio 2 (Figura 3j). La disolución de los ferromagnesianos dejaron la huella de la forma del mineral original, residuos denticulados con el patrón del clivaje del mineral, una porosidad intermineral y manchas rojizas de óxidos de Fe (Figura 3k). La hidrólisis y la oxidación mostraron arcillas y óxidos de Fe y Mn, respectivamente, rellenando fisuras e inclusiones con el material neoformado (Figura 3l). La alteración de las plagioclasas inició, principalmente, a lo largo de sus fracturas e inclusiones (Figura 3m). Algunos pseudomorfos se reconocen como plagioclasas, por la huella química o por los esbozos de sus maclas (Figura 3n). La arcilla límpida con color de interferencia amarillo de segundo orden indica que se trata del tipo 2:1 (Figura 3ñ), el gris de primer orden, del tipo 1:1 (Figura 3o). Algunos fragmentos de rocas ígneas, en general, muestran alteración férrica, tanto en su matriz lávica, como en sus fenocristales (Figura 3p). También se observó al Mn, recubriendo algunos granos minerales (Figura 3q). El proceso más importantes que se observó en los granos minerales es el de disolución, el cual se llevó a cabo en los microporos intraminerales (clivajes, fracturas o inclusiones). Este proceso disuelve los granos minerales, disminuyendo su tamaño y generando poros interminerales. También ocurren reacciones de superficie en los minerales, producto de la hidrólisis, cuyo producto final precipita *in situ* y

reemplaza pseudomórficamente al mineral primario. El mineral secundario precipitado depende del mineral primario original y de su exposición al flujo de agua (Fisher y Schmincke, 1984; Brownlow, 1996). En los ferromagnesianos, sujetos a una alteración que combina procesos muy activos de oxidación, disolución e hidrólisis, la liberación del hierro por oxidación favorece su desorganización (Brownlow, 1996). La mineralogía, en orden de abundancia, fue plagioclasas (~55%), vidrios volcánicos (~23%), ferromagnesianos (~15%), cuarzo (~2%) y fragmentos de rocas ígneas (~5), y corresponde a una composición andesítica (Huang, 1968).

Características Físicas y Químicas

Las diferentes capas estudiadas muestran las mismas características, tanto macro como micromorfológicamente, sin embargo, presentan algunas diferencias en sus propiedades físicas y químicas, las cuales están relacionadas con su grado de intemperismo (Cuadro 1).

Las capas de la superficie, o más cercanas a ella, presentaron una textura más arcillosa y colores más oscuros que las capas inferiores. La coloración más oscura se atribuyó a la materia orgánica, porque al oxidar las muestras con H₂O₂ desaparecieron la poca materia orgánica y el color oscuro. El aspecto pardo rojizo de la matriz se debe, principalmente, a los productos de alteración férricos asociados con materia orgánica. En cada perfil, la densidad aparente fue

menor en las capas inferiores. Esto se podría explicar por la poca cantidad de arcillas, las cuales al no estar acomodadas tienden a puentear, generando una mayor microporosidad; al contrario de la capa superior, cuyo mayor contenido de arcillas acomodadas paralelamente, empaquetan más cerradamente, lo que resulta en una densidad mayor. La menor densidad del tepetate del Sitio 3 (tepetate que aflora) se debe a que éste, al estar más expuesto a los flujos de agua, pierde material fino, generándose una porosidad adicional que disminuye las densidades aparentes. Esto concuerda con Graham *et al.* (1990), quienes mencionaron que las rocas más intemperizadas y microporosas poseen las densidades más bajas. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue mayor que 25 cmol kg^{-1} , lo que indica gran capacidad de adsorción de cationes, debida a la matriz arcillosa, a los materiales amorfos y a la presencia de cationes intercambiables Ca^{2+} y Mg^{2+} , como reflejo del intemperismo; sin embargo, es necesario aclarar que los valores altos de la CIC podrían deberse, en parte, a los problemas inherentes al método utilizado (acetato de amonio 1N pH7), el cual puede elevar la CIC en suelos con pH ligeramente alcalinos, como es este caso. Los pH de 7.6 a 8.5 de las capas inferiores indican un material básico, saturado de bases y, por lo tanto, una baja solubilidad del hierro; en la capa superior, los pH 6 a 7.6, ligeramente ácido a neutro y a ligeramente básico, indican una muy buena solubilidad de los iones y permiten la oxidación del hierro y la lixiviación de elementos (Pavich, 1986). Por estas evidencias, junto con las macro y micromorfológicas, se muestra que la alteración de este material es por intemperismo geoquímico, porque éste es mayor en las capas cercanas a la superficie.

Geogénesis y Pedogénesis

La presencia de minerales ígneos del tamaño de la arena (cenizas), enclavados, sin orientación, en la matriz, indica una toba cristalina de naturaleza andesítica. La estructura de roca (relación espacial original entre los bloques de roca y entre los minerales dentro de la matriz) aún se conserva, a pesar de la fragmentación por el intemperismo físico. Los bloques más grandes representan la estructura masiva del perfil; los fragmentos angulares, observados macro y microscópicamente, son los poliedros angulares, algunos de los cuales, con suave opresión manual, se desintegraron en sus partículas primarias

(Figura 3k). Esta triple estructura apedal se generó por la segregación de un material geológico que se está alterando, y no de un ped que contuviera procesos de agregación.

A medida que el intemperismo avanza, los rasgos litogénicos se reducen. Parte de los óxidos de Fe y Mn migraron, principalmente el Mn, hacia capas profundas, formando nódulos y motas. Estos rasgos son característicos de un hidromorfismo moderado (Veneman *et al.*, 1976), como resultado de la saturación por períodos de algunos días de lluvia y condiciones alternantes de óxido-reducción (Buol *et al.*, 1989). La arcilla neoformada permanece estática, como minerales pseudomorfos, mientras que otra parte presenta gran actividad; esta última es reorganizada en la matriz, conformando arreglos de arcillas paralelas entre sí, o es arrastrada en solución por el agua y depositada en el espacio poroso, formando revestimientos laminares orientados. La arcilla no actúa como cementante en una roca en el ambiente de intemperismo, porque su intensa actividad por humedecimiento y secado, al contrario de proporcionar una consolidación efectiva, inhibe la formación de un agente cementante (Williams *et al.*, 1968; Fisher y Schmincke, 1984). Por otro lado, los revestimientos, no juegan el papel de material aglutinante, ya que éstos se ubican en las fracturas, originadas por la fragmentación de la roca, zona por demás inestable; además, los revestimientos están sujetos a la actividad de expansión y contracción y, a su posterior arrastre, por nuevos flujos de agua, como puede observarse en la Figura 3e. Aparentemente, la evolución pedológica de estos materiales sería hacia un suelo arcilloso con propiedades vérticas.

Las rocas intemperizadas que contienen arcilla iluvial, en general están bajo suelos que tienen horizontes argílicos, los cuales se desarrollaron en condiciones de estabilidad geomórfica prolongada (Rice *et al.*, 1985). Contrario a lo anterior, estas capas se presentan en una zona considerada como inestable por ser volcánica, con gran actividad tectónica, y en laderas volcánicas con fuerte erosión. La presencia de revestimientos, podría deberse a dos situaciones: 1) gran presencia de arcillas neoformadas, a las cuales el agua de percolación arrastraría y depositaría, relativamente en cortos períodos, o 2) al igual que el horizonte argílico, los revestimientos podrían reflejar ambientes estables pasados que fueron más conducentes al intemperismo y lixiviación.

Diferencias entre el Tepetate que Aflora y el Tepetate Enterrado

En los tres sitios estudiados, los materiales presentaron las mismas características macro y micromorfológicas y los mismos procesos de evolución; sin embargo, la naturaleza mineralógica de la micromasa ($< 2 \mu$), gran parte de la cual conformó la matriz, mostró ambientes diferentes entre los materiales que afloraron a la superficie y los del subsuelo. Los difractogramas se presentan en la Figura 4.

En el Sitio 1, en la muestra donde la fracción arcilla se orientó al natural, las reflexiones a 0.362 nm se asociaron con plagioclasas y, a 0.404 nm, con cristobalita; mientras que entre 0.32 y 0.46 nm, una observación detallada indica que no hay una reflexión fina para las arcillas silicatadas, por lo que esta respuesta se consideró como una banda ancha suave, que se relacionó con la presencia de material amorfo, probablemente vidrio volcánico, el cual se observó

abundante en la matriz. También en la muestra al natural aparecieron reflexiones no simétricas a 1.05 y 0.504 nm que se asociaron a la presencia de micas, así como a 0.74 y 0.362 nm, correspondientes a una arcilla 1:1. Estas reflexiones no variaron con el tratamiento con etilén glicol. Además, se observó una reflexión débil, pero discernible, a 1.19 nm en el tratamiento al natural, la cual se desplazó a 1.34 nm con etilén glicol, lo que indicaría una cierta capacidad de expansión de estas arcillas y permite sospechar la presencia de arcillas de tipo 2:1 expansibles. La presencia de una banda ancha centrada a 0.88 nm después del calentamiento a 490 °C corrobora la presencia de arcillas 2:1.

En el Sitio 2, la fuerte reflexión a 0.32 nm se asoció con la presencia de feldespatos y, a 0.404 nm, con cristobalita. Las reflexiones no simétricas en las muestras orientadas al natural localizadas a 0.74 y 0.362 nm, las cuales se expresaron mejor en el tratamiento con etilén glicol, indican la presencia de arcillas cristalinas del tipo 1:1. La reflexión pequeña,

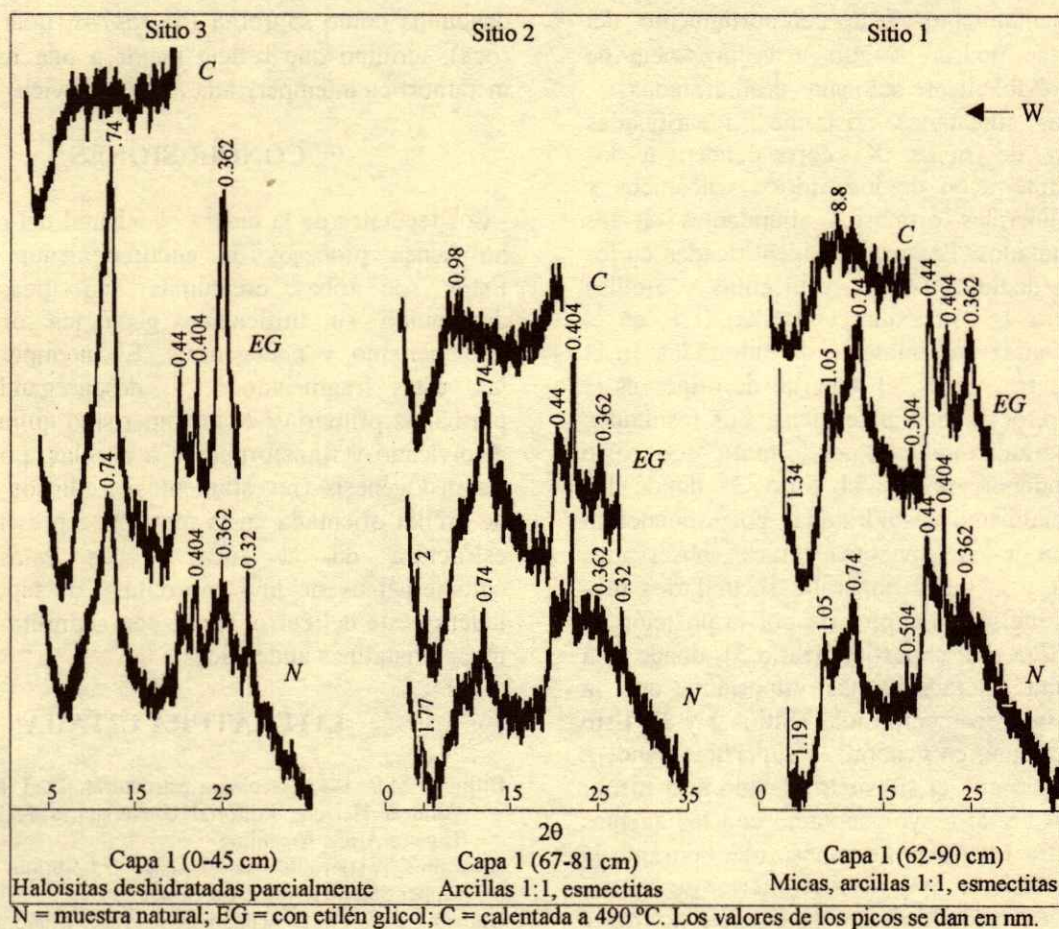


Figura 4. Difractogramas (CuK α) de la fracción fina ($< 2 \mu$).

casi imperceptible, alrededor de 1.77 nm de la muestra al natural, que se desplazó ligeramente con el tratamiento con etilén glicol a 2 nm, permite inferir la presencia de arcillas del tipo 2:1 expansibles. La banda ancha, poco definida alrededor de 0.98 nm en la muestra calentada confirma la presencia de arcillas 2:1. La reflexión localizada a 0.44 nm en el tratamiento al natural y con etilén glicol corresponde a la presencia de arcillas mal orientadas.

En el Sitio 3, en las muestras al natural, las reflexiones a 0.32, 0.362 y 0.404 nm, se asocian a los feldespatos, plagioclasas y cristobalita, respectivamente. La banda ancha suave, entre 0.32 y 0.46 nm, se asoció al polvo de vidrio, observado en microscopio óptico. Las reflexiones no simétricas en el agregado natural a 0.74 y 0.36 nm no se desplazaron por efecto del tratamiento del etilén glicol, sin embargo, en el agregado al natural, se manifestó una reflexión a 0.44 nm que no se desplaza con la saturación con etilén glicol, lo que sugiere la presencia de arcillas mal orientadas. El calentamiento a 490 °C ratifica la presencia de arcillas 1:1, que se descomponen por efecto del calentamiento. Este comportamiento del difractograma se podría atribuir a la presencia de arcillas 1:1, probablemente haloisitas deshidratadas.

Las arcillas silicatadas cristalinas, identificadas por difracción de rayos X, corresponden a los productos de alteración de los vidrios volcánicos y feldespatos, minerales primarios abundantes en los materiales estudiados. Las arcillas identificadas en los tres sitios son distintas (micas, esmectitas y arcillas 1:1, en el Sitio 1; esmectitas y arcillas 1:1, en el Sitio 2; y haloisitas parcialmente deshidratadas en el Sitio 3); en los tres casos, el material de origen es el mismo, rocas piroclásticas andesíticas. Los resultados de los difractogramas indican, por lo tanto, que existe un mayor intemperismo en el Sitio 3, donde las haloisitas parcialmente deshidratadas corresponderían a una evolución de las esmectitas y micas, observadas en los Sitios 1 y 2, hacia minerales secundarios más alterados. Lo anterior se explicaría por la posición de la roca que aflora a la superficie (Sitio 3), donde está expuesta a una alteración más importante que la presentada en las rocas enterradas (Sitios 1 y 2). Esto tiene sentido porque, en general, la superficie tiende a ser menos estable que el subsuelo, debido a la menor presión de carga y al mayor contacto con los agentes atmosféricos. En las tobas intemperizadas, durante la lluvia, la superficie se excava y el interior se satura. Por flujo concentrado de aguas, la erosión externa e interna afecta la roca de una manera en particular

dramática, por el lavado relativamente alto del material más fino. Por otro lado, el flujo mayor de agua en el tepetate que aflora, Sitio 3, explicaría la formación de haloisita, por una mayor pérdida de elementos básicos que se lixivian en el perfil.

Tepetate, una Saprolita

Con las evidencias encontradas en este trabajo, el tepetate de la ladera occidental del cerro Tláloc no correspondió a un suelo endurecido por procesos pedogenéticos, como lo señalaron Miehlich (1984) y Quantin *et al.* (1993). Los materiales estudiados correspondieron a tobas cristalinas andesíticas intemperizadas. El intemperismo las está fragmentando, disolviendo y transformando a arcillas. El grado de intemperismo es tal, que las tobas aun retienen su estructura. Algunas fracturas contienen revestimientos arcillosos iluviales y, otras, halos de alteración, con la arcilla neoformada. Todas estas características son las de una roca intemperizada, la cual, tanto en geología, como en edafología, se denomina como saprolita (de *sapros*, podrido y *litos*, roca), término que refleja mejor a una roca ígnea o metamórfica intemperizada *in situ* (Pavich, 1986).

CONCLUSIONES

- Los tepetates de la ladera occidental del cerro Tláloc no tienen procesos de endurecimiento pedológico. Éstos son tobas cristalinas andesíticas que han disminuido su litificación geológica original, por intemperismo y pedogénesis. El intemperismo físico las está fragmentando y desagregando en sus partículas primarias; el intemperismo químico las está disolviendo y transformando a arcillas, por hidrólisis. La pedogénesis (revestimientos arcillosos y dominios de arcilla orientada en la matriz) se presenta sobre la estructura de la roca. Todas éstas son las características de una saprolita. Los tepetates de la ladera oeste del cerro Tláloc son saprolita derivada de tobas cristalinas andesíticas.

LITERATURA CITADA

- Billings, M.P. 1963. Geología estructural. Trad. al español por Almirar Herrera. Editorial Universitaria de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- Brownlow, A.H. 1996. Geochemistry. 2nd edition. Prentice-Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- Bullock, P. y M.L. Thompson. 1985. Micromorphology of Alfisols. Soil micromorphology and soil classification. pp.

- 17-46. In: Douglas, L.A. y M.L. Thompson (eds.). Special Publication 15. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Bullock, P., N. Fedoroff, A. Jongerijs, G. Stoops y T. Tursina. 1985. Handbook for Soil Thin Section Description. Waine Res. Pub. Wolverhampton, England.
- Buol, S.W., F.D. Hole y R.J. McCracken. 1989. Soil genesis and classification. 3rd ed. Iowa State University Press. Ames, IA.
- Cajuste, L.J. y J. Cruz D. 1987. Presencia de materiales amorfos en algunos tepetates de la zona de influencia Chapingo. pp. 69-77. In: Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Cuanalo, H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Tercera edición. Talleres Gráficos de la Nación. México, D.F.
- Dixon, J.C. y R.W. Young. 1981. Character and origin of deep arenaceous weathering mantles on the Bega Batholith, Southeastern Australia. *Catena* 8: 97-109.
- FAO. Food and Agricultural Organization. 1990. Guidelines for soil profile description. Third edition (revised). Soil Resources Management and Conservation Service. Land and Water Development Division. Rome, Italy.
- Fisher, R.V. y H.U. Schmincke. 1984. Pyroclastic rocks. Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- Flach, K.W., W.D. Nettleton y O.A. Chadwick. 1992. The criteria of Duripans in the U.S. Soil Taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize silica indurated soils. *Terra* 10 Número Especial: 34-45.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Offset Larios S.A. México, D.F.
- Gibson, Ch. 1996. Los Aztecas bajo el dominio español, 1519-1810. 13^a edición. Editorial Siglo XXI, S.A. de C.V. México, D.F.
- Graham, R.C., R.B. Daniels y S.W. Buol. 1990. Soil-geomorphic relations on the Blue Ridge Front: I. Regolith types and slope processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1362-1367.
- Hidalgo M., C. 1995. Étude d'horizons indurés à comportement de fragipan, appelés tepetates, dans les sols volcaniques de la Vallée du Mexique. Contribution à la connaissance de leurs caractères et de leur formation. Thèse du Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I en Pédologie. Nancy, France.
- Huang, T.W. 1968. Petrologia. Trad. al español por R. García Díaz. UTHEA. México, D.F.
- Lugo H., J. 1986. El sistema neovolcánico mexicano: Una de las regiones más activas. *Información Científica y Tecnológica* 8 (112): 33-35.
- Miehlich, G. 1984. Chronosequenzen und Anthropogene Veränderungen Andesitischer Vulkanische Böden in drei Klimastufen eines Rantropischen Gebirges (Sierra Nevada de México). Habilitation Thesis, Fachbereich Geowissenschaften. Universität Hamburg. Hamburg, Deutschland.
- Miehlich, G. 1991. Chronosequences of volcanic ash soils. *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten*. Band 15. Hamburg, Germany.
- Morán Z., D.J. 1984. Geología de la República Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México, D.F.
- Moreno, C. 1985. Mineralogía de las arenas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- Murphy, C.P. 1986. Thin section preparation of soils and sediments. AB Academic Publishers. Berkhamsted, Great Britain.
- Nimlos, T.J. 1990. Morphology, genesis and classification of soils formed over Mexican tepetate. *Soil Surv. Horizons* 30(3): 72-77.
- Nimlos, T.J. y C.A. Ortiz S. 1987. Tepetate the rock mat. *J. Soil Water Conserv.* 42(2): 83-86.
- Ortiz S., C.A. 1999. Los levantamientos etnoedafológicos. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Pavich, M.J. 1986. Processes and rates of saprolite production and erosion on a foliated granitic rock of the Virginia Piedmont. pp. 551-590. In: Coleman, S.M. and D.P. Dieter (eds.). Rates of chemical weathering of rocks and minerals. Academic Press. Orlando, FL.
- Peña H., D. y C. Zebrowsky. 1992. Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (Tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del Mapa Morfopedológico de la Vertiente Occidental de la Sierra Nevada. Colegio de Postgraduados-ORSTOM. Montecillo, Texcoco, México.
- Quantin, P., A. Arias, J. Etchevers, R. Ferrera, K. Oleschko, A. Navarro, G. Werner y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: Caracterización y habilitación para la Agricultura. Informe Científico final del Proyecto TS2-A212-C CEE/ORSTOM). *Terra* 11 (Número Especial).
- Rice, T.J., Jr., S.W. Boul y B. Weed. 1985. Soil-saprolite profiles derives from Mafic rocks in the North Carolina Piedmont: I. Chemical, morphological, and mineralogical characteristics and transformations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 171-178.
- Rodríguez T., S., M.C. Gutiérrez C., C. Hidalgo M. y C.A. Ortiz S. 1999. Intemperismo en tepetates y en cenizas volcánicas y su influencia en la formación de Andisoles. *Terra* 17: 97-108.
- Salazar, L. 1938. Elementos de geología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. pp. 192-330.
- Shaw, F.Ch. 1929. Extracto de las Conferencias sobre Formación, Clasificación y Utilización de los Suelos. pp. 24-36. In: *Boletín del Colegio Agrológico de Meoqui, Chihuahua*. México.
- Van Reeuwijk, L.P. 1999. Procedimientos para análisis de suelos, para correlación y clasificación, Versión 1995. Trad. al español por M.C. Gutiérrez C., C.A. Tavares E. y C.A. Ortiz S. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Van Wambeke, A. 1987. Soil moisture and temperature regimes of Central America Caribbean Mexico. Technical Monograph 16. Soil Management Support Services. New York.
- Veneman, P.L.M., M.J. Vepraskas y J. Bouma. 1976. The physical significance of soil mottling in a Einsconson toposequence. *Geoderma* 15: 103-118.
- Williams, H., F.J. Turner y Ch.M. Gilbert. 1968. Petrografía. Trad. al español por J.M. López R. Compañía Editorial Continental. Barcelona, España, Distrito Federal, México.

ANÁLISIS DE IMÁGENES SPOT: EROSIÓN EN LA REGIÓN MONTAÑOSA DEL SUR DE LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Analysis of SPOT Satellite Imagery: Soil Erosion in the Mountainous Region of the South of the Baja California Peninsula, Mexico

Yolanda Maya^{1‡}, Bernard Lacaze², Mario Monteforte¹ y Marie-Françoise Passini³

RESUMEN

En el presente trabajo se aplicaron tres índices sobre las sub-escenas de una región con características árido-tropicales tomadas con cinco años de diferencia y en diferentes estaciones, con el fin de evaluar su utilidad en estudios de erosión de suelos y determinar las áreas de riesgo. Los índices que se aplicaron fueron el Índice de Brillo, el Índice de Vegetación Relativo y la Distancia a la Recta de Suelo. De acuerdo con los resultados, el Índice de Brillo sirve para elaborar mapas confiables de zonas potencialmente erosionadas en las condiciones del sitio de estudio. Los otros dos índices permitieron determinar que en los cinco años transcurridos, la erosión había aumentado y que algunas zonas habían cambiado, pudiendo éstas considerarse como potencialmente erosionadas.

Palabras clave: Erosión de suelos, selva baja caducifolia, Índice de Brillo, Índice de Vegetación Relativo, Distancia a la Recta del Suelo.

SUMMARY

This study evaluates the use of three satellite band combinations (indices) for soil erosion studies, particularly to determinate erosion risk areas. Images were taken with a difference of five years, in different seasons. The evaluated indices were: Brightness index, Fractional Vegetation Cover, and Distance from the Soil Line Index. Indices were applied to subscenes of a region with arid-tropical climatic characteristics. The Brightness index generated

reliable cartography of potentially eroded areas in similar climatic conditions to those of the study area. The other two indices allowed us to determine that soil erosion had increased in the five-year period and that, because of the changes, some areas can be considered potentially eroded.

Index words: Soil erosion, tropical dry forest, Brightness index, Fractional Vegetation Cover, Distance from the Soil Line Index.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, los grandes avances en el desarrollo de la Percepción Remota e Informática han posibilitado la gestión de los recursos naturales, beneficiando a la Geología, la Ecología Vegetal y la Edafología con la información numérica de imágenes satelitales que cubren amplias extensiones y abarcan más allá del dominio visible del espectro electromagnético. Sin embargo, en los estudios de suelos existen dos inconvenientes a considerar al utilizar este tipo de información: (1) los sensores registran aquella parte de la radiación solar que es reflejada por la superficie terrestre y es transmitida a través de la atmósfera; así, la información debe ser interpretada en términos de las propiedades particulares de los objetos, y (2) el suelo se encuentra, en general, cubierto por diversos tipos de vegetación; para su estudio debe recurrirse a indicadores indirectos, como la geomorfología, la variación de la vegetación y el uso del suelo, es decir, al análisis del paisaje (Bonn y Escadafal, 1996). En este sentido, el tipo de ecosistema es de suma importancia. Por ejemplo, en ambientes húmedos con vegetación densa y perenne se acentúa el efecto de la radiación reflejada y emitida por la vegetación clorofílica. De acuerdo con lo anterior, regiones de clima seco, con vegetación caducifolia y color de suelo relativamente homogéneo son excelentes candidatas para evaluar fenómenos superficiales del suelo, como la erosión, para lo cual se apoya en los datos numéricos de las imágenes. Esto debido a que la

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Apdo. Postal 128, 23000 La Paz, Baja California Sur, México.

[‡] Autor responsable (ymaya@cibnor.mx)

² CRENAM-Université Jean Monnet. 6, rue Basse des Rives, 42023 Saint-Etienne Cedex2, France.

³ Université Paris 6. Laboratoire de Biologie Végétale Tropicale. 12 Rue Cuvier, 75005 Paris, France.

pérdida del follaje permite considerar que gran parte de la información registrada correspondería al suelo, además de que se elimina la señal de la vegetación clorofílica.

En el presente trabajo, se evalúa la utilidad de tres índices (combinaciones de bandas satelitales) para detectar áreas potencialmente erosionadas en una selva baja caducifolia establecida en un macizo montañoso de geología homogénea. Los índices se aplicaron sobre sub-escenas captadas en dos fechas que cubren un área en la que en la actualidad existen problemas de erosión. Cabe subrayar que este estudio se desarrolló dentro de la selva baja caducifolia y no se contempla que los resultados sean válidos para las zonas aledañas en las que son dominantes los bosques de encino y de encino-pino.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se encuentra en la Sierra de la Laguna, en el extremo sur de la Península de Baja California (Figura 1A). Tiene una extensión aproximada de 2400 km², cumbres escarpadas y alcanza una altitud de 2090 m. En su geología predominan granitos y sienitas.

Por su extensión y difícil acceso, el uso de imágenes de satélite resulta una excelente opción en el estudio de zonas erosionadas y en riesgo de erosión. La prospección general e interpretación de fotografías aéreas (junio-julio, temporada seca) en escala 1:75 000 (INEGI, 1993), permitió delimitar varias unidades, la mayoría dentro de la selva baja caducifolia, la cual forma un cinturón en las laderas serranas entre 300 y 750 m de altitud. La información se relacionó con los resultados reales del terreno, a partir de la aplicación de los diferentes índices en las sub-imágenes.

El área de estudio tiene una extensión de 140 km² y se localiza al norte del macizo montañoso (Figura 1A). La fotointerpretación permitió delimitar varias zonas desprovistas de vegetación (Figura 1B); la verificación de campo confirmó que algunas presentaban ya problemas de erosión, donde era dominante la hídrica laminar. De acuerdo con la información de campo, 90% de la superficie de ciertas unidades identificadas durante la fotointerpretación estaba representado por suelo desnudo con diversos grados de erosión (Figura 1C); el 10% restante de la superficie estaba representado por elementos arbóreos

dispersos. Con base en los perfiles descritos de áreas no erosionadas, la erosión hídrica laminar habría logrado eliminar hasta 20 cm de la capa superficial del suelo, exponiendo en ocasiones la roca subyacente. Los suelos en el área de estudio son en su mayor parte jóvenes y poco profundos; las texturas son gruesas y la morfología es con poca agregación de partículas. Los colores del suelo son predominantemente claros. La Figura 1D muestra la distribución de las geoformas y los colores más representativos del suelo con base en información de campo.

La curva de precipitación es bimodal, en verano e invierno. Entre julio y septiembre ocurre más de 70% del volumen total anual, en general como lluvias torrenciales y fuertes vientos, debido a la influencia de huracanes en el Pacífico. El registro de 10 años en la estación meteorológica más cercana, (aproximadamente a 15 km del área de estudio) muestra que la temperatura promedio anual es de 23 °C y la precipitación total anual es de 460 mm.

La vegetación es muy abierta, en parches de selva baja caducifolia, pastizales y suelo desnudo. En algunas cañadas se encuentran pequeñas poblaciones de encinos. La práctica de actividades económicas, como la ganadería y la minería, ha eliminado la cubierta vegetal, debido a la apertura de caminos y la extracción de madera con fines de construcción, causando la pérdida de la capa edáfica. En algunos sitios de extrema erosión, el material geológico se encuentra descubierto.

Cálculo de Índices a Partir de los Datos Numéricos de las Imágenes

Se extrajeron sub-escenas de 350 000 píxels de imágenes SPOT multibanda 564-303 de dos fechas (febrero 15 de 1987 y octubre 19 de 1992). Se hicieron correcciones geométricas, para lo cual se utilizó una función cuadrática con base en 20 puntos de referencia. Una vez modificadas, se calcularon tres índices: el Índice de Brillo (IB), el cuadrado del Índice de Vegetación Relativo o "fractional vegetation cover" (NDVI relativo) y el cálculo del porcentaje de vegetación a partir de la Recta de Suelo (PVI).

El IB se utiliza frecuentemente en la identificación de tipos de suelos con fines cartográficos y para evaluar su grado de degradación. Este índice destaca la variabilidad en la claridad del color entre suelos de una región determinada, que afecta directamente la reflectividad registrada (Bonn y Escadafal, 1996). Los

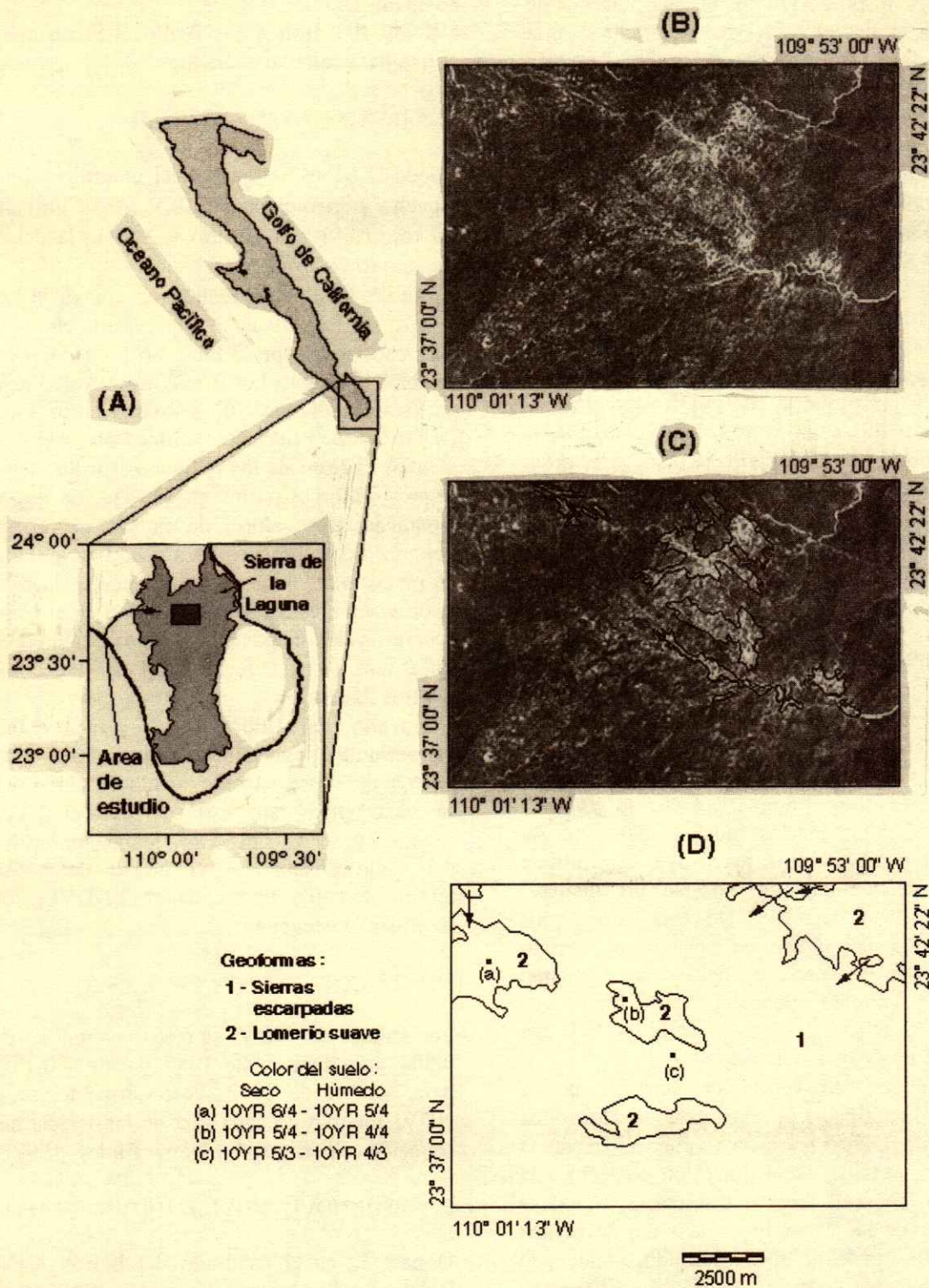


Figura 1. (A) Ubicación del área de estudio; (B) área de estudio, sub-escena SPOT XS1. Las áreas más claras corresponden a las zonas desprovistas de vegetación; (C) unidades cartográficas erosionadas, verificadas en campo; (D) mapa de distribución de geomorfos y colores del horizonte superficial del suelo.

otros dos índices (NDVI relativo y PVI) analizan la vegetación y los posibles cambios en sus patrones de distribución, los cuales son claves en el estudio y en la determinación de las condiciones del suelo, debido a que éste se encuentra en general cubierto por algún tipo de vegetación.

El NDVI relativo y el PVI se basan en la interacción particular que la vegetación clorofílica tiene en los dominios del visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético (Tucker y Miller 1977; Bariou *et al.*, 1985). La energía requerida para realizar la fotosíntesis se encuentra en su mayoría en las regiones del rojo y el azul del área visible; la vegetación verde absorbe grandes cantidades de energía en esta área, que da por resultado una baja reflectividad, en tanto que la energía de la región del infrarrojo no se utiliza en la fotosíntesis, lo que se traduce en valores altos de reflectividad. Este gran contraste entre la reflectividad de ambos dominios del espectro se utiliza para calcular diversos índices de vegetación, que caracterizan cuantitativamente la distribución de la vegetación y la condición en la que se encuentra.

Los índices de vegetación pueden clasificarse en "índices de vegetación basados en la pendiente" y en "índices de vegetación basados en la distancia a una recta" (Jackson y Huete, 1991). Los dos tipos de índices analizan la distribución de los valores de reflectividad de los pixels en una gráfica bidimensional, siendo uno de los ejes el rojo y el otro el infrarrojo cercano. En los índices de vegetación basados en la pendiente, los pixels que se agrupan sobre una línea que parte del origen presentan el mismo índice de vegetación. De esta forma, los diferentes niveles del índice de vegetación estarían representados por una serie de líneas con el mismo origen, pero diferente pendiente. El Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), así como el NDVI relativo, son de este tipo.

En los índices de vegetación basados en la distancia, la cantidad de vegetación clorofílica presente en un pixel se estima por la distancia perpendicular que tiene dicho pixel con respecto a la "Recta de Suelo" (*soil line*). La Recta de Suelo se define a partir de la regresión de la nube de puntos que forman los pixels de suelo desnudo, incluyendo las variaciones en color y humedad. El mayor problema es encontrar la Recta de Suelo que realmente represente todas las variaciones del suelo desnudo de la región que cubre la imagen, lo que

significa que no hay una recta única (Thiam e Eastman, 1992).

Cálculo del Índice de Brillo. La ecuación que se utilizó para calcular el IB fue:

$$IB = [(XS1^2 + XS2^2 + XS3^2) / 3]^{1/2} \quad (1)$$

Donde: XS1 es la Banda del amarillo-naranja en el espectro electromagnético (0.5 a 0.59 μm), XS2 es la del rojo (0.61 a 0.68 μm) y XS3 es la del infrarrojo cercano (0.79 a 0.89 μm).

Sobre las imágenes obtenidas al aplicar la Ecuación 1 se hizo una clasificación supervisada en cuatro clases para cada fecha (brillo bajo, brillo medio, brillo alto y sombra) mediante las firmas espectrales generadas a partir de polígonos de entrenamiento. Para ambas fechas, los de brillo alto se ubicaron en el fondo de un arroyo. El resto de los polígonos (brillo medio, bajo y sombra) cubrían partes altas y laderas de lomeríos y montañas. Los valores de cada clase, el número de polígonos considerados para cada una, el número total de pixels contenidos en los polígonos, la frecuencia y la desviación estándar se presentan en el Cuadro 1. Se generaron dos mapas de la clasificación en color para cada una de las fechas que se muestran en las Figuras 2a y b.

Cuadrado del Índice de Vegetación Relativo o "Fractional Vegetation Cover". La estimación del porcentaje de vegetación mediante el NDVI relativo se basa en el supuesto de que el NDVI de la vegetación se distribuye gradualmente entre el NDVI del suelo desnudo y el NDVI de la vegetación totalmente verde. Para calcular el NDVI de cada fecha se utilizó la ecuación:

$$NDVI = (XS3 - XS2) / (XS3 + XS2) \quad (2)$$

Los valores del NDVI se distribuyeron entre -0.276 y 0.604 para febrero de 1987 y entre -0.192 y 0.610 para octubre de 1992. Posteriormente, se calculó el NDVI relativo de cada una de las fechas mediante la ecuación (a partir de Carlson y Ripley, 1997):

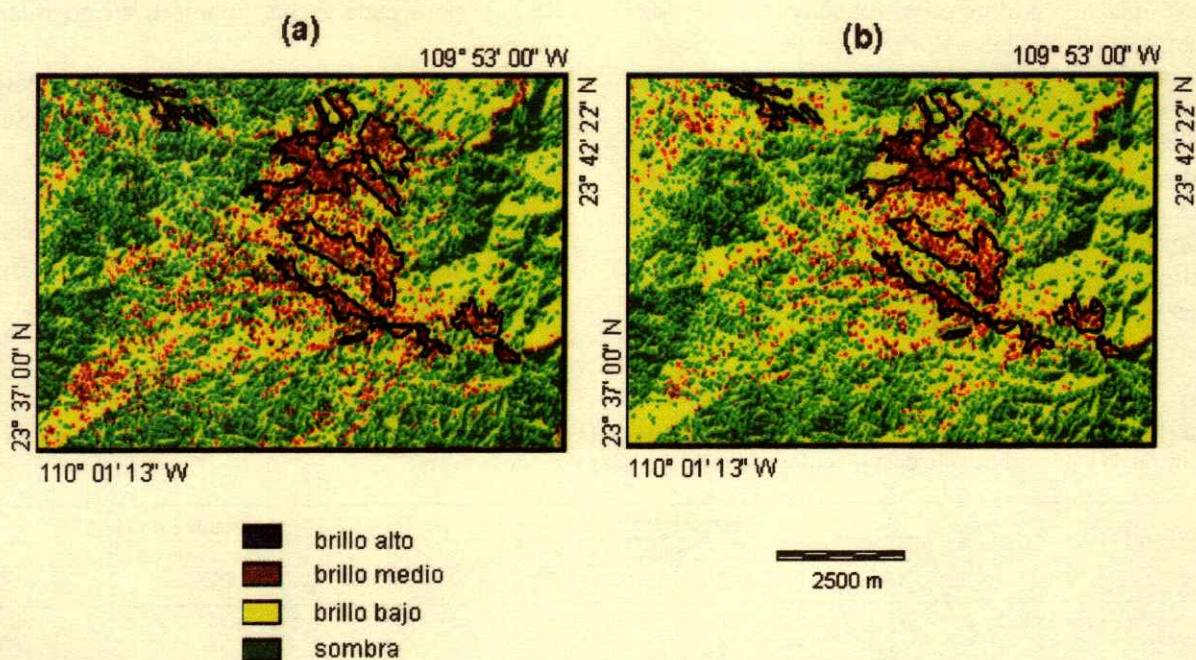
$$F_g = 100 * ((NDVI - NDVI_{sd}) / (NDVI_{vv} - NDVI_{sd}))^2 \quad (3)$$

Donde: F_g es el cuadrado del Índice de Vegetación Relativo o "Fractional Vegetation Cover", $NDVI_{sd}$ es el NDVI del suelo desnudo y $NDVI_{vv}$ es el NDVI del pixel con la mayor cobertura de vegetación verde en el área (vv = vegetación verde).

Cuadro 1. Valores correspondientes a cada intervalo de clase del Índice de Brillo, obtenidos a partir de polígonos de entrenamiento, número total de pixels contenidos en ellos, frecuencia y desviación estándar.

Clase	Febrero de 1987						Octubre de 1992					
	Min	Max	No. Polig	No. pixels	s.d.	Frec.	Min	Max	No. Polig	No. pixels	s.d.	Frec.
Brillo alto	226	251	1	20	6.37	82	220	255	1	23	8.88	73
Brillo bajo	51	77	2	164	6.26	219899	45	90	2	790	8.11	241425
Brillo medio	107	196	3	48	21.34	26089	94	202	2	179	22.00	19524
Sombra	6	36	2	290	5.32	103930	0	40	3	371	6.57	88978

s.d. = desviación estándar; Frec. = frecuencia.

**Figura 2. Imagen del Índice de Brillo: (a) febrero de 1987; (b) octubre de 1992.**

Para determinar los valores discretos de $NDVI_{sd}$ y $NDVI_{vv}$ en cada una de las fechas se ajustó el histograma de la imagen entre cero y 100. Sobre la imagen en tonos de gris se aplicaron colores aumentando progresivamente en uno, a partir de cero, hasta lograr la coloración de los pixels de sitios previamente identificados en el campo como representativos del suelo desnudo y de la vegetación verde. El valor del NDVI correspondiente se determinó por comparación directa con el histograma que representaba los valores reales, dividido en 100 clases. Los valores identificados de NDVI del

suelo desnudo (28 pixels) y de la vegetación verde (22 pixels) fueron respectivamente -0.07 y 0.45 para febrero de 1987 y 0.00 y 0.50 para octubre de 1992. Se asume que todos los valores del intervalo $NDVI_{min} - NDVI_{sd}$ representan pixels con suelo desnudo; en el intervalo $NDVI_{vv} - NDVI_{máx}$, los valores corresponden a pixels con vegetación verde. Se substituyeron los valores de $NDVI_{sd}$ y de $NDVI_{vv}$ en la Ecuación 3 que, posteriormente, se aplicó a las sub-escenas de ambas fechas. Los histogramas de las imágenes resultantes se ajustaron con límites de cero a 100 y se dividieron en 10 clases, con el fin de analizar

el comportamiento de la frecuencia de pixels en cada fecha.

Cálculo del Porcentaje de Vegetación a Partir de la Recta de Suelo. El cálculo del PVI se basa en que la reflectividad del suelo disminuye progresivamente a medida que aumenta la cobertura vegetal, de tal manera que los valores correspondientes a la vegetación clorofílica más densa son los que se encuentran más alejados de la Recta de Suelo. Para definir ésta se determinaron los pixels relacionados con diversos tipos de suelo desnudo. Para ello, se localizaron en las imágenes las unidades que ya se habían delimitado durante la fotointerpretación y se corroboró que los valores de reflectividad de los pixels se ubicaran en los valores altos de las bandas amarillo-naranja y rojo en la temporada seca, con la posterior verificación en campo. Se crearon las firmas espectrales de los diversos suelos desnudos con la ayuda de polígonos de entrenamiento localizados en imágenes falso-color de ambas fechas (Cuadro 2). Posteriormente, sobre las gráficas bidimensionales en las cuales la variable independiente (eje X) era la banda del rojo (XS2) y la variable dependiente (eje Y)

la del infrarrojo cercano (XS3) y, con base en el promedio de las firmas espectrales, se definió la Recta de Suelo y se calcularon sus coeficientes a (valor de la ordenada del punto de intersección) y b (pendiente) para cada fecha.

Para determinar los valores de la vegetación más densa, se ubicaron las unidades delimitadas durante la fotointerpretación sobre las imágenes falso-color de ambas fechas. Se crearon las firmas espectrales con ayuda de polígonos de entrenamiento, en los que se identificó el pixel con el valor más alto de reflectividad en la banda del infrarrojo cercano. Los valores de este pixel, que corresponden a XS2_{VV} y XS3_{VV} para cada fecha, aparecen en negrillas en el Cuadro 2.

La ecuación que se utilizó para calcular el Porcentaje de Vegetación a Partir de la Recta de Suelo se presenta a continuación (Price, 1993; Lacaze, 1996). Cabe señalar que el F_g de esta ecuación no es el mismo F_g de la Ecuación 3; se han utilizado los mismos símbolos porque así los autores los asignaron originalmente:

Cuadro 2. Valores de las firmas espectrales de cuatro tipos de suelo desnudo y de la vegetación verde, que se utilizaron para obtener la Recta de Suelo y para el cálculo del porcentaje de vegetación a partir de la misma.

Tipo de suelo [†]		Febrero de 1987			Octubre de 1992		
		Banda			Banda		
		XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3
Suelo 1 (n = 39)	Min	93	100	90	62	65	65
	Max	120	133	117	81	91	81
	Prom	111	119	104	72.4	79.8	73.6
	s.d.	7.75	9.43	8.44	6.08	7.64	5.50
Suelo 2 (n = 34)	Min	42	40	57	30	28	47
	Max	57	60	75	42	43	62
	Prom	47.6	47.8	63.9	34.3	33.5	54.7
	s.d.	4.10	5.10	5.19	2.83	3.51	3.62
Suelo 3 (n = 9)	Min	62	66	68	46	51	53
	Max	68	73	75	50	58	58
	Prom	65.3	70.6	72.6	48.4	54.1	55.7
	s.d.	2.00	2.60	2.50	1.24	2.15	1.79
Suelo 4 (n = 18)	Min	68	76	77	49	51	58
	Max	90	92	90	64	72	74
	Prom	78.1	84.9	83.7	54.9	61.5	67.0
	s.d.	6.03	5.62	3.71	5.19	6.92	4.35
Veg. verde (n = 212)	Min	25	15	39	21	14	45
	Max	39	34	72	28	22	57
	Prom	28.25	20.75	54.40	22.80	15.60	49.70
	s.d.	2.89	3.86	5.18	1.01	1.21	2.46

[†]Suelo 1 - arena de cuarzo; Suelo 2 - suelo amarillo; Suelo 3 - suelo amarillo con gravilla; Suelo 4 - suelo rosa con gravilla; n = número de pixels. s.d. = desviación estándar.

$$F_g = 100 * (XS3 - aXS2 - b / XS3_{vv} - a XS2_{vv} - b) \quad (4)$$

Donde: F_g es el porcentaje de vegetación, a es la ordenada del punto de intersección de la Recta de Suelo, b es la pendiente de la Recta de Suelo, $XS2_{vv}$ es el valor en el rojo del pixel con vegetación más densa ($vv =$ vegetación verde) y $XS3_{vv}$ es el valor del mismo pixel en el infrarrojo cercano.

La Ecuación 4 se aplicó sobre las imágenes de cada fecha. Al igual que para el NDVI relativo, los histogramas de las imágenes resultantes se ajustaron con límites entre cero y 100 y se dividieron en 10 clases, con el fin de analizar el comportamiento de la frecuencia de pixels. Se calcularon los coeficientes a y b de la Recta de Suelo ($a = 0.8598$ y $b = 1.6840$ para febrero de 1987; $a = 0.7941$ y $b = 9.472$ para octubre de 1992) y se obtuvieron los valores en el rojo e infrarrojo cercano de la vegetación verde para cada fecha ($XS2_{vv} = 15$ y $XS3_{vv} = 72$ para febrero de 1987; $XS2_{vv} = 14$ y $XS3_{vv} = 57$ para octubre de 1992).

Con las frecuencias, expresadas en número de pixels, calculadas tanto por el NDVI relativo como por el PVI en ambas fechas, se elaboró la Figura 3. Las eventuales diferencias entre los resultados de índices y fechas se analizaron mediante el método de Elliot y Décamps (1973), que se utiliza en la comparación de distribuciones de frecuencia de dos poblaciones en muestras grandes con distribuciones aleatorias, regulares o contagiosas. Este método se basa en la igualdad:

$d =$ diferencia entre la media de las muestras/error tipo de la diferencia

El valor " d " puede ser negativo o positivo; la diferencia entre medias es significativa a $P = 0.05$ cuando $d > 1.96$; a $P = 0.01$ cuando $d > 2.58$ y a $P = 0.001$ cuando $d > 3.29$.

Para comparar los resultados entre los dos índices en la misma fecha, se aplicó una prueba de χ^2 , considerando como "frecuencias observadas" las que se definieron tras la aplicación del PVI y como "frecuencias esperadas" las que se obtuvieron a partir de la aplicación del NDVI relativo (Cuadro 3).

Análisis de la Erosión

Clasificación de la cobertura vegetal. Los valores estimados del porcentaje de cobertura vegetal

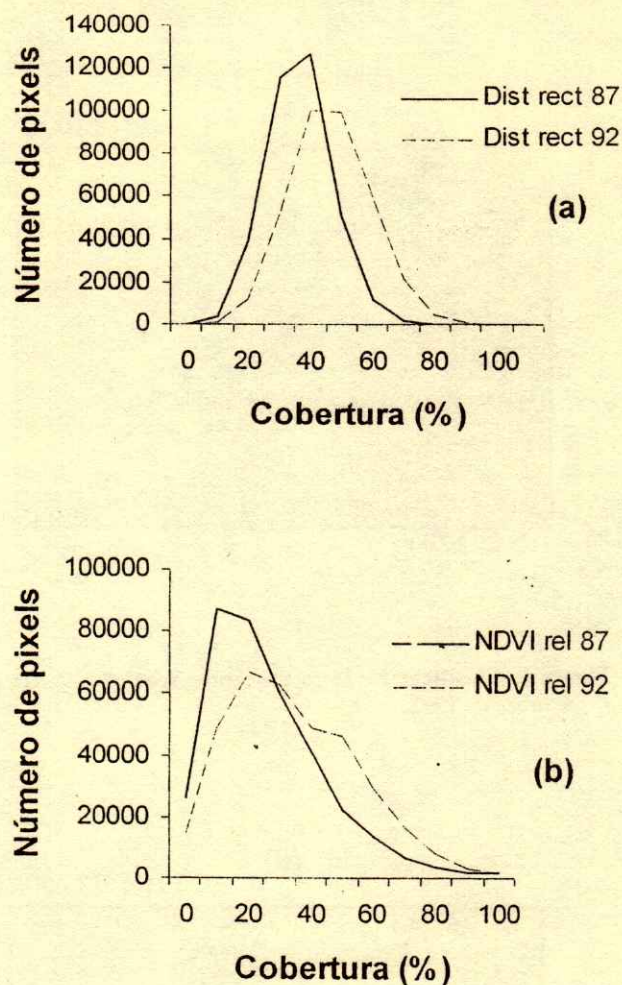


Figura 3. Distribución de frecuencias de pixels para clases de cobertura estimadas por (a) el Índice de Vegetación Relativo y (b) el índice de la Distancia a la Recta del Suelo.

mediante el NDVI relativo y el PVI se reclasificaron, a fin de relacionar esta información con la de sitios que ya presentaban problemas de erosión. El criterio para establecer los límites de las clases se fundamentó principalmente en la información recopilada en el campo, que permitió reconocer las zonas erosionadas con una cobertura vegetal inferior a 30%; por otra

Cuadro 3. Resultados de las pruebas estadísticas efectuadas sobre las distribuciones de frecuencia de pixels resultantes al aplicar el NDVI relativo (NDVI rel) y el porcentaje de vegetación a partir de la Recta de Suelo (PVI).

PVI 87 vs. PVI 92	$d = 355.38$		
NDVI rel 87 vs. NDVI rel 92	$d = 179.64$		
PVI 87 vs. NDVI rel 87	$\chi^2 = 4862323.0$	$P < 0.0000$	
PVI 92 vs. NDVI rel 92	$\chi^2 = 1250910.0$	$P < 0.0000$	

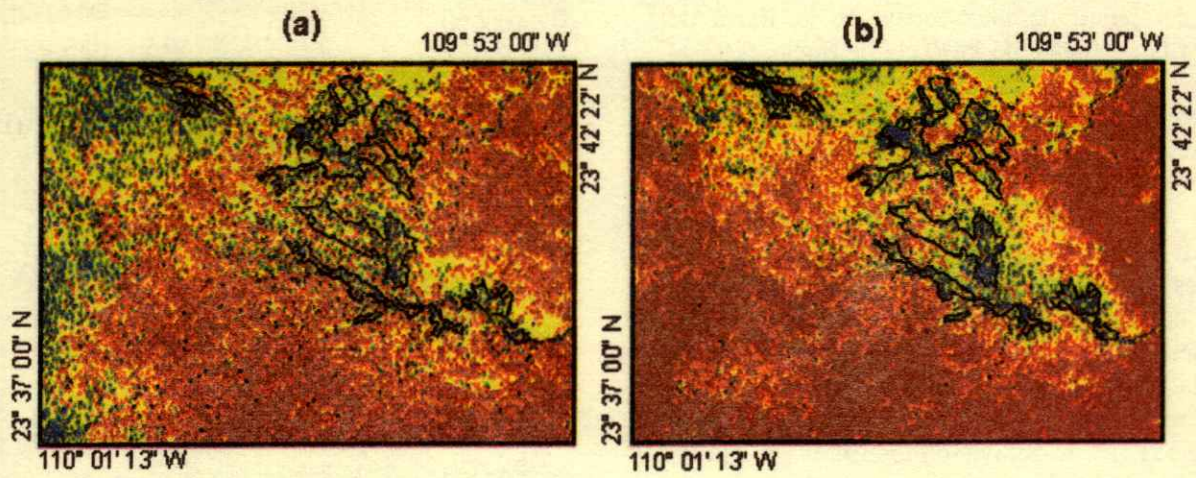


Figura 4. Clasificación de la cobertura vegetal a partir del Índice de Vegetación Relativo: (a) febrero de 1987; (b) octubre de 1992.

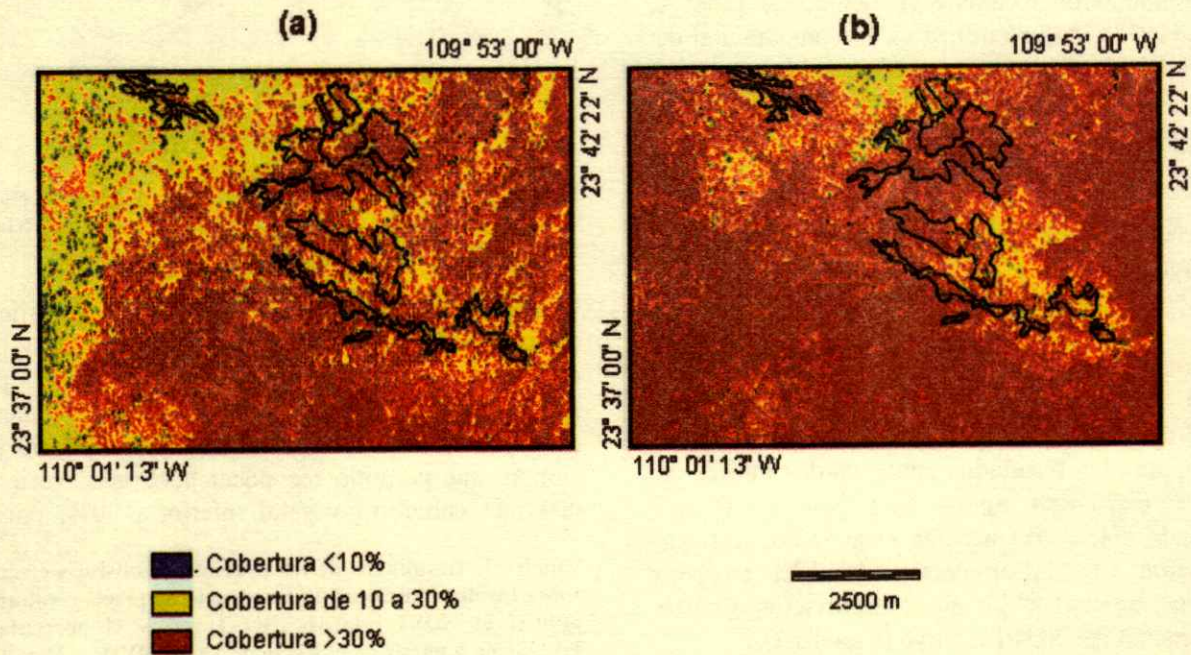


Figura 5. Clasificación de la cobertura vegetal a partir de la Distancia a la Recta de Suelo: (a) febrero de 1987; (b) octubre de 1992.

parte, Girard y Girard (1989) establecieron que la vegetación clorofílica puede detectarse en las imágenes de satélite cuando ésta cubre por lo menos 30% de la superficie del pixel (clase > 30%). El cálculo de la cobertura vegetal por el NDVI relativo y por el PVI permiten establecer clases por debajo del 30% de cobertura. Tomando ventaja de este hecho y con base en la información recopilada en el campo, se establecieron las clases:

- 1) Superficie con menos de 10% de cobertura vegetal, con afloramientos rocosos o pedregosidad superficial y sin mantillo. Zonas erosionadas.
- 2) Superficie con 10 a 30% de cobertura vegetal, con posibilidad de afloramientos rocosos y con hojarasca. Zonas potencialmente erosionadas.
- 3) Superficie con más de 30% de cobertura vegetal. Zonas estables.

Con los resultados de la clasificación se elaboraron cuatro mapas, dos para febrero de 1987 y dos para octubre de 1992 (Figuras 4a y b; 5a y b).

Análisis bitemporal del fenómeno. La cobertura de la vegetación clorofílica está directamente relacionada con la humedad; las áreas donde la cobertura ha disminuido entre la temporada seca (febrero) y la temporada húmeda (octubre) señalan riesgo potencial de erosión. Para enfatizar este fenómeno, se correlacionaron los datos del mapa de febrero de 1987 con el de octubre de 1992, obtenidos con el NDVI relativo (Cuadro 4a) y con el PVI (Cuadro 4b). Con los resultados anteriores, se definieron nueve clases con sus respectivos mapas a color (Figuras 6a y b). En estas figuras se puede apreciar que las Clases I, V y IX (en gris) corresponden a los pixels cuyas coberturas no cambiaron. Las Clases IV, VII y VIII, en colores oscuros (verde, azul y violeta, respectivamente) contienen los pixels que presentaron un aumento de cobertura, como era lo esperado. En cambio, las Clases II, III y VI, en colores brillantes (amarillo, rojo y naranja, respectivamente) representan los pixels cuya cobertura disminuyó y

Cuadro 4. Matrices de correlación de las tres clases de cobertura vegetal estimadas por (a) NDVI relativo y (b) PVI. Las cifras en negrillas representan la frecuencia de pixels; por debajo se encuentra la proporción que esta frecuencia representa con respecto al total de los pixels de la sub-escena. Los números romanos en itálicas representan la clasificación cartográfica de la Figura 6.

(a)

Fecha	% de cobertura	Febrero de 1987			Total
		< 10%	10 a 30%	> 30%	
Octubre de 1992	< 10%	9939	7488	671	18098
		0.0284	0.0214	0.0019	0.0517
	10 a 30%	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	
		14795	86628	20140	121563
		0.0423	0.2475	0.0575	0.3473
		<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	
> 30%	8643	75435	126261	210339	
	0.0247	0.2155	0.3607	0.6010	
	<i>VII</i>	<i>VIII</i>	<i>IX</i>		
Total	33377	169551	147072	350000	
		0.0954	0.4844	0.4202	1.0000

(b)

Fecha	% de cobertura	Febrero de 1987			Total
		< 10%	10 a 30%	> 30%	
Octubre de 1992	< 10%	380	1202	154	1736
		0.0011	0.0034	0.0004	0.0050
	10 a 30%	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	
		2354	57791	13316	73461
		0.0067	0.1651	0.0380	0.2099
		<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	
> 30%	2544	108779	163480	274803	
	0.0073	0.3108	0.4671	0.7852	
	<i>VII</i>	<i>VIII</i>	<i>IX</i>		
Total	5278	167772	176950	350000	
		0.0151	0.4793	0.5056	1.0000

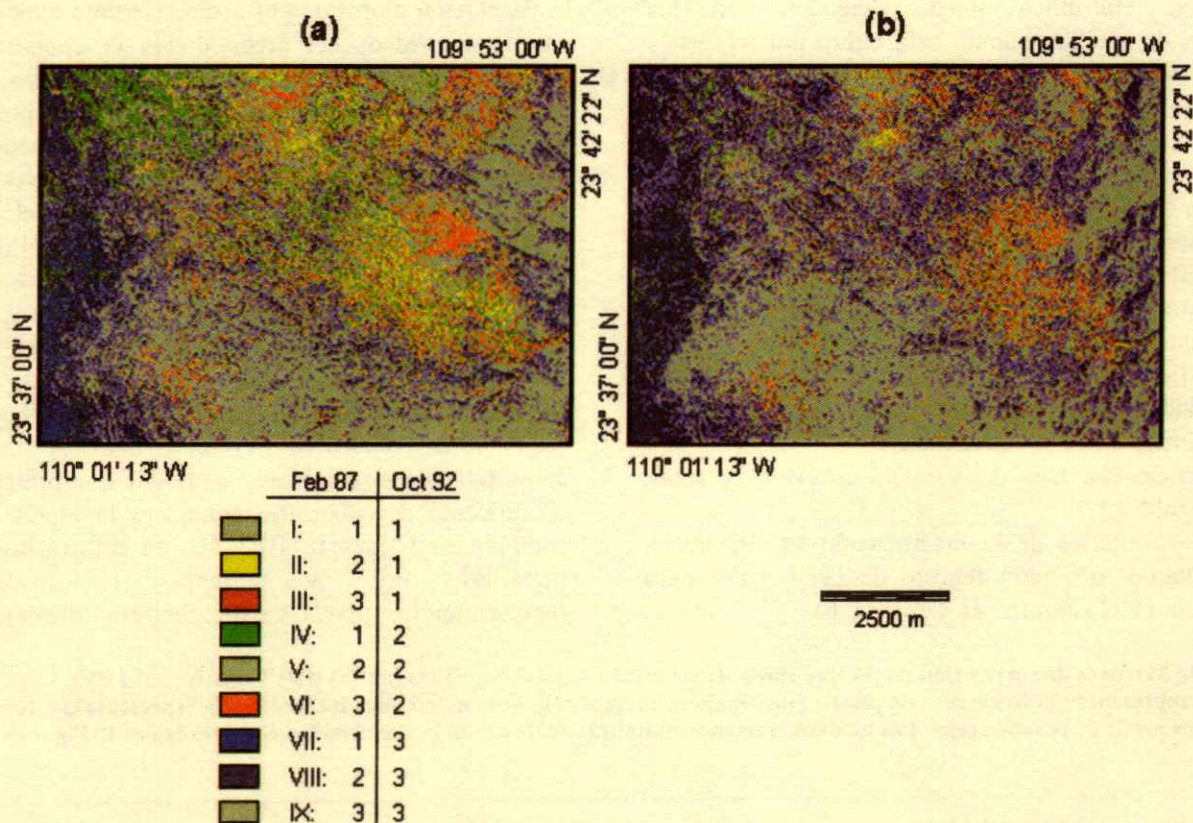


Figura 6. Evaluación de la cobertura vegetal (de acuerdo con la clasificación del Cuadro 4): (a) mediante el Índice de Vegetación Relativo; (b) mediante la Distancia a la Recta de Suelo.

que son los interesantes para el estudio de la erosión: la Clase II (en amarillo) indica las áreas que pasaron de “potencialmente erosionadas” a “erosionadas”; la Clase III (en rojo), las que pasaron de “estables” a “erosionadas”, y la Clase VI (en anaranjado) las que pasaron de “estables” a “potencialmente erosionadas” en el transcurso de los cinco años considerados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índices Calculados

Índice de Brillo. Aunque los resultados numéricos no señalan una diferencia importante en la frecuencia del número de pixels de las clases definidas como de brillo alto y medio entre las dos fechas (Cuadro 1), en los mapas en color (Figuras 2a y b) se distinguen las áreas que, de acuerdo con la información recopilada en campo, se encuentran ya erosionadas.

Como ya se había mencionado, una desventaja en el uso de este índice es que en un área determinada

podría presentarse una variada gama de colores y, dado que los suelos claros tienen valores de IB más altos que los oscuros, los primeros no necesariamente estarían indicando suelos desnudos. Sin embargo, en la región de estudio, los suelos en general tienen colores claros por el material geológico del que se derivan, además de sostener una vegetación muy abierta y de tipo caducifolio. Podría entonces suponerse que los valores altos del IB estuvieran indicando suelos desnudos.

Por otra parte, la humedad oscurece el color de los suelos (Girard y Girard 1989) y fomenta el crecimiento de hierbas anuales; ambos factores disminuyen los valores del IB. Por esta razón, el mapa de IB elaborado con la imagen tomada en temporada seca (febrero de 1987) es el más fiable.

NDVI relativo y PVI. Para ambos índices, la distribución de pixels de las imágenes de 1992 (temporada húmeda) confirma un aumento en el porcentaje de cobertura de la vegetación clorofílica, en relación con las imágenes de 1987 (temporada

seca) (Figura 3). Los resultados de las pruebas estadísticas demostraron que tal aumento es significativo. Por otra parte, al comparar los dos índices se observa una diferencia en la distribución de frecuencias entre ambos, la cual resultó ser también significativa, sobre todo en coberturas menores que 50% (Cuadro 3).

De acuerdo con estos resultados, el cálculo del porcentaje de cobertura de la vegetación por medio del NDVI relativo parece ser más sensible al aumento de la superficie de suelo desnudo en un periodo determinado que el del PVI. Su sensibilidad podría ser suficientemente adecuada para localizar un área desnuda con erosión tan fuerte que ni siquiera permitiera el desarrollo del estrato herbáceo cuando el resto de la vegetación clorofílica estuviera al máximo por la humedad.

Cada índice analiza la información en forma particular; la diferencia en la sensibilidad de ambos podría explicarse por la dificultad de elegir la Recta de Suelo que represente realmente todas las condiciones de los suelos desnudos en el área. Tal afirmación se basa en los resultados de las clases de cobertura más baja para ambos índices, a pesar de que se conocía de antemano el área de estudio y se localizaron con precisión los sitios en los que se presentan diferentes condiciones de suelo desnudo. Ambos índices tienen la desventaja de que se basan en información sobre el terreno, tanto en la localización de sitios representativos necesarios para elaborar las firmas espectrales, como en la validación de los resultados obtenidos. La confiabilidad de los dos índices es además relativa, debido a la forma en la que se determinan tanto los valores del NDVI para el suelo desnudo y la vegetación verde, como los de la Recta de Suelo.

Análisis de la erosión. El cálculo de los porcentajes de cobertura por los dos índices muestra un aumento general en la imagen de octubre directamente relacionado con la humedad, lo que confirma la estimación correcta de los porcentajes. Cabe subrayar que en el sitio de estudio el aspecto de la vegetación clorofílica sufre un cambio dramático entre la temporada húmeda y la seca, por tratarse de la selva baja caducifolia que se ha establecido en las condiciones climáticas más extremas (Arriaga y Ortega, 1988). Los resultados de la correlación se muestran en las Figuras 6a y b, y en el Cuadro 4. En las figuras, los colores brillantes representan las áreas en las que la cobertura estimada disminuyó durante el periodo de cinco años que transcurrió entre la toma de

las dos imágenes. Puede observarse que la superficie de estas áreas es mayor en la imagen del NDVI relativo que en la del PVI.

Los índices aplicados parecen ser complementarios para el estudio de la erosión: los dos señalan un aumento en la superficie de suelo desnudo, aunque de diferentes dimensiones. Al compararlos con observaciones de campo, el NDVI relativo parece sobre-estimar el incremento en la superficie de suelo desnudo, en tanto que el PVI parecería subestimarlos. Esto se debe a la información de la que parten y que puede observarse en las Figuras 4 y 5, en las cuales es evidente la gran diferencia que existe entre ambos resultados, sobre todo al sobreponer las unidades verificadas en campo.

CONCLUSIONES

- Las verificaciones de campo permiten afirmar que con el Índice de Brillo se pueden elaborar mapas confiables de áreas potencialmente erosionadas en condiciones de suelos claros y vegetación caducifolia, condiciones que son típicas de ambientes áridos y semiáridos, en especial a partir de información captada durante la temporada seca. Esto resulta de suma utilidad cuando las características del paisaje dificultan o imposibilitan la verificación *in situ*.

- En cuanto a la aplicación del Índice de Vegetación Relativo o "fractional vegetation cover" (NDVI relativo) y del Porcentaje de Vegetación a Partir de la Recta de Suelo (PVI), los datos de campo se aproximan más a los resultados obtenidos por el primero. No obstante, debe tenerse prudencia al respecto. Los resultados de los cálculos por el PVI servirían para confirmar los resultados del NDVI relativo y siempre será necesario comprobar que éstos sean coherentes con la información de campo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco del programa franco-mexicano ECOS-ANUIES No. M94B02. Parte del apoyo financiero provino del proyecto CONACYT 1471P-N9507. La imagen SPOT multibanda 564-303 del 15 de febrero de 1987 se adquirió gracias a un bono ISIS, otorgado en junio de 1991 al Laboratoire de Biologie Végétale Tropicale de la UPMC - Paris 6. La del 19 de octubre de 1992 se adquirió en el marco del Programa ECOS-México, gracias a una promoción comercial de SPOT en 1996.

LITERATURA CITADA

- Arriaga, L. y A. Ortega. 1988. La Sierra de la Laguna de Baja California Sur. Publicación 1 del Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur. México.
- Bariou, R., D. Lecamus y F. Le Henaf. 1985. Réponse spectrale des végétaux. Dossiers de télédétection. Centre Régional de Télédétection. Rennes, France.
- Bonn, F. y R. Escadafal. 1996. Télédétection de la surface du sol. Cap. 3 pp. 92-135. *In*: F. Bonn (ed.). Précis de Télédétection, Vol. 2. Presses de l'Université du Québec/AUPELF. Québec, Canada.
- Carlson, T.N. y D.A. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing Environ.* 62: 241-252.
- Elliot, J.M. y H. Décamps. 1973. Guide pour l'analyse statistique des échantillons d'invertébrés benthiques. *Ann. Limnologie* 9(2): 79-120.
- Girard, M. y C. Girard. 1989. Télédétection appliquée: Zones tempérées et intertropicales. Masson. Paris, France.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1993. Cubrimiento fotográfico Escala 1: 75 000 de la Hoja Los Cabos, clave F12-2-3-5-6. Sistema de Información Nacional de Fotografía Aérea. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Jackson, R.D. y A.R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Vet. Medicine* 11: 185-200.
- Lacaze, B. 1996. Spectral characterisation of vegetation communities and practical approaches to vegetation cover changes monitoring. pp. 149-166. *In*: Hill, J. y D. Peter (eds.). The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the Mediterranean basin: State of the art and future research. EUR 16732. Office for official publications of the European Communities. Luxemburg.
- Price, J.C. 1993. Estimating leaf area index from satellite data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 43(6): 721-726.
- Thiam, A. y R. Eastman. 1992. Vegetation indices. Cap. 13. pp. 1-16. *In*: Eastman, J.R. (ed.). User's guide IDRISI Version 4.0. Clark University. Worcester, MA.
- Tucker, C.J. y L.D. Miller. 1977. Contribution of the soil spectra to grass canopy spectral reflectance. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing* 43(6): 721-726.

COMPORTAMIENTO DE LA COMPACTACIÓN Y HUMEDAD DEL SUELO EN FUNCIÓN DE LOS IMPLEMENTOS DE LABRANZA

Behavior of Soil Compaction and Soil Moisture under Different Tillage Systems

Enrique Martínez-Rubin de Celis^{1†}, Horacio Barron-Reyna¹, José Dimas López-Martínez²
y Ricardo David Valdez-Cepeda³

RESUMEN

En general, la acción de los implementos de labranza se evalúa considerando la producción de los cultivos utilizados como variable indicadora y no por el conocimiento científico del efecto propio del implemento sobre las propiedades del suelo. Este trabajo se realizó en suelos comprendidos dentro del grupo Xerosol háplico, durante los años de 1994 a 1997. Además, se estudió el efecto de algunos implementos de labranza sobre el comportamiento de la compactación y la humedad de un suelo sin cultivo establecido. El comportamiento presentado por estas variables fue cíclico y que los arados de discos y vertederas propiciaron mejores condiciones para la conservación de la humedad durante el ciclo pero, a su vez, generaron los niveles más bajos de compactación.

Palabras clave: Índice de cono, física de suelos.

SUMMARY

The action of tillage implements is generally evaluated considering the production of the crops used as indicative parameter and not by the scientific knowledge of the effect of the implements on soil properties. This work was carried out on soils belonging to the Haplic xerosol group, during the years 1994 to 1997. The effect of tillage implements on the behavior of soil compaction and moisture without crops was studied. It was found that the behavior indicated by these variables was cyclical and

that disk and moldboard plows propitiated better conditions for the conservation of soil moisture during the cycle, but they also generated the lowest levels of compaction.

Index words: Cono index, soil physics.

INTRODUCCIÓN

Poca importancia se da a la conservación del suelo como recurso no renovable, el cual es afectado por el uso inadecuado y, en general, excesivo de la maquinaria agrícola. Esto pone de manifiesto la necesidad de estudiar más a fondo el impacto que tiene el uso de la maquinaria agrícola sobre el suelo, y conocer su efecto en las causas que alteran la relación agua-suelo. Lo anterior es la base para desarrollar, proponer y evaluar metodologías que permitan elegir los sistemas de labranza adecuados para las diferentes condiciones agroecológicas y socioeconómicas de cada región o predio en particular para así controlar los efectos nocivos causados por labores inadecuadas o excesivas. Se parte de un conocimiento más profundo de los efectos de la labranza y de los factores que afectan a la misma. A este respecto, Alberts *et al.* (1989) señalaron que la labranza es quizás uno de los mayores procesos en la alteración de las propiedades del suelo. Los cambios en la densidad aparente y la compactación después de la labranza, son difíciles de predecir debido al limitado conocimiento de cómo un implemento interactúa con el suelo, influenciado por la velocidad y profundidad de la labranza y la cohesión.

La mecanización o acción de efectuar las labores agrícolas mediante el uso de máquinas está originando serios problemas en la estructura de los suelos, debido principalmente al uso inadecuado de los implementos de labranza (Larson y Osborne, 1982; FAO, 1992; Shafer *et al.*, 1992), y al manejo ineficiente del recurso suelo, por lo que la ASAE (1994) reportó que el desarrollo de muchas máquinas se ha realizado con

¹ Instituto Tecnológico Agropecuario de la Laguna. Apartado Postal 3-F, 27000 Torreón, Coahuila, México.

[†] Autor responsable (emarti@mixmail.com)

² Facultad de Agricultura y Zootecnia-UJED. Apartado Postal 142, 35000 Gómez Palacio, Durango, México.

³ Centro Regional Universitario Centro Norte-UACH. Apartado Postal 196, 98001 Zacatecas, Zacatecas, México.

poco o ningún conocimiento de los principios básicos de dinámica del suelo, usadas en algunos casos con posibles efectos destructivos sobre las raíces de las plantas, la relación suelo-agua, la aeración del suelo y la estructura del mismo.

En general, la acción de los implementos de labranza se evalúa considerando la producción de los cultivos utilizados como parámetro indicador y no por el conocimiento científico del efecto propio del implemento sobre las propiedades del suelo. Si se cuenta con información sistematizada permitiría conocer la influencia de cada implemento de labranza sobre la compactación, la captación, la retención y la conservación de la humedad en un suelo determinado para, de esta manera, propiciar el aprovechamiento del recurso agua, cuya disponibilidad es un factor limitativo en las regiones áridas y semi-áridas del mundo, entre las cuales se encuentra la Comarca Lagunera.

Esta área es una de las zonas más mecanizadas de México, con poco más de 300 000 ha dedicadas a la producción agrícola, de las cuales 248 715 se riegan por gravedad y las restantes corresponden a tierras temporales o de medio riego con condiciones termoplumiométricas bastante aleatorias para las actividades agrícolas.

Considerando lo anterior, el objetivo del trabajo fue determinar la influencia de los implementos de labranza en el comportamiento de la humedad y la compactación en suelo agrícola de la Comarca Lagunera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en la Comarca Lagunera, ubicada en la parte norte del estado de Coahuila y en la media oriental del estado de Durango, en suelos comprendidos dentro del grupo Xerosol háplico, los cuales se caracterizan por ser de color claro, con bajo contenido de materia orgánica y con tendencia a acumular sales de sodio. El suelo del área experimental es de textura migajón arcilloso, con densidad aparente de 1.32 g cm^{-3} y conductividad eléctrica de 1.12 dS m^{-1} .

El experimento se estableció de 1994 a 1997 y se estudió el efecto de los implementos de labranza sobre las propiedades físico-mecánicas del suelo, sin cultivo establecido. Se caracterizó el área en estudio, la cual quedó comprendida en una superficie de $10\,080 \text{ m}^2$, donde se delimitaron las unidades experimentales de

$10 \times 20 \text{ m}$ con espaciamiento de 2 m entre ellas y 5 m entre repeticiones.

El análisis de varianza se sujetó al modelo de bloques al azar con seis tratamientos, los cuales consistieron en la preparación del suelo con arados de cinceles, discos, subsolador y vertedera, rastra de discos y labranza cero con tres repeticiones y submuestras en las unidades experimentales.

Las profundidades promedio de trabajo fueron hasta 30 cm con los arados de discos y vertedera y a 45 cm con el arado subsolador, con el arado de cinceles se trabajó a una profundidad de 17 cm y con la rastra de discos a 17 cm. Se utilizaron tractores de 80 a 100 HP. Los arados de discos y vertedera fueron integral reversible de tres cuerpos, el arado subsolador de dos timones, el de cinceles de siete cuerpos y la rastra integral de 20 discos.

En cada ciclo primavera-verano (P-V) y otoño-invierno (O-I), las variables en estudio se determinaron a cuatro niveles de profundidad cada 15 cm, donde la captación y distribución de la humedad se determinaron por gravimetría, la retención con olla y membrana de presión, y la compactación se determinó por índice de cono con un penetrómetro tipo agrícola, realizándose las mediciones cada 25 días.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Humedad (Hu)

Los resultados de los porcentajes de humedad registrados durante los ciclos O-I presentaron diferencia altamente significativa únicamente para muestreos en el tiempo y entre profundidades (Cuadro 1) y sin diferencia por efecto de la acción de los implementos al alterar la superficie del suelo.

Las profundidades de 15 a 30 cm ($\text{Hu} = 22.14\%$) y de 30 a 45 cm ($\text{Hu} = 21.86\%$) mantuvieron los promedios de humedad más altos en el ciclo, siendo estadísticamente iguales entre sí y mayores que los otros tratamientos, ya que la profundidad de 00 a 15 cm tuvo significativamente el menor porcentaje de humedad ($\text{Hu} = 17.32\%$).

En los ciclos P-V, cuando la temperatura de la región llegó a superar 40°C , se observó diferencia significativa para el comportamiento de la humedad por implemento (Cuadro 1), destacando los tratamientos de los arados de vertedera y discos, con porcentajes significativamente más altos (Cuadro 2),

Cuadro 1. Cuadrados medios de la humedad, índice de cono.

FV	GL	Otoño-Invierno		Primavera-Verano	
		Hu	IC	Hu	IC
Bloques	2	3.43	217456	170.80	3790400**
Tratamientos	5	39.19	2049241*	312.66*	1457395**
Error T	10	30.43	541705	62.72	232621
Muestras	3	1866.74**	6230837**	2549.54**	8517888**
Int. T x M	15	23.89	364448	32.45	2063560**
Error M	6	15.63	272692	40.47	720672
Profundidad	3	122.29**	20513270**	387.81**	12867968**
Int. T x P	15	7.94	338794**	21.43	786794**
Int. M x P	9	10.23	385354**	49.06**	3473977**
Int. T x M x P	45	4.47	85328	11.70	477260*
Error P	144	5.75	99338	14.60	298559
Total	287				
CV		16.37	24.49	18.99	38.60

* Diferencia significativa. **Diferencia altamente significativa.

presentándose diferencia altamente significativa por contrastes ortogonales entre los grupos de implementos de labranza de cobertura y los de roturación.

En general, para ambos ciclos, los tratamientos de los implementos de cobertura mantuvieron los mejores contenidos de humedad al propiciar en su acción de corte e inversión o mezcla de la capa de suelo adecuadas condiciones para la captación y la conservación de la humedad, tanto en función de la profundidad (Figura 1), como del tiempo (Figura 2).

Estos resultados no concuerdan con lo expuesto por Francis y Knight (1993), quienes reportaron la mayor retención de humedad con el sistema de labranza cero.

Los tratamientos de los implementos de roturación mantuvieron contenidos más bajos de humedad, y los tratamientos de labranza cero, aunque con buena captación inicial, tuvieron pérdidas muy fuertes de humedad después de un mes para O-I y en el ciclo P-V al mes ya presentaba el porcentaje de humedad más bajo de los tratamientos (Figura 1).

Cuadro 2. Comparación de medias de la humedad.

Ciclo otoño-invierno		Ciclo primavera-verano	
Tratamiento	Humedad	Tratamiento	Humedad
	%		%
A Vertedera	16.27	A Vertedera	23.96
A Discos	14.87	A Discos	22.00
L Cero	14.52	A Subsuelo	19.86
Rastra	14.33	Rastra	19.60
A Subsuelo	14.21	A Cinceles	18.48
A Cinceles	13.60	L Cero	16.76

DMS = 3.5855.

Esto se atribuye a la alta temperatura registrada en la región y a la falta de protección del suelo en las unidades experimentales, lo que indica que la captación de humedad estuvo directamente relacionada con la intensidad de labranza, difiriendo de lo expresado por Benjamín (1993), quien encontró que el contenido volumétrico de agua indica mayor movimiento de agua a través de los poros en labranza cero que en los sistemas de labranza con arado de cinceles y en los del arado de vertedera.

Retención de Humedad (Rhu)

Se analizaron los datos de los contenidos de humedad a 0.3, 1, 5, 10 y 15 Bar en las profundidades

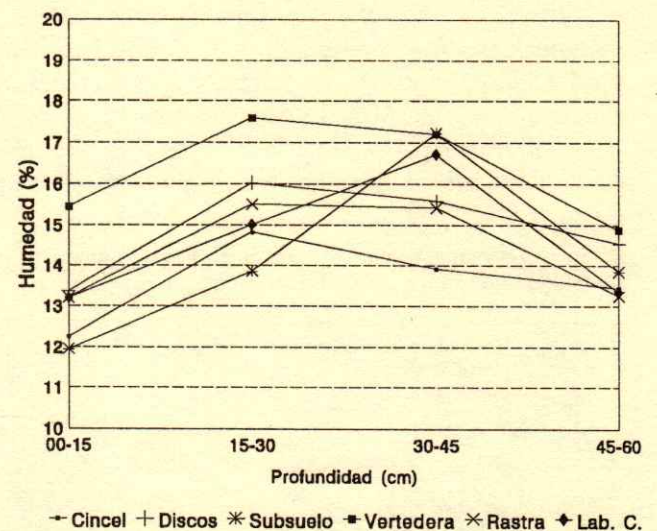


Figura 1. Comportamiento promedio de la humedad en el ciclo otoño-invierno (O-I).

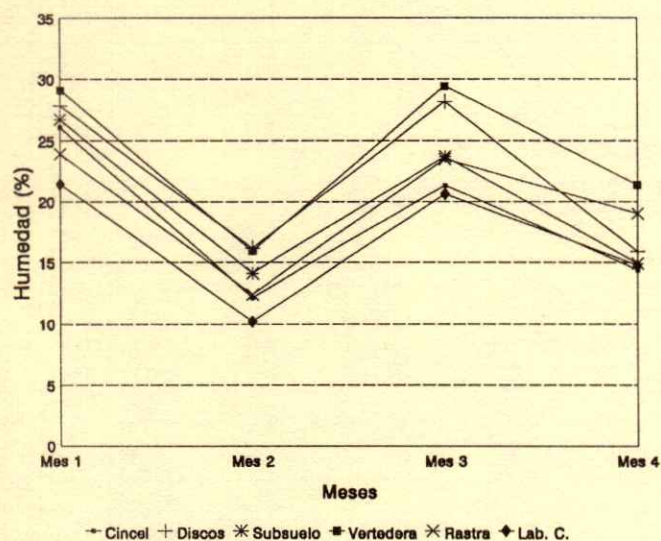


Figura 2. Comportamiento promedio de la humedad en el ciclo primavera-verano (P-V).

de 00 a 15 y de 15 a 30 cm, presentando en ambos ciclos, como era de esperarse, diferencia altamente significativa entre los contenidos de humedad en cada una de las diferentes tensiones y en la interacción tensión-profundidad (Cuadro 3).

No se encontró diferencia significativa entre tratamientos en ninguno de los ciclos. En el análisis de la interacción entre tensiones y profundidad, la profundidad de 00 a 15 cm presenta estadísticamente mayor retención de humedad que la profundidad de 15 a 30 cm, lo cual corrobora que el análisis de contrastes ortogonales fue adecuado al agrupar por profundidades, donde la diferencia es altamente significativa y, además, la capacidad de retención de humedad es mayor a tensiones bajas (0.3 y 1 Bar) en la profundidad de 00 a 15 cm en contraste con la

Cuadro 3. Comparación de medias para retención de humedad en cada tensión por profundidad (cm).

Tensión	Ciclos otoño-invierno		Ciclos primavera-verano	
	00 a 15	15 a 30	00 a 15	15 a 30
Bar	----- % -----			
0.3	31.52	30.46	32.41	30.08
1.0	26.38	20.68	25.14	22.41
10	16.32	12.37	14.06	17.18
15	13.17	11.59	13.27	13.03

DMS Prof en Trat = 0.5939 DMS Prof en Trat = 1.1807.

DMS Trat en Prof = 0.5454 DMS Trat en Prof = 0.9146.

profundidad de 15 a 30 cm para todos los tratamientos. A este respecto, Francis y Knight (1993) reportaron que la capacidad de campo y el contenido de agua disponible (CC-PMP) fue mayor en labranza cero a la profundidad de 0 a 7.5 cm.

Índice de Cono (IC)

Para el índice de cono (IC), los tratamientos presentaron diferencia estadística en ambos ciclos (Cuadro 1). Los tratamientos con mayor intensidad de labranza se compararon con los de menor intensidad por medio de un contraste, encontrando una diferencia altamente significativa entre los grupos, donde los tratamientos de los arados de discos, vertedera y subsolador registraron menor resistencia a la penetración (Cuadro 4), siendo diferentes estadísticamente.

De igual manera, en ambos ciclos, los tratamientos de los arados de discos y vertedera presentaron valores menores que los arados de cinceles y subsolador, contrastando estos últimos con diferencia altamente significativa con los implementos de cobertura (arados de discos y vertedera).

En la Figura 3, se muestra la interacción de los tratamientos con la profundidad, los cuales también resultaron con diferencia altamente significativa (Cuadro 1) observándose en el ciclo O-I cómo los tratamientos en la profundidad de 00 a 15 cm no presentan diferencia entre sí. En la segunda profundidad, la mayor resistencia la presentaron los tratamientos con labranza cero y del arado de cinceles con índice de cono de 1488.52 kPa y 1294.3 kPa, respectivamente.

Según el análisis estadístico, la menor resistencia correspondió a los arados de vertedera y de discos con índice de cono de 888.99 kPa y 693.95 kPa. En las

Cuadro 4. Comparación de medias de los tratamientos para el índice de cono en cada ciclo.

Ciclo otoño-invierno		Ciclo primavera-verano	
Tratamiento	Índice de cono	Tratamiento	Índice de cono
kPa		kPa	
A Cinceles	1567.85	A Cinceles	1631.57
L Cero	1419.32	Rastra	1578.21
Rastra	1381.21	L Cero	1497.20
A Subsolador	1215.55	A Subsolador	1287.41
A Vertedera	1127.91	A Discos	1261.17
A Discos	1008.12	A Vertedera	1237.34

DMS = 342.53. DMS = 226.53.

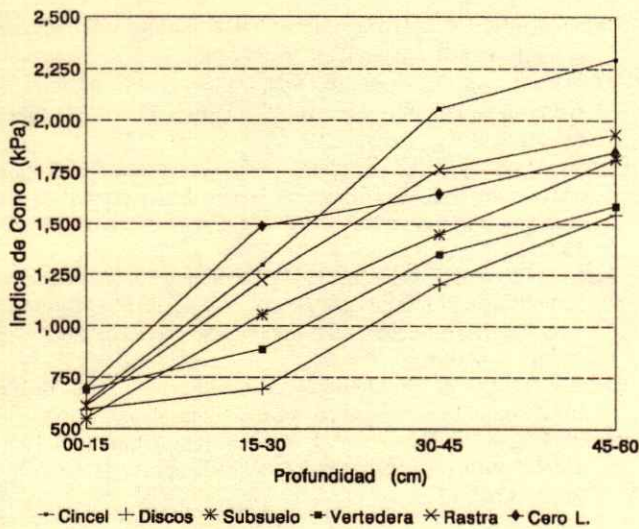


Figura 3. Comportamiento del índice de cono en el perfil otoño-invierno (O-I).

profundidades de 30 a 45 cm y de 45 a 60 cm, el comportamiento fue similar al sobresalir estadísticamente los tratamientos del arado de cinceles con valores más altos de índice de cono y, de nuevo, los arados de discos y vertedera con el índice de cono más bajo.

El ciclo P-V registró valores de resistencia a la penetración más altos que el ciclo O-I, lo cual se atribuye a la mayor variación de humedad en el suelo por efecto de las altas temperaturas propias del ciclo.

En P-V, el índice de cono presentó diferencia altamente significativa en todos los factores y sus respectivas interacciones (Cuadro 1). Los resultados del análisis de medias para la interacción de segundo orden y en el primer mes manifestaron poca variación entre tratamientos, presentando los valores más bajos en el perfil en los tratamientos con los arados de vertedera y de discos y los más altos en los tratamientos del arado de cinceles y de la rastra de discos (Cuadro 4).

En el segundo mes, los valores más bajos en el perfil los registraron los tratamientos del arado subsolador y los más altos los de la rastra de discos y del arado de cinceles. En el tercer mes del ciclo, los valores más bajos correspondieron a los tratamientos del arado de discos y los más altos a los de la rastra de discos. En el cuarto mes, se registraron los valores más altos del ciclo para todos los tratamientos, sobresaliendo los del arado de vertedera con los valores más bajos.

En la profundidad de 00 a 15 cm, los tratamientos del arado subsolador y de la rastra de discos registraron menor resistencia a la penetración y los de los arados de discos y vertedera mayor resistencia, aunque sin alcanzar valores críticos para el desarrollo de los cultivos.

En la profundidad de 15 a 30 cm, los tratamientos del arado de discos y el de vertedera registraron los valores más bajos y los de labranza cero, rastra de discos y arado de cinceles los más altos. En la profundidad de 30 a 45 cm, se registraron, en promedio, los valores más altos de resistencia a la penetración. En promedio, los tratamientos de la rastra de discos registraron los más altos valores. En la profundidad de 45 a 60 cm, los valores más bajos en promedio durante el ciclo los registraron los arados de discos y vertedera y los más altos los de la rastra de discos.

Los resultados obtenidos indican que el índice de cono aumenta con el tiempo y la disminución de la humedad de manera diferente para la acción de cada implemento y de forma inversa a la intensidad de labranza. En general, los arados de discos y vertedera dejan al suelo con menor resistencia a la penetración, seguidos por el arado subsolador, lo que concuerda con Luttrell *et al.* (1977), y atribuyéndolo a que en su acción sobre el suelo estos implementos permiten alcanzar grados más altos de porosidad.

CONCLUSIONES

- Se encontró una respuesta favorable en el comportamiento de la humedad y del índice de cono en el suelo a la acción de los implementos de labranza primaria de cobertura.
- El tratamiento del arado de discos logró un comportamiento de la humedad más estable en el perfil durante todo el ciclo, alcanzando al final los valores más altos de humedad, seguido por el arado de vertedera, cinceles, rastra, subsolador y labranza cero.
- La labranza cero presenta una buena opción para la producción en un suelo Xerosol háplico, tanto desde el punto de vista ecológico, como agronómico y económico, al mantener un buen contenido de humedad para la germinación de la semilla, siempre y cuando no se descuiden las fechas de riego, ya que facilita el abatimiento de humedad y aumenta la resistencia a la penetración.
- El sistema de labranza reducida, mediante el uso únicamente del arado de discos, presenta una buena

alternativa agronómica en la preparación del suelo Xerosol háplico, reduciendo los costos en comparación con la labranza tradicional al propiciar un mejor aprovechamiento del agua.

- El índice de cono presenta un aumento con el tiempo y la disminución de la humedad de manera diferente para la acción de cada implemento.

LITERATURA CITADA

- Alberts, E.E., J.M. Lafen, W.J. Rawls, J.R. Simantron y M.A. Nearing. 1989. Soil component. USDA-ARS Report N12. National Soil Erosion Research Laboratory. W. Lafayette, IN.
- ASAE. American Society of Agricultural Engineers. 1994. Monograph 12. Adv. Soil Dynamics 1: 313. St. Joseph, MI.
- Benjamin, J.G. 1993. Tillage effect on near-surface soil hydraulic properties. *Soil Tillage Res.* 26: 277-288.
- FAO. Food and Agricultural Organization. 1992. Manual de sistemas de labranza para América Latina. Boletín de suelos 66. 4:1-8. Roma, Italia.
- Francis, G.S. y T.L. Knight. 1993. Long-term effects of conventional and no-tillage on selected soil properties and crop yields in Canterbury, New Zealand. *Soil Tillage Res.* 26: 193-210.
- Larson, W.E. y G.J. Osborne 1982. Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. Special Publication 44: 1-3. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Luttrell, D.H., C.W. Bockhop y W.G. Lovely. 1977. The effect of tillage operations on soil physical conditions. *ASAE* 64: 103.
- Shafer, R.L., C.E. Johnson, A.J. Koolen, S.C. Gupta y R. Horn. 1992. Future research needs in soil compaction. *Trans. ASAE* 35(6): 1761-1770.

TRATAMIENTO DE SEMILLA DE CHILE CON ÁCIDOS SALICÍLICO Y SULFOSALICÍLICO Y RESPUESTA DE LAS PLÁNTULAS AL FRÍO

Pepper Seed Treatment with Salicylic and Sulfosalicylic Acid and Response of Seedlings to Cold Stress

Adalberto Benavides-Mendoza^{1†}, Alicia Marcelina Salazar-Torres¹, Francisca Ramírez-Godina¹, Valentín Robledo-Torres¹, Homero Ramírez-Rodríguez¹ y Ratikanta Maiti²

RESUMEN

El ácido salicílico (AS) es un compuesto señalizador del estrés en las plantas. Con el objetivo de verificar si la aplicación de AS y un derivado azufrado del mismo compuesto inducen tolerancia al frío, se pretrataron semillas de chile durante seis horas en soluciones acuosas de AS y ácido sulfosalicílico (ASS), con concentración 0, 10^{-5} , 10^{-4} y 10^{-3} M, en una cámara de germinación con temperatura controlada. Después de germinar las semillas, se transfirieron a charolas de poliestireno con turba canadiense en invernadero y se colocaron en una cama flotante con solución nutritiva Douglas; 22 días después, las plántulas se expusieron dos veces a tratamiento de baja temperatura, durante 24 h, en un refrigerador a 4 °C, sin luz. Entre un período de frío y otro se dejaron transcurrir cuatro días. El pretratamiento de la semilla con AS y ASS 10^{-4} M fue efectivo en inducir tolerancia en las plántulas al estrés de frío, el efecto se manifestó como mayor altura de la plántula, así como mayor peso fresco y seco de la parte aérea. Por su parte, los tratamientos de AS y ASS en concentración 10^{-5} y 10^{-3} M no mostraron efecto significativo sobre la biomasa de las plántulas. El AS y el ASS 10^{-3} M impactaron negativamente la densidad estomática y el índice estomático. El AS y ASS 10^{-4} y 10^{-5} M indujeron aumento en el índice y la densidad estomáticos en el lado abaxial de las hojas, la respuesta contraria se presentó en el lado adaxial. La densidad estomática en el lado abaxial mostró correlación positiva y estadísticamente significativa con la biomasa, el número de hojas y la altura de la plántula.

Palabras clave: Señalización, resistencia al estrés, densidad estomática, índice estomático, epidermis foliar.

SUMMARY

It is known that salicylic acid (AS) is a stress signaling compound in plants. With the objective of verifying if the exogenous application of AS and a sulfur derivative induces resistance to cold stress, we applied a six hours pretreatment of pepper seeds with a water solution of AS and sulfosalicylic acid (ASS) at concentrations of 0, 10^{-5} , 10^{-4} , and 10^{-3} M in a controlled temperature chamber. After germination, the seeds were transferred to containers with sphagnum peat moss with Douglas nutrient solution; 22 days after transplanting the seedlings were twice exposed to cold stress in 24 h periods in a refrigerator at 4° C without light. There were four days between the first and second cold events. Seed application of AS 10^{-4} M and ASS 10^{-4} M was effective in inducing seedling resistance to cold stress, manifested as taller seedlings and more plant fresh and dry weight. AS and ASS 10^{-3} M and 10^{-5} M showed a non significant effect on seedling weight. Stomatal index and stomatal density were negatively affected by AS and ASS 10^{-3} M. On the other hand AS and ASS 10^{-4} and 10^{-5} M increased the stomatal index and stomatal density in abaxial side, showing the opposite response in the adaxial side. Stomatal density in abaxial side showed a significant correlation with plant weight, leaf number, and plant height.

Index words: Signaling, stress resistance, stomatal density, stomatal index, leaf epidermis.

INTRODUCCIÓN

En las plantas, como en todos los organismos vivos, el estrés ambiental da lugar a la activación de respuestas de adaptación y defensa. Entre éstas se encuentra la inducción de la vía de los

¹ Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 25315 Buenavista, Saltillo, México.

[†] Autor responsable (abenmen@prodigy.net.mx)

² Departamento de Biología y Química, Universidad de las Américas. Santa Catarina Mártir, Apartado Postal 78, 72820 Cholula, Puebla, México.

fenilpropanoides, la cual, entre otros compuestos, genera ácido salicílico (AS) y sus derivados. El AS es un compuesto aromático que puede inducir incrementos en la productividad (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 1998), asimismo juega un papel importante en la señalización celular local de la patogénesis (Smith-Becker *et al.*, 1998) y parece participar en el proceso de señalización del estrés abiótico. La aplicación de AS en cultivos celulares de soya aumenta la resistencia al daño por herbicidas (Knörzera *et al.*, 1999), mientras que la aplicación foliar de AS en plántulas de *Sinapsis alba* da lugar a un incremento transitorio en la tolerancia al choque térmico causado por exposición a alta temperatura (Dat *et al.*, 1998). Respecto a otras clases de estrés abiótico, como la baja temperatura, no se dispone de estudios que indiquen si la aplicación de AS permite modificar la tolerancia intrínseca de las plantas. El objetivo del presente estudio fue determinar si el ácido salicílico (AS) y el ácido sulfosalicílico (ASS), aplicados en solución acuosa a la semilla, modifican la tolerancia a la baja temperatura en plántulas de chile.

MATERIALES Y MÉTODOS

Semillas de chile tipo serrano (*Capsicum annuum* L.) cultivar Tampiqueño 74 se colocaron en placas Petri con soluciones de ácido salicílico ($\text{HOC}_6\text{H}_4\text{COOH}$) y ácido sulfosalicílico ($\text{HOC}_6\text{H}_3(\text{COOH})\text{SO}_3\text{H}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 10^{-3} , 10^{-4} y 10^{-5} M; se usó agua destilada como testigo. Las semillas permanecieron durante seis horas en este pretratamiento en placas Petri; posteriormente, se lavaron con agua corriente y se instalaron para su germinación en una cámara con temperatura constante de 25 °C. Para verificar diferencias en germinación entre los diferentes pretratamientos, se colocaron 35 semillas por placas Petri, con cuatro repeticiones por pretratamiento, con un diseño completamente al azar. Se llevaron a cabo conteos del número de semillas germinadas cada dos días. Ocho días después de la siembra, las semillas germinadas se transfirieron a charolas de poliestireno con turba canadiense ubicadas en una cama flotante con solución nutritiva Douglas (Douglas, 1976) con las siguientes concentraciones (mg L^{-1}) de los nutrimentos minerales en la solución nutritiva: N: 124.19; P: 5.61; K: 133.41; Ca: 132.76; 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: 0.00012. Las semillas germinadas se colocaron en las charolas siguiendo un arreglo experimental

completamente al azar con cuatro repeticiones y 30 plantas por repetición. Transcurridos 22 días después de colocar las semillas germinadas en las charolas, se realizó un muestreo de plántulas para determinar el peso fresco, el peso seco, la altura y el número de hojas de las mismas. Se llevó, entonces, a las plántulas a una condición de estrés. Ésta consistió en someter a las plantas a baja temperatura (4 °C) durante 24 h para, posteriormente, regresarlas al invernadero. A 28 días, se realizó el segundo muestreo de plántulas para determinar el peso fresco y el peso seco. Posterior a este muestreo, se aplicó por segunda vez un tratamiento de baja temperatura, seguido de un tercer muestreo realizado en la forma antes indicada. Coincidiendo con el tercer muestreo, realizado a 33 días de crecimiento en las charolas, se obtuvieron impresiones foliares utilizando una mezcla de poliestireno y xilol, siguiendo la metodología descrita por Verdugo *et al.* (1999) para la determinación del índice estomático y la densidad estomática. Las hojas seleccionadas fueron las más jóvenes totalmente expandidas orientadas hacia el lado oriente del invernadero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Germinación de las Semillas

Los Tratamientos 10^{-4} y 10^{-3} M de AS afectaron negativamente la germinación de las semillas (Cuadro 1). El ASS presentó el mismo efecto negativo, excepto para la concentración de 10^{-4} M. Benavides-Mendoza (2002) reportó la misma respuesta inhibitoria del AS sobre la germinación de semillas de melón, al aplicarse en concentración de 10^{-3} a 10^{-2} M; esto mismo se reportó para semillas de

Cuadro 1. Número promedio de semillas germinadas de chile Tampiqueño 74 por placa Petri. Los números corresponden al promedio de cinco muestreos realizados cada dos días.

Tratamiento	Promedio de semillas germinadas
Testigo	12.70 c [†]
AS 10^{-5} M	12.30 c
AS 10^{-4} M	9.80 b
AS 10^{-3} M	6.55 a
Testigo	12.70 c
ASS 10^{-5} M	8.15 a
ASS 10^{-4} M	13.70 c
ASS 10^{-3} M	10.30 b

[†] Los promedios seguidos de la misma letra no difieren estadísticamente (Duncan, $\alpha = 0.05$).

maíz y se atribuyó a cambios en la actividad de reguladores relacionados con la germinación (Guan y Scandalios, 1995).

Crecimiento de la Plántula

El análisis de varianza global para los tres muestreos (Cuadro 2) indicó un efecto positivo de los AS y ASS en la concentración 10^{-4} M sobre la biomasa aérea. La altura de plántula fue menor para las concentraciones de 10^{-5} y 10^{-3} M, pero no fue diferente entre 10^{-4} M y el testigo. No se presentaron diferencias significativas para el número de hojas por plántula. Estos resultados se incluyen en las Figuras 1 y 2, desglosando los tres muestreos realizados.

Al desglosar los datos de los tres muestreos es patente que antes de la exposición al frío, la aplicación de AS y ASS, en todas las concentraciones, ejerció un efecto negativo y estadísticamente significativo sobre la altura de la plántula (Figura 1). Sin embargo, después del estrés con frío, la respuesta al AS (Figura 1a) y ASS (Figura 1b) en la concentración de 10^{-4} fue positiva, y se conservó negativa en el caso de la concentración más alta de 10^{-3} M. Posiblemente, esta respuesta se relaciona con la habilidad del AS para inducir la síntesis de especies activas de oxígeno (Dat *et al.*, 1998). Benavides-Mendoza (2002) encontró la misma respuesta en plántulas de tomate con las mencionadas concentraciones de AS y ASS.

En cuanto a la biomasa, antes de la exposición al frío no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre el testigo y las plantas con aplicación de AS y ASS (Figura 2). Posterior a la exposición al frío, los promedios más altos correspondieron al tratamiento de AS 10^{-4} M (Figura 2a), así como al ASS 10^{-4} M (Figura 2b). Los promedios más bajos fueron, en este caso, los

correspondientes a las concentraciones más bajas y altas de AS y ASS. La ausencia de respuesta lineal dependiente de la dosis de A fue reportada por otros autores (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 1998) y se supone que ocurre por la habilidad del AS para modificar la expresión génica en forma análoga a los reguladores del crecimiento.

Los salicilatos como el AS y el ASS son compuestos fenólicos que modifican múltiples actividades de las plantas como la floración (Leslie y Romani, 1986), la producción de calor (Raskin *et al.*, 1989), el transporte de azúcares y aminoácidos (Bourbouloux *et al.*, 1998). La síntesis del AS ocurre en prácticamente todos los tejidos vegetales y es inducida por estímulos ambientales bióticos y abióticos que originan estrés (Reymond y Farmer, 1998). El AS parece funcionar como segundo mensajero en las redes de transducción de señales que permiten la expresión de los genes relacionados con la defensa en las plantas. Aunque el mecanismo exacto se desconoce, se supone que el AS actúa modificando el balance redox celular, lo cual desencadena respuestas como la producción de especies activas de oxígeno que, a su vez, funcionan como inductores de genes relacionados con la defensa (Foyer *et al.*, 1997; Maxwell *et al.*, 2002).

La baja temperatura genera estrés oxidativo en las plantas. Una exposición al frío "endurece" las plantas de tal forma que son capaces de resistir posteriormente temperaturas aún más bajas. En ese caso, las especies activas de oxígeno producidas durante el estrés oxidativo inducen los genes relacionados con la tolerancia al frío (Prasad *et al.*, 1994). Los salicilatos promueven la síntesis de especies activas de oxígeno (Dat *et al.*, 1998), las cuales modifican la sensibilidad de las plántulas a la baja temperatura en forma análoga a como lo hace la

Cuadro 2. Promedio de tres muestreos para las variables de biomasa y morfología de las plántulas de Chile Tampiqueño 74.

Tratamiento	Peso fresco parte aérea	Peso fresco de la raíz	Número de hojas	Altura de la plántula
	----- g -----			cm
Testigo	0.4402 b [†]	0.1969 a	6.8456 a	6.1539 a
AS 10^{-5} M	0.4312 b	0.1755 a	6.3091 a	4.8792 b
AS 10^{-4} M	0.5428 a	0.2537 a	7.1005 a	5.7440 a
AS 10^{-3} M	0.3708 b	0.1661 a	6.4634 a	4.6652 b
Testigo	0.4402 b [†]	0.1969 a	6.8456 ab	6.1539 a
ASS 10^{-5} M	0.3459 b	0.1539 a	6.2012 b	4.9412 b
ASS 10^{-4} M	0.5554 a	0.2476 a	8.5080 a	6.6486 a
ASS 10^{-3} M	0.4036 b	0.1805 a	7.2352 a	4.7857 b

[†] Los promedios seguidos de la misma letra no difieren estadísticamente (Duncan, $\alpha \leq 0.05$).

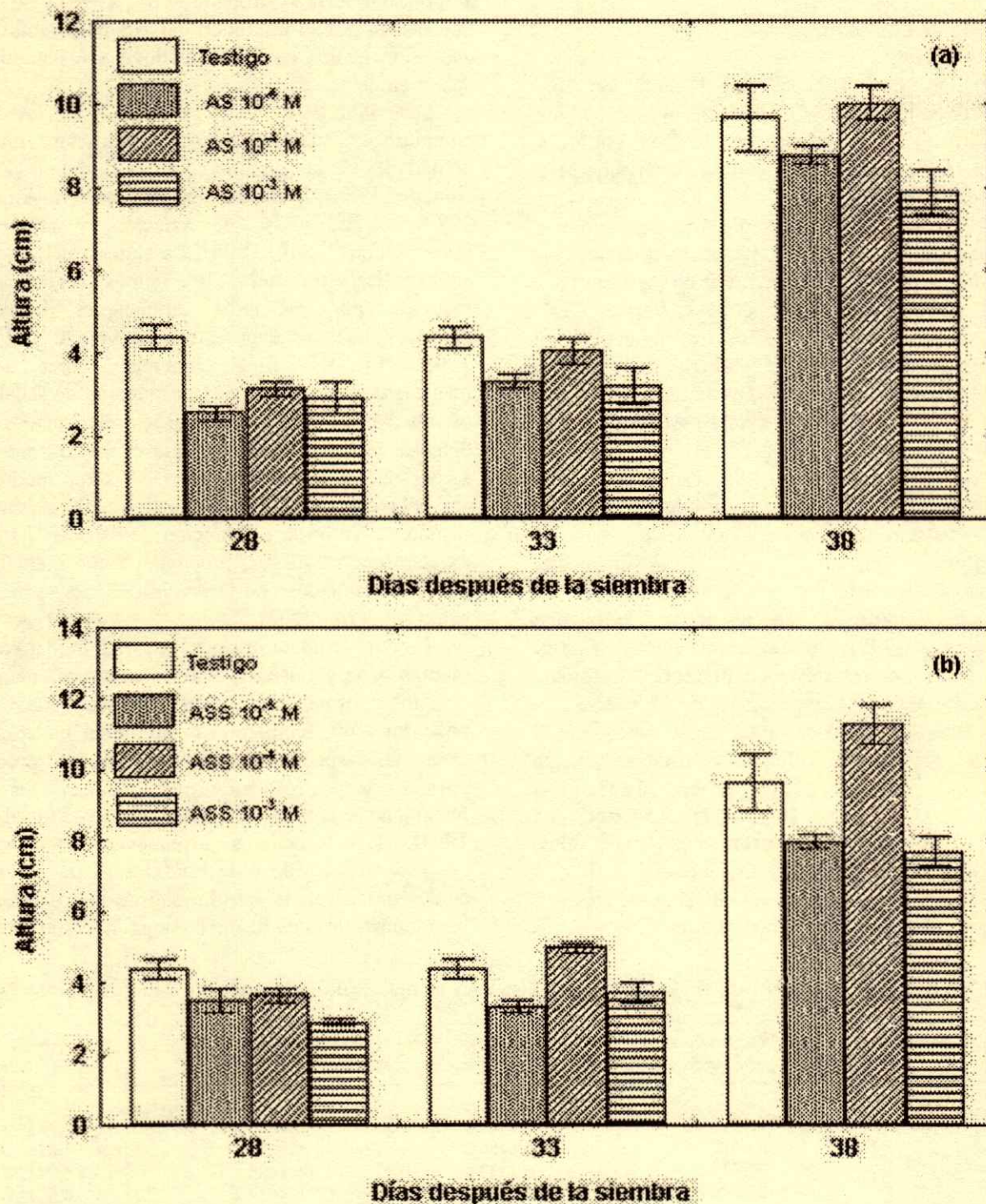


Figura 1. Respuesta de la altura de plántulas de chile Tampiqueño 74 expuestas a baja temperatura. (a) Tratamiento con ácido salicílico (AS). (b) Tratamiento con ácido sulfosalicílico (ASS).

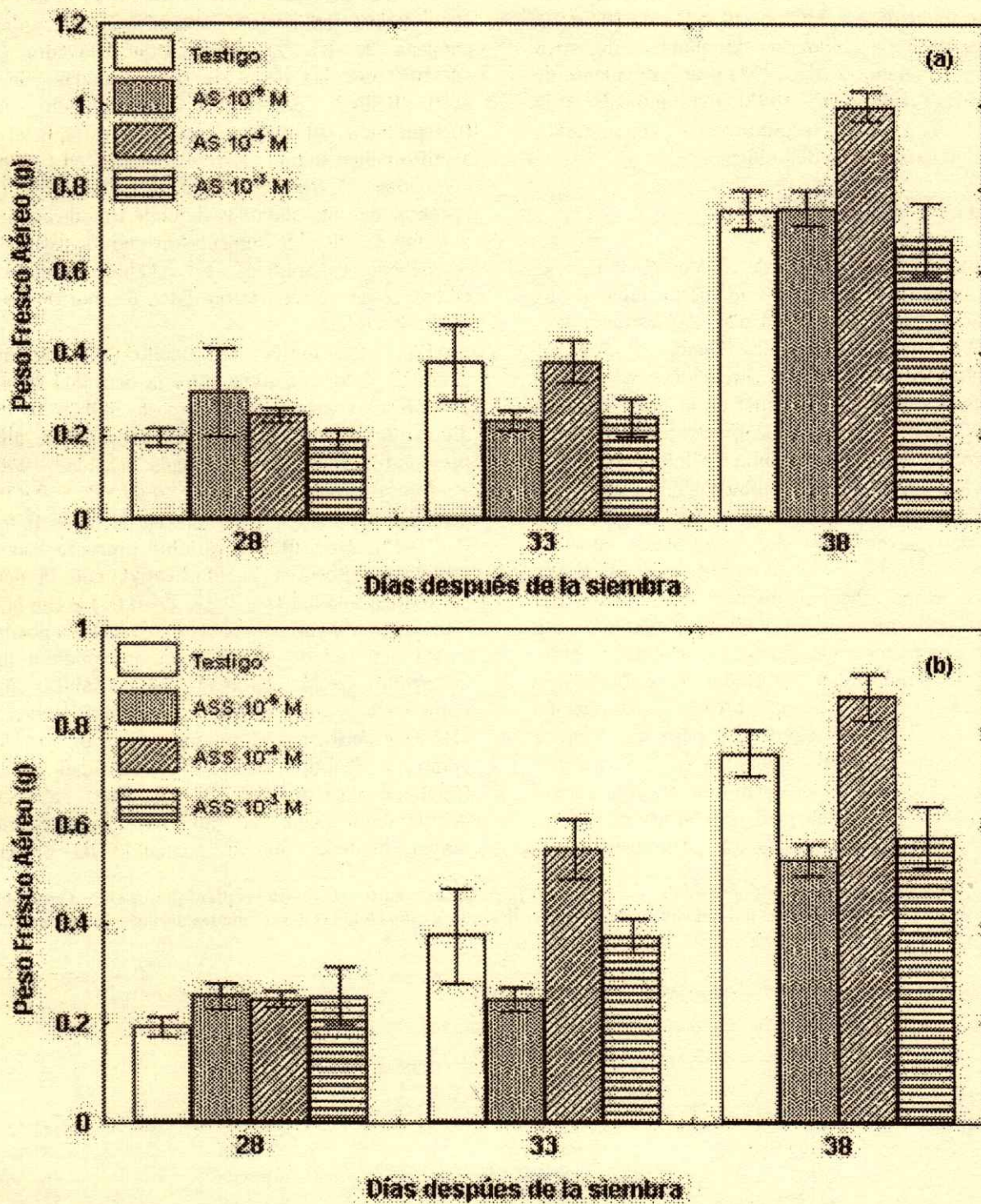


Figura 2. Respuesta del peso fresco de la parte aérea de plántulas de chile Tampiqueño 74 expuestas a baja temperatura. (a) Tratamiento con ácido salicílico (AS). (b) Tratamiento con ácido sulfosalicílico (ASS).

preexposición al frío. Incluso, en ausencia de condiciones de estrés ambiental manifiesto, el AS induce respuestas favorables en las plantas. La aplicación foliar de AS, en concentración de 10^{-2} a 10^{-8} M, aumentó la biomasa de plantas de soya (Gutiérrez-Coronado *et al.*, 1998) y el rendimiento de trigo (López-Tejeda *et al.*, 1998). Este aumento en la productividad indica seguramente una mayor eficiencia en la respuesta al ambiente.

Densidad e Índice Estomático

En cuanto a las variables de conteo estomático, se encontró que el AS 10^{-4} y 10^{-3} M dieron lugar a una disminución significativa en la densidad estomática y en el índice estomático adaxiales (Cuadro 3). Para los tratamientos con ASS, las diferencias no fueron significativas. En el lado abaxial de la hoja, por otra parte, la respuesta se mostró diferente y se aumentaron la densidad y el índice estomáticos con el AS 10^{-4} M, sin presentar cambios significativos los restantes tratamientos de AS. En cuanto al ASS, sólo la densidad estomática fue modificada por el tratamiento de 10^{-4} M, mientras que el índice estomático no se afectó de manera significativa. La densidad estomática y el índice estomático son regulados por factores endógenos y ambientales. Entre los factores ambientales reportados se encuentra la concentración de CO_2 , la cual presentó una relación positiva con el índice estomático, pero ausencia de relación con la densidad estomática en *Tradescantia* (Boetsch *et al.*, 1996). Del mismo modo, la respuesta de disminución en la densidad estomática se reportó como un carácter de aclimatación para restringir la

pérdida de agua en un gradiente de altitud (Schoettle y Rochelle, 2000).

No hay reportes de modificación en la densidad y en el índice estomáticos inducidos por la aplicación exógena de AS y ASS. Larqué-Saavedra (1978) encontró que las hojas de frijol tratadas con ácido acetilsalicílico presentaron disminución en la transpiración. El mismo autor reportó que el ácido acetilsalicílico indujo cierre estomático en *Commelina communis* (Larqué-Saavedra, 1979). Eris (1983) encontró que las plántulas de chile tratadas con 400 y 800 mg L⁻¹ de AS aumentaron significativamente la resistencia estomática. En dichos estudios, sin embargo, no se reportaron datos de morfología de la epidermis foliar.

Por otra parte, se encontraron correlaciones positivas y significativas entre la densidad estomática abaxial y las variables de biomasa, número de hojas y altura de planta. Las correlaciones más altas se presentaron entre la mencionada densidad estomática y el peso fresco aéreo ($r = 0.48$, $P < 0.05$) y la densidad estomática y el número de hojas ($r = 0.45$, $P < 0.05$). Esta última variable presentó, asimismo, correlación positiva y significativa con la densidad estomática adaxial ($r = 0.37$, $P < 0.05$) y con el índice estomático abaxial ($r = 0.41$, $P < 0.05$). Es posible que exista una red de señalización que pudiera ligar el desarrollo de los estomas con variables como el número de hojas y la altura de planta. Berger *et al.* (1998) describieron el mutante *sddl* de *Arabidopsis* como un fenotipo con mayor densidad estomática (relativamente mayor en el lado abaxial en comparación con el adaxial) acompañada de mayor biomasa, mayor contenido de proteína y

Cuadro 3. Promedio de las variables densidad estomática (DE) e índice estomático (IE) para las plántulas de chile Tampiqueño 74. Las impresiones foliares realizadas para el conteo de células se llevaron a cabo en hojas desarrolladas después de que las plantas se sometieron a frío.

Tratamiento	Lado adaxial		Lado abaxial	
	IE	DE	IE	DE
		estomas mm ⁻²		estomas mm ⁻²
Testigo	0.183 a [†]	113.33 a	0.275 b	200.00 a
AS 10 ⁻⁵ M	0.188 a	130.56 a	0.323 ab	233.33 a
AS 10 ⁻⁴ M	0.137 b	81.94 b	0.379 a	244.44 a
AS 10 ⁻³ M	0.108 b	44.44 c	0.305 ab	152.78 a
Testigo	0.183 a [†]	113.33 a	0.275 b	200.00 b
ASS 10 ⁻⁵ M	0.170 a	86.11 a	0.348 ab	255.56 ab
ASS 10 ⁻⁴ M	0.175 a	120.83 a	0.379 a	290.28 a
ASS 10 ⁻³ M	0.187 a	113.33 a	0.319 ab	248.33 ab

[†] Los promedios seguidos de la misma letra no difieren estadísticamente (Duncan, 0.05).

ADAPTACIÓN DEL FRIJOL A SEQUÍA EN LA ETAPA REPRODUCTIVA

Adaptation of Common Bean to Drought Stress During the Reproductive Stage

Efraín Acosta-Díaz^{1†}, Carlos Trejo-López², Lucero del Mar Ruiz-Posadas²,
J. Saúl Padilla-Ramírez³ y Jorge A. Acosta-Gallegos⁴

RESUMEN

Con el objetivo de identificar características del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), relacionadas con la adaptación a la sequía que ocurre al final del ciclo del cultivo, se estableció un experimento con ocho genotipos en Zacatepec, Morelos, en dos condiciones: riego durante todo el ciclo y sequía en la etapa reproductiva. En sequía, el riego se suspendió a partir del inicio de la floración y, a partir de esta etapa, se realizaron ocho muestreos en hojas, en las que se determinaron el potencial hídrico, la conductancia estomática y la tasa de asimilación de CO₂. Se registraron datos fenológicos y se cuantificaron el rendimiento de semilla y la biomasa del vástago. Además, se cuantificó el peso de 100 semillas y se calcularon el índice de cosecha, el índice de susceptibilidad a la sequía y la media geométrica. Los genotipos exhibieron diferentes características fisiológicas en respuesta a la sequía terminal, entre ellas: a) la diferencia en la conductancia estomática entre las dos condiciones hídricas fue menor en ICA Palmar y SEQ 12; b) el escape a la sequía al acelerarse la maduración en esa condición, característica importante en Pinto Zapata, Bayo Madero y Bayo Criollo el Llano; c) un alto índice de cosecha en Pinto Villa y Pinto Zapata. Los genotipos de mayor rendimiento con sequía terminal fueron: Pinto Zapata, Bayo Madero y Pinto Villa, los dos primeros de alto rendimiento en riego y, en consecuencia, de alta media geométrica. Los

resultados indican que, además de la adaptación fisiológica a la sequía y el alto índice de cosecha, un mayor potencial de rendimiento de semilla es importante para la obtención de una mejor estabilidad en el rendimiento con sequía terminal. Los distintos mecanismos de adaptación a la sequía terminal en genotipos de frijol, sugiere la posibilidad de utilizarlos en programas de mejoramiento genético.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., sequía terminal, fisiología, rendimiento.

SUMMARY

The objective of this work was to identify traits related to terminal drought adaptation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). An experiment was conducted in Zacatepec, Morelos, Mexico, with eight bean genotypes, grown under two treatments: irrigated during the whole cycle and drought stressed during the reproductive stage. Under stress, irrigation was suspended at the beginning of flowering and from that stage onwards eight determinations in leaf were carried out on hydric potential, stomatal conductance and CO₂ assimilation rate. Plant phenology was also recorded as well as above ground biomass, seed yield and 100-seed weight. In addition, the following indexes were calculated: harvest index, drought susceptibility index and the seed yield geometric mean. In response to terminal drought, bean genotypes exhibited different physiological traits, among them: a) a significant difference in stomatal conductance between moisture treatments, low values observed in ICA Palmar and SEQ 12; b) drought escape due to the enhancement of maturity under stress, mainly in genotypes Pinto Zapata, Bayo Madero, and Bayo Criollo el Llano; c) a high harvest index in Pinto Villa and Pinto Zapata. High yielding genotypes under stress were: Pinto Zapata, Bayo Madero, and Pinto Villa; the first two displayed high yield potential under irrigation and a high geometric mean. Results indicated that, in addition to physiological adaptation and high harvest index under stress, a high yield potential is important to stabilize

¹ Campo Experimental General Terán, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 3, 67400 General Terán, Nuevo León, México.

[†] Autor responsable (acostaefrain@yahoo.com.mx)

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

³ Campo Experimental Pabellón, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Pabellón, Aguascalientes.

⁴ Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Celaya, Guanajuato.

yield under terminal drought. The occurrence of distinct mechanisms for drought adaptation in bean indicates an opportunity for recombination in breeding.

Index words: *Phaseolus vulgaris* L., terminal drought, physiology, seed yield.

INTRODUCCIÓN

La producción de frijol en el mundo, por lo general se realiza en condiciones de temporal, cuando la precipitación insuficiente e impredecible es el factor principal que limita la producción. En América Latina, se ha estimado que el estrés hídrico reduce el rendimiento del frijol en 73% (Van Schoonhoven y Voyset, 1989). En México, 85% del frijol se cultiva durante el ciclo de primavera-verano en diversas regiones del país, entre ellas, la semiárida y la tropical húmeda baja, en condiciones de temporal con 250 a 400 mm de precipitación durante el ciclo del cultivo, con un rendimiento promedio de 450 kg ha⁻¹. En la actualidad, el cultivo se realiza con diferentes regímenes de humedad del suelo. En la región semiárida de altura, el frijol se siembra durante el ciclo primavera-verano con un régimen de precipitación deficitario y errático, registrándose con frecuencia sequía intermitente, la cual puede presentarse durante las etapas vegetativa y reproductiva del cultivo. En la zona tropical húmeda baja, el frijol se siembra al final de la estación lluviosa, durante el ciclo otoño-invierno, y su producción en parte depende de la humedad residual almacenada en el suelo, observándose con frecuencia sequía terminal, la que ocurre en las últimas etapas del cultivo, durante el llenado de grano y madurez fisiológica (Acosta-Gallegos *et al.*, 1998).

En estudios realizados en estas dos regiones, se han observado diferencias en el rendimiento entre genotipos de frijol en condiciones de sequía (Acosta-Gallegos *et al.*, 1998). Se presume que los mecanismos que confieren adaptación al cultivo en condiciones de sequía intermitente y que tienen relación con el rendimiento, pueden ser similares a aquellos relacionados con la tolerancia en condiciones de sequía terminal. La primera se presenta durante las etapas vegetativa y reproductiva; mientras que la sequía terminal ocurre durante la fase de llenado de vainas (Nageswara *et al.*, 1986). Uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit hídrico es el crecimiento celular, por lo que la sequía reduce el área

foliar y acelera la senescencia de hojas maduras, cuando ésta es severa (Davies y Zhang, 1991); asimismo, la transpiración y la fotosíntesis se abaten, debido a la reducción de la turgencia, al cierre estomático y al bloqueo de la difusión del CO₂ hacia el mesófilo (Kumar *et al.*, 1994).

Con respecto al rendimiento de frijol en la etapa reproductiva, la cual comprende las fases posteriores a la floración, éste es más sensible al estrés hídrico que en las fases vegetativas, debido al incremento en la demanda de asimilados por las estructuras reproductivas (Laing *et al.*, 1984; Acosta-Gallegos y Kohashi-Shibata, 1989).

El frijol no es reconocido como una especie resistente a la sequía, sin embargo, posee características que confieren escape (precocidad), evasión y tolerancia a la deshidratación, pero es necesario identificar y utilizar dichas características en un programa de mejoramiento genético. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar algunas características fisiológicas y fenológicas relacionadas con la adaptación a la sequía terminal en genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) de diferente hábito de crecimiento y respuesta a la sequía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localidad de Prueba y Diseño Experimental

El estudio se realizó en el Campo Experimental "Zacatepec", Morelos, (18° 42' N, 99° 10' O) a una altitud de 917 m), durante el ciclo de invierno de 1997-1998, en un suelo Vertisol gleyco (FAO, 1989). El clima durante el invierno en esta localidad se caracteriza por presentar humedad relativa promedio entre 60 y 70% y temperaturas máximas entre 33 y 36 °C. El experimento se estableció después de la preparación del terreno que incluyó barbecho, rastreo y surcado. Se evaluaron ocho variedades de frijol en dos tratamientos de humedad: riego durante todo el ciclo y sequía terminal. La siembra se realizó manualmente el 17 de noviembre de 1997, colocando dos semillas cada 20 cm. En el momento de la siembra, se fertilizó con 40-40-00 kg ha⁻¹ de N-P-K. El cultivo se mantuvo libre de malezas y plagas, mediante deshierbes con tracción animal, manual con azadón y aplicaciones preventivas de insecticidas. En la condición de riego, el suelo se mantuvo a capacidad de campo hasta la madurez fisiológica del cultivo, mediante riegos; en tanto que el tratamiento de sequía fue terminal, esto

es, al suspenderse el riego a 45 días después de la siembra (floración del genotipo Bayo Criollo el Llano) no se volvió a suministrar agua durante el resto del cultivo, tampoco se registraron precipitaciones.

El diseño experimental fue bloques al azar con arreglo de parcelas divididas con seis repeticiones. En la parcela grande se estudiaron las dos condiciones de humedad (riego y sequía terminal), mientras que en la parcela chica se estudiaron ocho genotipos de frijol. La parcela experimental consistió en dos surcos de 6.0 m de longitud y 0.75 m de separación entre ellos.

Material Genético

Los genotipos de frijol utilizados pertenecen a diferentes razas genéticas (Cuadro 1). Estos son de diferente hábito de crecimiento, desde determinado arbustivo Tipo I hasta el indeterminado Tipo III (López *et al.*, 1985). La mayoría de estos genotipos se han identificado como resistentes a la sequía con base en su rendimiento en varias localidades (Acosta-Gallegos *et al.*, 1998). Con la excepción del Bayo Criollo el Llano, los genotipos utilizados son variedades mejoradas.

Características Fisiológicas

Se hicieron mediciones de potencial hídrico, conductancia estomática y tasa de asimilación de CO₂ para lo cual se seleccionaron, al azar, cinco hojas completamente expandidas en cada planta. El potencial hídrico se determinó después de cortar el pecíolo de las hojas a 5 cm de la base, y se insertaron inmediatamente en una cámara de presión tipo

Scholander (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA). La cámara de presión se llenó lentamente con aire comprimido hasta que se registró un balance en la presión del potencial hídrico del xilema. Las mediciones de conductancia estomática y la tasa de asimilación de CO₂ se realizaron en el foliolo central de hojas completamente expandidas, directamente mediante un sistema analizador portátil de gas abierto (CIRAS-1, PPSYSTEMS). Las medidas se tomaron entre las 12:00 y 13:00 h en ocho muestreos realizados a 45, 49, 53, 56, 60, 63, 70 y 74 días después de la siembra (DDS).

Características Fenológicas

Los días a la floración (DF) se definieron como los días transcurridos después de la siembra hasta cuando 50% de las plantas en una parcela presentaron al menos una flor abierta. Los días a la madurez fisiológica (DMF) se definieron como los días transcurridos después de la siembra hasta cuando 90% de las vainas en 50% de las plantas perdieron su pigmentación verde (Van Schoonhoven y Pastor-Corrales, 1987). Con estas características fenológicas se calculó el número de días de llenado del grano (DLLG = DMF-DF).

Biomasa, Rendimiento de Semilla y Peso de 100 Semillas

A la madurez fisiológica se determinó la biomasa del vástago y el rendimiento de semilla (g m⁻²). Todas las partes de la planta, excepto la semilla, se secaron a 70 °C por 72 h. El peso de la semilla (g) se determinó tomando al azar 100 semillas de cada unidad experimental.

Cuadro 1. Raza genética, hábito de crecimiento y respuesta a la sequía de ocho genotipos de frijol.

Genotipo	Raza [†]	Hábito de crecimiento [‡]	Respuesta a la sequía [§]
Negro Cotaxtla 91	Mesoamericana	II	Susceptible
BAT 477	Mesoamericana	III	Resistente
SEQ 12	Mesoamericana	III	Resistente
Pinto Zapata	Durango	II	Resistente
Pinto Villa	Durango	III	Resistente
Bayo Criollo el Llano	Durango	III	Resistente
Bayo Madero	Durango	III	Susceptible
ICA Palmar	Nueva Granada	I	Resistente

[†] Singh *et al.* (1991). [‡] López *et al.* (1985). [§] Acosta-Gallegos *et al.* (1998).

Índice de Cosecha, Índice de Susceptibilidad a la Sequía y Media Geométrica

El índice de cosecha se calculó con la ecuación:

$$IC = (rg_i/rb_i) \times 100$$

Donde: rg_i es el rendimiento de semilla del i -ésimo genotipo y rb_i es el rendimiento de biomasa del i -ésimo genotipo (Schneider *et al.*, 1997; Ramírez-Vallejo y Kelly, 1998).

El índice de susceptibilidad a la sequía se calculó con la expresión:

$$ISS = [1 - (rs_i/rr_i)]/IIS$$

Donde: rs_i es el rendimiento de semilla en sequía para el i -ésimo genotipo, rr_i es el rendimiento de semilla en riego para el i -ésimo genotipo y IIS es el índice de intensidad de sequía.

Este último calculado con la expresión:

$$IIS = (Rs/Rr) \times 100$$

Donde: Rs es el rendimiento promedio de grano de los genotipos en sequía y Rr es el rendimiento promedio de semilla de los genotipos en riego.

La media geométrica se calculó con la ecuación:

$$MG = (rs_i \times rr_i)^{1/2}$$

Donde: rs_i es el rendimiento de semilla en sequía del i -ésimo genotipo y rr_i es el rendimiento de semilla en riego del i -ésimo genotipo (Fisher y Maurer, 1978).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el ciclo del cultivo hubo un ataque de mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*), misma que, a pesar de aplicaciones quincenales de insecticida, se incrementó ligeramente conforme avanzó el ciclo del cultivo. Se considera que su presencia no tuvo efectos sobre el cultivo.

Características Fisiológicas

En general, la sequía tuvo un efecto significativo en la reducción del potencial hídrico en los ocho genotipos de frijol, obteniéndose valores hasta de -12.0 Pa en algunos genotipos; en contraste, en la condición de riego, éste se mantuvo relativamente

constante a través del tiempo en los ocho cultivares (Figura 1). En sequía, se observó un efecto diferencial entre los cultivares de frijol, independientemente de su hábito de crecimiento y su respuesta a la sequía: BAT 477 y SEQ 12, de hábito III y resistentes a la sequía; Negro Cotaxtla 91, de hábito II y susceptible a la sequía; ICA Palmar, de hábito I y resistente a la sequía; y Bayo Criollo el Llano, de hábito III y resistente a la sequía, el potencial hídrico se redujo significativamente a partir de los primeros cuatro días de suspensión del riego. En contraste, en Pinto Zapata, Pinto Villa y Bayo Madero, de hábitos de crecimiento I, III y III, respectivamente, y resistentes a la sequía, el efecto del estrés sobre el potencial hídrico se inició a partir de ocho días después de la suspensión del riego.

No obstante que la mayoría de los cultivares presentaron una disminución gradual del potencial hídrico conforme aumentó el tiempo del estrés, Pinto Villa e ICA Palmar mostraron una reducción más alta que el resto de los genotipos a partir de 25 días después de la suspensión del riego. Esta reducción continuó disminuyendo significativamente en el último muestreo realizado a 29 días después de la suspensión del riego hasta alcanzar valores cercanos a -12 Pa en dichos genotipos (Figura 1).

La conductancia estomática inicial varió marcadamente entre los genotipos de frijol en los dos tratamientos de humedad del suelo (Figura 2). Los cultivares Negro Cotaxtla 91, Pinto Zapata, Pinto Villa, Bayo Criollo el Llano, Bayo Madero y SEQ 12 mostraron una conductancia estomática inicial alta, mientras que BAT 477 e ICA Palmar fueron genotipos que se caracterizaron por su conductancia estomática inicial baja. Estos resultados sugieren la existencia de una variación genética importante entre los materiales de frijol utilizados. La identificación de genotipos de frijol de diferentes orígenes y acervos genéticos podría permitir la acumulación de diferentes genes de adaptación a la sequía terminal.

En general, la conductancia estomática observada en todos los genotipos fue menor en sequía que en el tratamiento testigo, la cual disminuyó drásticamente en los muestreos realizados a 15, 18, 25 y 29 días después de la suspensión del riego, alcanzando valores entre 75 y 125 mmol m⁻² s⁻¹ a 29 días después del inicio del tratamiento de sequía (Figura 2). Sin embargo, esta reducción varió entre genotipos, siendo más alta en Negro Cotaxtla 91, BAT 477 y Bayo Criollo el Llano, los cuales exhibieron una sensibilidad alta y, por lo tanto, cerraron sus estomas.

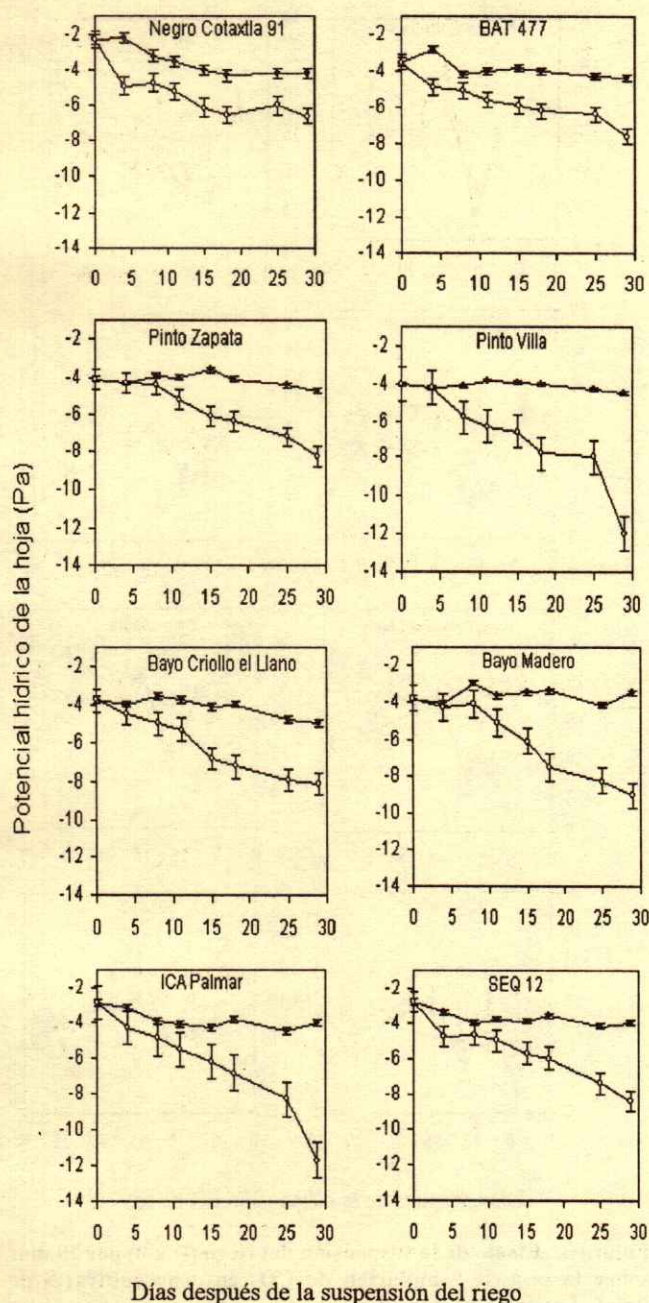


Figura 1. Efecto de la suspensión del riego (Día 0) por 29 días sobre el potencial hídrico de la hoja en ocho cultivares de frijol. Los símbolos cerrados indican plantas en riego y los símbolos abiertos plantas en sequía terminal. Cada punto es el promedio de cinco repeticiones y la barra vertical indica el error estándar.

Esta reducción en la conductancia estomática se mantuvo hasta el final del estrés hídrico. Al respecto, Núñez *et al.* (1989) observaron que la conductancia estomática en la variedad de frijol Seafarer disminuyó drásticamente en las mediciones realizadas a 42 y

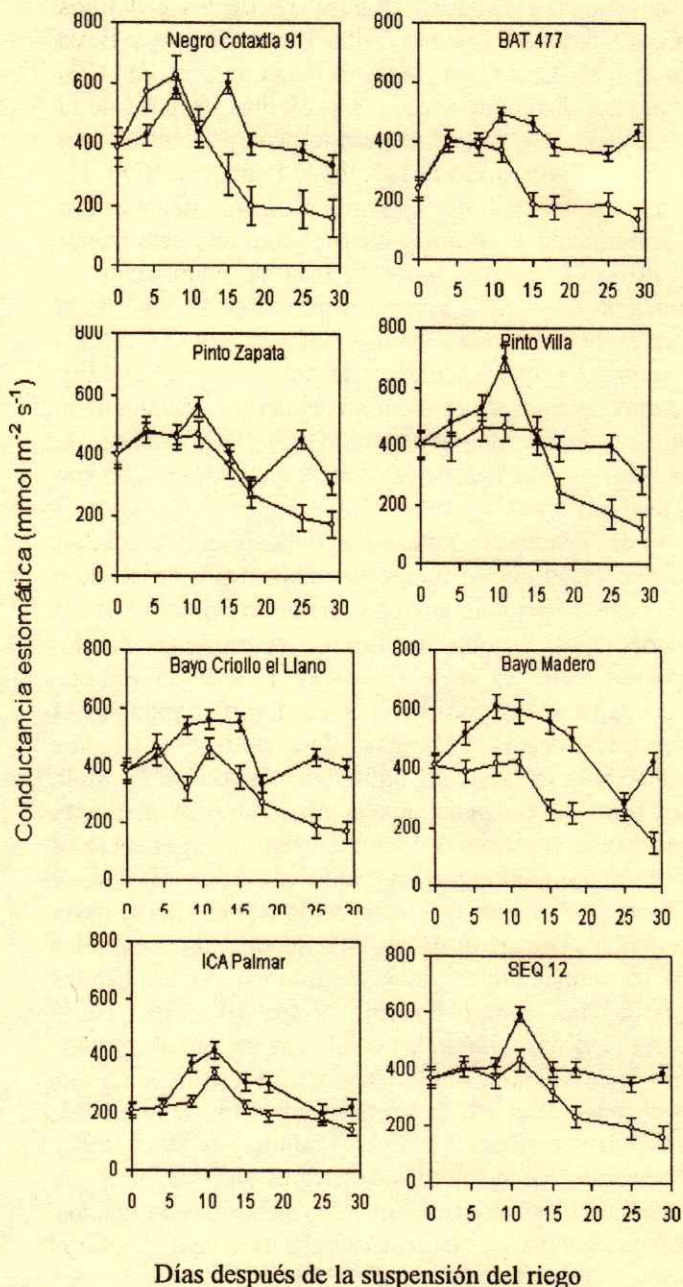


Figura 2. Efecto de la suspensión del riego (Día 0) por 29 días sobre la conductancia estomática en ocho cultivares de frijol. Los símbolos cerrados indican plantas en riego y los símbolos abiertos plantas en sequía terminal. Cada punto es el promedio de cinco repeticiones y la barra vertical indica el error estándar.

52 días después de la siembra, alcanzando valores menores que 0.06 cm s^{-1} en condiciones de sequía terminal.

El efecto del tratamiento de sequía sobre la tasa de asimilación de CO_2 mostró una respuesta similar a la

conductancia estomática (Figura 3). En los genotipos Negro Cotaxtla 91, Pinto Villa, Bayo Madero y Bayo Criollo el Llano, la tasa de asimilación de CO_2 empezó a disminuir a 15, 18 y 25 días después de la suspensión del riego, respectivamente; mientras que en Pinto Zapata, BAT 477, ICA Palmar y SEQ 12, esta característica fisiológica fue menos afectada por el tratamiento de sequía. Es probable que este menor efecto de la sequía sobre la tasa de asimilación se relacione de manera inversa a un menor tamaño de la planta bajo sequía. Núñez-Barrios *et al.* (1998) consignaron que el cierre de los estomas a 42 y 52 días después de la siembra causó una disminución en las tasas de asimilación de CO_2 donde la fotosíntesis decreció de 60 a 80% en comparación con el testigo.

Los resultados anteriores indican que el déficit hídrico en el suelo, impuesto mediante la suspensión del riego a partir de la etapa inicial de floración de los genotipos de frijol utilizados en el presente trabajo, provocó cambios metabólicos en el sistema radical, los cuales se transmitieron a las hojas, regulando la respuesta de los estomas, los cuales a su vez controlaron la salida del agua hacia la atmósfera. En la literatura se consigna que la estructura de la planta que recibe el estímulo del déficit hídrico en el suelo es la raíz, la cual sintetiza ácido abscísico (Davies y Zhang, 1991), que es transportado por el xilema hasta las hojas (Davies *et al.*, 1994), donde induce cambios en la permeabilidad de la membrana de las células guarda, las cuales liberan solutos (Roberts, 1998) hacia el citoplasma de las células acompañantes, y con ello agua, disminuyendo el potencial de turgencia que contribuye al cierre de los estomas (Ruiz *et al.*, 1993; Salisbury y Ross, 1993; Maathuis *et al.*, 1997). Asimismo, los resultados anteriores sugieren una alta sensibilidad estomática entre los genotipos utilizados, principalmente en Negro Cotaxtla 91, Bayo Criollo el Llano, Bayo Madero y BAT 477.

Otra observación importante es que BAT 477 y SEQ 12, los cuales tuvieron estomas más sensibles al tratamiento de sequía, se caracterizan por tener una alta frecuencia estomática y estomas de tamaño pequeño (datos no presentados). No existe evidencia clara si el tamaño de los estomas y la frecuencia estomática están correlacionadas con la sensibilidad estomática; sin embargo, estas características pueden ser heredables, ya que SEQ 12 es una línea derivada de BAT 477 (White, 1993).

En general, cada cultivar mostró diferencias en las características fisiológicas determinadas en el

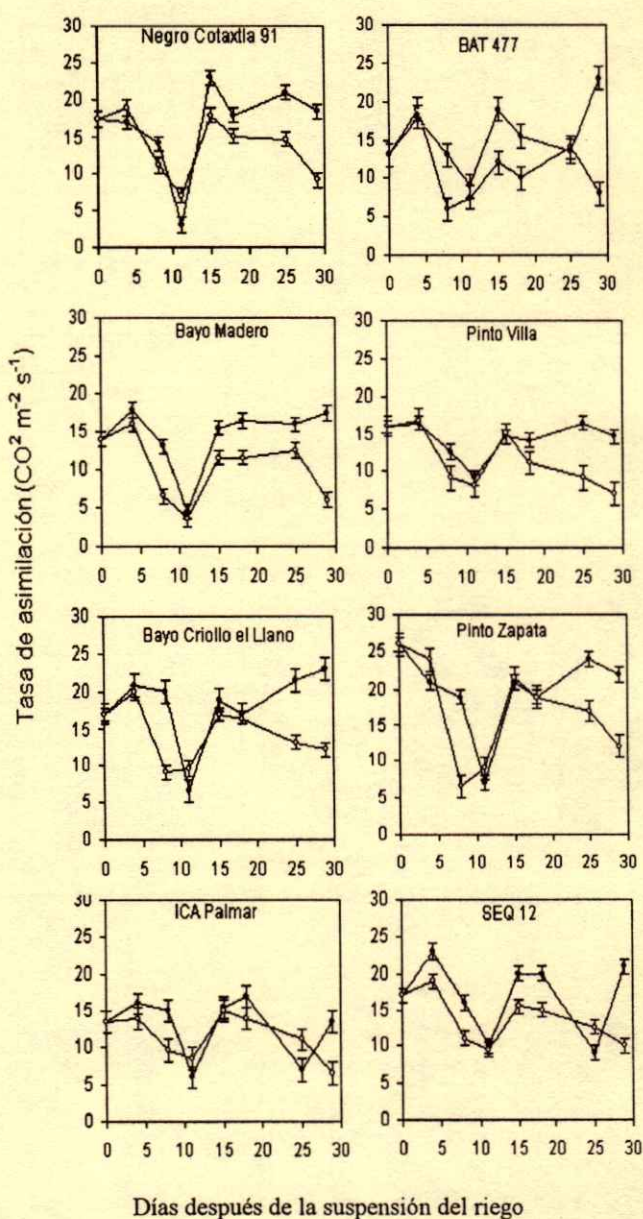


Figura 3. Efecto de la suspensión del riego (Día 0) por 29 días sobre la tasa de asimilación de CO_2 en ocho cultivares de frijol. Los símbolos cerrados indican plantas en riego y los símbolos abiertos plantas en sequía terminal. Cada punto es el promedio de cinco repeticiones y la barra vertical indica el error estándar.

presente estudio, las que contribuyeron a evadir la deshidratación a través de la reducción de la pérdida de agua en la planta. La más importante de éstas fue el cierre de los estomas al disminuir la conductancia estomática y la tasa de asimilación de CO_2 ; las diferencias observadas podrían ser substanciales debido a la respuesta de los cultivares. Genotipos de diferente hábito de crecimiento y caracterizados como

resistentes a la sequía, como Pinto Zapata, Pinto Villa, SEQ 12 e ICA Palmar, mostraron al menos en las etapas iniciales del tratamiento de sequía, un mayor control estomático.

Una explicación para la mayor sensibilidad estomática es la que ya se mencionó sobre señales químicas generadas en las raíces y enviadas a las partes aéreas de la planta a través del flujo de la transpiración (Davies *et al.*, 1994). Otra posibilidad es que los estomas de *Phaseolus vulgaris* L. sean extremadamente sensibles a bajas concentraciones del ABA (Trejo y Davies, 1991).

Es importante señalar que los genotipos ICA Palmar y SEQ 12, de hábito de crecimiento I y III, respectivamente, y clasificados como resistentes a la sequía, se caracterizaron por ser menos sensibles al efecto de la sequía sobre la tasa fotosintética. Estudios recientes indican que ICA Palmar posee la característica de tener una baja densidad de estomas en la superficie abaxial de las hojas en comparación con genotipos susceptibles a la sequía que tienen una alta densidad estomática (Aguirre *et al.*, 1999).

En el presente estudio, se encontró una gran variabilidad genética para la conductancia estomática en respuesta a la sequía terminal, así como una diferencia significativa en el patrón del cierre estomático entre los ocho genotipos de frijol. Esta característica es esencial para el mantenimiento interno del estatus de agua en condiciones de sequía crítica, la cual es una de las estrategias que contribuyen a evadir la deshidratación. (Turner, 1986). La variabilidad genética para la sensibilidad de los cambios del estatus hídrico interno y externo, se ha consignado en soya (Ciha y Brun, 1975), haba (Tanzarella *et al.*, 1984) y frijol (Markart, 1985). Esto

es importante, debido a que las características estomáticas son altamente heredables, lo cual indica la factibilidad de manipularlas genéticamente (Buttery *et al.*, 1993).

Características Fenológicas

El cultivar Negro Cotaxtla 91, de hábito de crecimiento indeterminado Tipo II y caracterizado como resistente a la sequía, fue el más tardío a la floración; mientras que los cultivares Pinto Zapata de hábito II y resistente a la sequía, así como Pinto Villa de hábito III y resistente a la sequía, y Bayo Madero de hábito III y caracterizado como susceptible a la sequía, fueron los más precoces (Cuadro 2).

La sequía disminuyó los días a la madurez fisiológica y, en consecuencia, los días de llenado del grano de los cultivares utilizados, principalmente en Bayo Madero, Pinto Zapata, Bayo Criollo el Llano y SEQ 12 (Cuadro 2). En contraste, el efecto de la sequía sobre la madurez fisiológica fue menor en Negro Cotaxtla 91, con sólo tres días de reducción. Esta respuesta podría atribuirse a las diferencias de los genotipos al fotoperiodo, ya que las primeras tres variedades de frijol se han clasificado como sensibles a dicho factor; en tanto que Negro Cotaxtla 91 es una variedad con respuesta neutral al fotoperiodo (Acosta-Gallegos y White, 1995; Acosta-Gallegos *et al.*, 1996; Rosales-Serna *et al.*, 2001). La proporción de la reducción en los días a la madurez fisiológica podría también en parte atribuirse al ciclo tardío *per se* de cada genotipo. El aceleramiento de la madurez por lo general se observa cuando el tratamiento de sequía es de duración prolongada durante la fase reproductiva y no existen condiciones favorables para la recuperación

Cuadro 2. Días a floración, madurez y duración del llenado de grano de ocho cultivares de frijol sembrados en dos condiciones de humedad del suelo en Zacatepec, Morelos, 1997-1998.

Cultivar	Días a floración		Días a madurez		Etapa de llenado de grano	
	Riego [†]	Riego	Sequía [‡]	Riego	Sequía	
Negro Cotaxtla 91	59	98	95	40	35	
BAT 477	56	98	90	42	38	
SEQ 12	49	97	86	48	37	
Pinto Zapata	43	94	81	52	39	
Pinto Villa	42	85	79	43	38	
Bayo Criollo el Llano	45	93	82	48	36	
Bayo Madero	41	92	80	51	39	
ICA Palmar	47	92	83	45	36	
Promedio	48	94	84	46	37	
DMS (P = 0.05)	4.7	1.1	2.0	0.9	2.0	

[†] Riego = humedad aprovechable a capacidad de campo durante el ciclo del cultivo.

[‡] Sequía impuesta en la etapa reproductiva al suspender el riego a 45 días después de la siembra.

de los genotipos (Ramírez-Vallejo y Kelly, 1998; Rosales-Serna *et al.*, 2001).

La máxima reducción del período de llenado del grano debida a un aceleramiento de la madurez ocurrió en los cultivares Pinto Zapata, SEQ 12, Bayo Madero, Bayo Criollo el Llano e ICA Palmar, de diferente hábito de crecimiento y respuesta a la sequía. Efectos similares de la sequía intermitente sobre la fenología se han reportado con anterioridad en frijol (Acosta-Gallegos y Kohashi-Shibata, 1989; Ramírez-Vallejo y Kelly, 1998). La respuesta y el acoplamiento de la fenología del cultivo a los factores ambientales y patrones de lluvia es reconocida como un criterio importante para el mejoramiento de la resistencia a la sequía en frijol (Ludlow y Muchow, 1990; Acosta-Gallegos y Adams, 1991; Acosta-Gallegos y White, 1995; Ramírez-Vallejo y Kelly, 1998).

Biomasa, Rendimiento de Semilla y Peso de 100 Semillas

Se observaron diferencias altamente significativas ($P < 0.001$) entre condiciones de humedad del suelo, genotipos e interacción condición de humedad x genotipo para la biomasa total del vástago, rendimiento de semilla y peso de 100 semillas. El efecto de la sequía en la etapa reproductiva fue más alto para el rendimiento de semilla que para la biomasa total del vástago. Esto se debió a que cuando ocurrió la sequía, se tornó más severa hacia el final del ciclo de cultivo, la biomasa total ya se había definido, mientras que el rendimiento aún estaba en formación. Acosta-Gallegos y Kohashi-Shibata

(1989), Acosta-Gallegos y Adams (1991) y Ramírez-Vallejo y Kelly (1998) han consignado resultados similares).

Considerando como 100% el rendimiento en el tratamiento testigo, el efecto de la sequía terminal en el rendimiento de cada cultivar fue: Negro Cotaxtla 91, 40%; BAT 477, 38%; Pinto Zapata, 43%; Pinto Villa, 38%; Bayo Criollo el Llano, 49%; Bayo Madero, 47%; ICA Palmar, 47%; y SEQ 12, 7%. Estos resultados indican que la reducción en el rendimiento por efecto del estrés hídrico es independiente de la fenología del cultivar, del hábito de crecimiento y de su respuesta a la sequía; ya que en la mayoría de ellos la reducción fue relativamente similar, con excepción de SEQ 12, en el cual la reducción fue menor que en los demás genotipos.

En general y con base en el rendimiento, los genotipos de semilla pequeña e intermedia, como Negro Cotaxtla 91, BAT 477, SEQ 12, Pinto Zapata y Pinto Villa, fueron los menos afectados por el tratamiento de sequía terminal, mientras que los genotipos de mayor tamaño de semilla, como Bayo Criollo el Llano, Bayo Madero e ICA Palmar, fueron los más afectados (Cuadro 3). Este último cultivar, de hábito de crecimiento determinado, mostró, además, el más bajo rendimiento en el tratamiento testigo.

Índice de Cosecha, Índice de Susceptibilidad a la Sequía y Media Geométrica

Se encontró una diferencia altamente significativa ($P < 0.001$) entre tratamientos de humedad del suelo y cultivares para el índice de cosecha. La mayoría de los cultivares presentaron una disminución en el

Cuadro 3. Biomasa del vástago, rendimiento de semilla y peso de 100 semillas de ocho cultivares de frijol sembrados con riego y sequía terminal en Zacatepec, Morelos. 1997-1998.

Cultivar	Biomasa del vástago		Rendimiento ¹ de grano		Peso de 100 semillas	
	Riego	Sequía	Riego	Sequía	Riego	Sequía
	----- g m ⁻² -----					
Negro Cotaxtla 91	531	330	168	101	13.8	15.6
BAT 477	571	397	227	141	14.4	15.8
SEQ 12	412	330	137	127	12.4	14.8
Pinto Zapata	676	430	386	222	30.7	28.6
Pinto Villa	444	307	271	167	33.3	27.8
Bayo Criollo el Llano	511	296	269	141	30.3	27.0
Bayo Madero	518	360	331	177	41.5	33.4
ICA Palmar	350	208	155	83	26.5	22.0
Promedio	502	332	273	145	25.4	23.1
DMS (P = 0.05)	4.7	4.2	1.1	2.0	0.9	2.0

¹ El índice de intensidad de la sequía (ISS) fue de 0.47.

índice de Cosecha en condiciones de estrés (Cuadro 4). Foster *et al.* (1995) consignaron resultados similares para otros genotipos. En la presente investigación, los cultivares Pinto Villa, Pinto Zapata, Bayo Madero y Bayo Criollo del Llano exhibieron un alto índice de cosecha en condiciones de estrés hídrico en comparación con los demás cultivares. Esta respuesta, en parte, se debió a las diferencias en la duración de las fases fenológicas, ya que dichos cultivares se caracterizaron por tener una madurez acelerada en condiciones de sequía. Acosta-Gallegos y Kohashi-Shibata (1989) consignaron resultados similares con otros genotipos de frijol de la raza Durango en condiciones de sequía. El hecho de que esos genotipos mostraran una alta proporción de la materia seca del vástago en la semilla, indica que éstos poseen el mecanismo fisiológico de alta removilización de asimilados en comparación con los demás genotipos.

De acuerdo con los resultados del índice de susceptibilidad a la sequía, el cultivar con mayor resistencia fue SEQ 12, respuesta que, sin embargo, estuvo influenciada por un bajo rendimiento en la condición de riego. Como consecuencia de lo anterior, SEQ 12 estuvo entre los cultivares que obtuvieron la media geométrica más baja (Cuadro 4). Los cultivares con el índice de cosecha y la media geométrica más altos fueron Pinto Zapata, Bayo Madero y Pinto Villa, esto debido a una alta eficiencia en la distribución de materia seca en el vástago y, en consecuencia, a un alto rendimiento con ambos tratamientos de humedad.

Cuadro 4. Índice de cosecha, índice de susceptibilidad a la sequía y media geométrica de ocho cultivares de frijol en dos condiciones de humedad del suelo, en Zacatepec, Morelos. 1997-1998.

Cultivar	Índice de cosecha		ISS [†]	MG [‡]
	Riego	Sequía		
Negro Cotaxtla 91	31	31	1.00	130
BAT 477	57	35	0.95	179
SEQ 12	33	38	0.20	132
Pinto Zapata	57	51	1.07	293
Pinto Villa	61	54	0.95	213
Bayo Criollo el Llano	53	47	1.20	195
Bayo Madero	64	49	1.17	242
ICA Palmar	33	39	1.17	113
Promedio	47.7	43.0	0.96	187

[†] ISS = índice de susceptibilidad a la sequía (Fisher y Maurer, 1978). El índice de intensidad de sequía del experimento fue de 0.47.

[‡] MG = media geométrica del rendimiento.

CONCLUSIONES

- Existe una variación genética entre los genotipos de frijol para las características fisiológicas y fenológicas que confieren adaptación a las condiciones de sequía terminal.
- En los genotipos de frijol Pinto Zapata, Pinto Villa, Bayo Criollo el Llano, Bayo Madero, ICA Palmar y SEQ 12, el escape es una característica fenológica importante relacionada con la adaptación a la sequía terminal.
- La ocurrencia de distintos mecanismos de adaptación a la sequía terminal en genotipos de frijol, sugiere la posibilidad de utilizarlos en programas de mejoramiento genético para la obtención de variedades superiores.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento proporcionado al Proyecto 3384P-B: Mecanismos de adaptación a la sequía en *Phaseolus vulgaris*.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Gallegos, J.A. y M.W. Adams. 1991. Plant traits and yield stability of dry bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars under drought stress. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 117: 213-219.
- Acosta-Gallegos, J.A. y J. Kohashi-Shibata. 1989. Effect of water stress on growth and yield of indeterminate dry-bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars. *Field Crop Res.* 20: 81-93.
- Acosta-Gallegos, J.A. y J.W. White. 1995. Phenological plasticity as an adaptation by common bean to rainfed environments. *Crop Sci.* 35: 199-204.
- Acosta-Gallegos, J.A., P. Vargas V. y J.W. White. 1996. Effect of sowing date on the growth and seed yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in highland environments. *Field Crop Res.* 49: 1-10.
- Acosta-Gallegos, J.A., E. Acosta-Díaz, S. Padilla-Ramírez, E. López-Salinas, R.A. Salinas Pérez, N. Mayek Pérez y J.D. Kelly. 1998. Seed yield of dry bean cultivars under drought stress. *Ann. Rep. Bean Improv. Coop.* 41: 151-152.
- Aguirre J.F., L.P. Ruiz, J. Kohashi-Shibata, C. Trejo López y J. Acosta-Gallegos. 1999. Morphological observations on the leaf surface of *Phaseolus vulgaris* L. and their possible relationship to stomatal response. *Ann. Rep. Bean Improv. Coop.* 42: 75-76.
- Buttery, B.R., C.S. Tan, R.I. Buzzell, J.D. Gaynor y D.C. MacTabish. 1993. Stomatal numbers of soybean and response to water stress. *Plant Soil* 149: 283-288.
- Ciha, A., J. y W.A. Brun. 1975. Stomatal size and frequency in soybean. *Crop Sci.* 15: 309-313.
- Davies, W.J. y J. Zhang. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42: 55-76.

- Davies, W.J., F. Tardeu y C. Trejo López. 1994. How do chemical signals work in plants that grow in dry soil? Update in long distance signaling. *Plant Physiol.* 104: 309-314.
- FAO. Food and Agricultural Organization. 1989. Carte mondiale des sols. Légende Révisée. Rapport sur les ressources en sols du monde 60. FAO-UNESCO. Rome. Italie.
- Fisher, R.A. y R. Maurer. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res.* 29: 807-912.
- Foster, E.F., A. Pajarito y J.A. Acosta-Gallegos. 1995. Moisture stress impact on N partitioning, N remobilization and N-use efficiency in beans (*Phaseolus vulgaris*). *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 124: 27-37.
- Kumar, A., D.P. Singh y P. Singh. 1994. Influence of water stress on photosynthesis, transpiration, water use efficiency and yield of *Brassica juncea* L. *Field Crop Res.* 37: 95-101.
- López, M., F. Fernández y A. van Schoonhoven. 1985. Frijol: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia.
- Ludlow, M.M. y R.C. Muchow. 1990. Critical evaluation of the possibilities for modifying crops for high production per unit of precipitation. *Adv. Agron.* 43: 107-153.
- Maathuis, F.J.M., A.M. Ichida, D. Sanders y J.I. Schroeder. 1997. Roles of higher plant K⁺ channels. *Plant Physiol.* 114: 1141-1149.
- Markart, A.H. 1985. Comparative water relations of *Phaseolus vulgaris* L. and *Phaseolus acutifolius* Gray. *Plant Physiol.* 77: 113-117.
- Nageswara Rao, R.C., S. Singh, M.V.K. Sivakumar, K.L. Srivastava y J.H. Williams. 1986. Effect of water deficit at different growth phases of peanut. II. Response to drought during preflowering phase. *Agron. J.* 80: 431-438.
- Núñez-Barrios, A., J. Ritchie y A.J.M. Smucker. 1998. El efecto de la sequía en el crecimiento, la fotosíntesis y la intercepción de luz en frijol común. *Agron. Mesoamericana* 9(2): 1-8.
- Ramírez-Vallejo, P. y J.D. Kelly. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica* 99: 127-136.
- Roberts, S.K. 1998. Regulation of K⁺ in maize roots by water stress and abscisic acid. *Plant Physiol.* 116: 145-153.
- Rosales-Serna, R., R. Ochoa Márquez y J.A. Acosta-Gallegos. 2001. Fenología y rendimiento del frijol en el altiplano de México y su respuesta al fotoperiodo. *Agrociencia* 35: 513-523.
- Ruiz, L.P., C.J. Atkinson y T.A. Mansfield. 1993. Calcium in xylem and its influence on the behaviour of stomata. *Philogenetics Transactions of the Royal Society of London.* London, UK.
- Salisbury, F.B. y C.W. Ross. 1993. Fisiología vegetal. Traducción al español. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F.
- Schneider, A.K., R. Rosales-Serna, F. Ibarra-Pérez, B. Cázarez-Enríquez, J.A. Acosta-Gallegos, P. Ramírez-Vallejo, N. Wassimi y D.J. Kelly. 1977. Improving common bean performance under drought stress. *Crop Sci.* 37: 43-50.
- Singh, S.P., P. Gepts y G.D. Debouck. 1991. Races of common bean (*Phaseolus vulgaris* L. Fabaceae). *Econ. Bot.* 45: 379-396.
- Tanzarella, O.A., C. DePace y A. Filippetti. 1984. Stomatal frequency and size in *Vicia faba* L. *Crop Sci.* 24: 1070-1076.
- Trejo López, C. y W.J. Davies. 1991. Drought-induced closure of *Phaseolus vulgaris* L. stomata precedes leaf water deficit and any increase in xylem ABA concentration. *J. Exp. Bot.* 42(245): 1507-1515.
- Turner, N.C. 1986. Crop water deficit: A decade of progress. *Adv. Agron.* 39: 1-51.
- Van Schoonhoven, A. y M.A. Pastor-Corrales. 1987. Sistema estándar para la evaluación de germoplasma de frijol. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia.
- Van Schoonhoven, A. y O. Voyset. 1989. Common bean in Latin America and their constraints. pp. 33-57. *In: Schwartz, H.F. y M.A. Pastor-Corrales (eds.). Bean production problems in tropics.* Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia.
- White, J.W. 1993. Implications of carbon isotope discrimination studies for breeding common bean under water deficits. pp. 383-398. *In: Ehrlinger, J.R. et al. (eds.). Stable isotopes and plant carbon-water relations.* Academic Press. San Diego, CA.

RESPUESTA DE LA PLANTA Y DEL SUELO A INOCULACIÓN CON *Glomus intraradices* Y RIZOBACTERIAS EN MAÍZ EN CULTIVO INTENSIVO

Response of Plant and Soil to *Glomus intraradices* and Rhizobacteria Inoculation of Maize under Intensive Cultivation

C. Robles^{1,2†} y J.M. Barea¹

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de la inoculación con *Glomus intraradices* y con las rizobacterias *Azospirillum brasilense* y *Bacillus subtilis* de maíz en cultivo intensivo, sobre el crecimiento vegetal y la extracción de nutrimentos, y sobre las propiedades físicas y químicas de dos suelos. Se ensayó la inoculación conjunta de los organismos en dos suelos (Luvisol y Antroposol) y se cultivó, en macetas y en condiciones de invernadero, maíz durante cinco ciclos consecutivos e ininterrumpidos de 40 días. Se evaluó el crecimiento de las plantas y su producción de biomasa aérea en cada ciclo, así como la extracción y acumulación de nutrimentos en esos tejidos. Al final del experimento, se registró la colonización micorrízica de las raíces en las plantas inoculadas y, en el suelo, la densidad de micelio extraradical (MER), la retención de agua a 0.33 y 15 bars, y el porcentaje de agregados hidroestables menores que 0.5 y 1 mm, las propiedades químicas de mayor importancia (pH y materia orgánica) y la concentración de nutrimentos extraíbles. El crecimiento y la producción de biomasa vegetal resultaron mayores debido a la inoculación, durante los dos primeros ciclos de cultivo. Aunque el desequilibrio nutrimental en las plantas, evaluado con la técnica DRIS, se incrementó a lo largo del tiempo como efecto del cultivo intensivo, la actividad de los microorganismos fue capaz de retardar este desequilibrio. La respuesta en las propiedades de los dos suelos fue marcadamente diferente, y estuvo

relacionada con el grado de fertilidad original de cada suelo. Aun cuando la densidad de MER fue incrementada, ésta no se asoció con un mayor porcentaje de agregados hidroestables, en tanto que la capacidad de retención de agua sí resultó mejorada.

Palabras clave: Micorriza arbuscular, actividad rizosférica, DRIS, agregación del suelo, maíz.

SUMMARY

The aim of this work was to evaluate the effects of inoculating maize in intensive cultivation with the soil microorganisms *Glomus intraradices*, *Azospirillum brasilense*, and *Bacillus subtilis* on plant growth and nutrient uptake, as well as on soil physical and chemical parameters. Simultaneous inoculation of the soil microorganisms in two soils (Luvisol and Atroposol) was assayed. Maize was cropped and harvested in five continuous cycles of 40 days each. We evaluated plant growth parameters and nutrient uptake in shoots in each cycle. Mycorrhizal colonization of roots in inoculated plants was evaluated at the end of the experiment. Extraradical mycelium (ERM), soil water retention capacity (0.33 and 15 bars), percentage of hydrostable aggregates (< 0.5 mm and < 1 mm), pH, percentage of organic matter, total N and extractable P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, and Cu were registered. Plant growth and shoot biomass production were greater in inoculated treatments in Cycles 1 and 2. There were no differences in subsequent cycles. Nutritional unbalance (DRIS evaluation) was greater in time, but inoculation makes the process slower. Soil response was different for each one. This difference was associated with original soil fertility status. ERM was greater in inoculated treatments but there was no relationship with the percentage of hydrostable aggregates, although water retention capacity was increased.

Index words: Arbuscular mycorrhiza, rhizospheric activity, DRIS, soil aggregation, maize.

¹ Estación Experimental del Zaidín-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Dpto. de Microbiología del Suelo y Sistemas Simbióticos. Prof. Albareda 1, 18008 Granada, España.

² Centro Interdisciplinario de Investigaciones para el Desarrollo Integral Regional-Instituto Politécnico Nacional-Oaxaca., Dpto. de Recursos Naturales. Hornos 1003, 71230 Sta. Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

[†] Autor responsable (crobles@ole.com)

INTRODUCCIÓN

Muchas especies microbianas del suelo realizan actividades que benefician a las plantas. Predación de fitopatógenos, producción de fitohormonas y sideróforos, mineralización de materia orgánica, solubilización de ortofosfatos y filosilicatos, fijación de nitrógeno atmosférico, incremento de la eficiencia de extracción de agua y nutrientes por las asociaciones micorrízicas, son algunos de los procesos y beneficios mejor conocidos (Berthelin *et al.*, 1991; Sánchez-Díaz y Honrubia, 1994; Barea y Jeffries, 1995; Olivares y Barea, 1995; Toro, 1996).

Kothari *et al.* (1990) reportaron efectos de la inoculación con el hongo formador de micorriza arbuscular (HMA) *Glomus mosseae* en maíz y de su interacción con organismos rizosféricos. Atribuyeron el incremento en la concentración y en la acumulación de P, Zn y Cu en tejidos aéreos y radicales de la planta a la actividad directa del HMA, en tanto que su interacción con los microorganismos rizosféricos afectó la adquisición de otros nutrientes, en algunos casos con incrementos y en otros con decrementos, cuya causa se atribuyó a la alteración de la morfología del sistema radical. Vázquez *et al.* (2000) inocularon plantas de maíz con los HMA *G. mosseae* y *G. deserticola*, en combinación con el microorganismo fitoestimulador *Azospirillum brasilense* y los agentes de control biológico de hongos fitopatógenos *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma harzianum*. Sólo la combinación *G. deserticola* - *A. brasilense* incrementó de forma significativa la producción de materia seca aérea y radical. Los microsimbiontes pueden modificar su rango de compatibilidad funcional con la planta hospedera en función de diversas variables, por ejemplo la propia especie vegetal, el tipo y calidad del sustrato, el ambiente de crecimiento y el manejo que recibe el sistema (Azcón, 1993; Toro *et al.*, 1996). Un factor determinante de la promoción del crecimiento por microorganismos inoculados es la combinación genotípica específica de planta y microorganismos (Chanway *et al.*, 1989).

Aun cuando se ha determinado con precisión la contribución microbiana al incremento en la absorción de algunos nutrientes, en particular los de baja movilidad en el suelo, muy poco se sabe de las variaciones que esta respuesta provoca en el equilibrio nutrimental, que puede ser determinante en el crecimiento y en la producción vegetal (Roberts y Rhee, 1993). La técnica DRIS (Diagnostic and

Recommendation Integrated System) se ha reconocido de gran utilidad para evaluar las variaciones en el equilibrio nutrimental, aunque se ha utilizado poco en la evaluación de las interacciones planta-microorganismos (Brown *et al.*, 1992). Su uso, junto con el análisis del suelo, puede dar respuestas sobre la capacidad amortiguadora del propio suelo ante los cambios promovidos por las actividades conjuntas de ambos organismos.

Los microorganismos también modifican las características fisicoquímicas del suelo. La actividad microbiana es responsable, directa e indirectamente, parcial o totalmente, de cambios en la disponibilidad nutrimental, de variaciones en el valor del pH y en el del potencial de óxido-reducción (Kirelew y Bouldin, 1987; Kirk *et al.*, 1993). Estas modificaciones están sujetas a las características del propio suelo y su capacidad amortiguadora, la cual no se ha suficientemente evaluado en el caso de la disponibilidad nutrimental afectada por las interacciones suelo-planta-microorganismos (Barea, 1991). En el caso de las propiedades físicas, el efecto de mayor consideración, del cual derivan efectos secundarios, es sobre la formación y consolidación de agregados (Tisdall, 1994).

El propósito de este trabajo fue evaluar los efectos, en un modelo de cultivo intensivo, de la inoculación de plantas de maíz con el HMA *G. intraradices* y microorganismos rizosféricos (*Azospirillum brasilense* y *Bacillus subtilis*) sobre el crecimiento, la absorción y el equilibrio nutrimental en plantas, y determinar los cambios producidos en las propiedades físicas y químicas del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño Experimental

El experimento se realizó con un diseño bifactorial con arreglo combinatorio y distribución aleatorizada, con cuatro repeticiones. El primer factor fue la inoculación conjunta con los microorganismos *Glomus intraradices*, *Azospirillum brasilense* y *Bacillus subtilis*. Los niveles para este factor fueron la inoculación (IN) o la no inoculación (NO). Este segundo tratamiento fungió como control para valorar los efectos de la actividad de los microorganismos inoculados. El segundo factor fue el uso de dos suelos: el primero (S1) es un Luvisol proveniente de la población de Peñuelas, en la Vega de Granada (España); el segundo (S2) se obtuvo de la finca de la

Estación Experimental del Zaidín en la ciudad de Granada (España), en su horizonte superficial corresponde a un Antroposol de origen muy reciente. En el Cuadro 1 se presentan los resultados del análisis fisicoquímico del horizonte superficial (0 a 25 cm) de estos suelos.

Esterilización de los Suelos

Con la finalidad de eliminar la población micorrízica nativa, ambos suelos se esterilizaron por tinalización con vapor fluyente, por una hora durante tres días consecutivos.

Especie Cultivada y Material Biológico

El Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (La Laguna, Tenerife, España) proporcionó las semillas de maíz (*Zea mays* L.) utilizadas. Las semillas corresponden a una selección masal proveniente de las Islas Canarias (España), cultivada en condiciones de temporal. Se lavaron con abundante agua corriente y se desinfectaron de manera superficial con hipoclorito de sodio a 2% y alcohol etílico a 50%.

Las especies microbianas utilizadas provienen de la colección de la Estación Experimental del Zaidín, Granada, España (Ruiz-Lozano *et al.*, 1995). El hongo *Glomus intraradices* Schenk & Smith se propagó en un sustrato compuesto de mezcla suelo-arena (2:5 w/w) esterilizada, utilizando lechuga como planta hospedadora. El inóculo fue la mezcla del sustrato con las raíces colonizadas (70% de colonización) de lechuga. La inoculación consistió en la aplicación de 10 g del inóculo por kg de suelo, en una capa homogénea subsuperficial en el momento de la siembra. Habiendo mostrado efecto promotor del crecimiento en maíz, se utilizó la rizobacteria *Azospirillum brasilense* Sp245, cultivada en medio NFB líquido en incubadora con agitación a 200 rpm por 48 h (Vázquez *et al.*, 2000). Se ajustó la densidad a 10^8 UFC mL⁻¹ y se inoculó en el momento de la siembra, sobre las semillas, con 10 mL kg⁻¹ de suelo. Toro (1996) caracterizó la cepa de *Bacillus subtilis* utilizada de alta capacidad solubilizadora de fosfatos. Se cultivó en medio líquido RC (Ramos y Callao, 1967), con condiciones de cultivo e inoculación similares a las utilizadas con *A. brasilense*. Con el fin de restituir la microbiota nativa, excepto los HMA, se adicionaron a las macetas 10 mL kg⁻¹ de suelo de un

Cuadro 1. Caracterización físico-química de dos suelos utilizados para el ensayo de la inoculación de microorganismos simbióticos (*Glomus*) y rizosféricos (*Azospirillum*, *Bacillus*) en maíz.

Parámetro	Luvisol	Antroposol
pH (agua/suelo 2:1)	8.3	8.3
Materia orgánica (%)	2.03	2.67
Arena (%)	19.3	41.6
Limo (%)	74.5	43.2
Arcilla (%)	6.2	15.2
Clasificación textural	Franco-limoso	Franco
Capacidad de retención de agua (%)		
0.33 bar	23.9	21.9
15 bar	13.9	10.0
CIC (cmol kg ⁻¹)	22.4	13.7
N _{total} (mg g ⁻¹)	1.08	1.48
P _{ext} (µg g ⁻¹)	11.3	23.1
K _{ext} (µg g ⁻¹)	246	141
Ca _{ext} (µg g ⁻¹)	350	354
Mg _{ext} (µg g ⁻¹)	180	107
Fe _{ext} (µg g ⁻¹)	6.0	11.0
Mn _{ext} (µg g ⁻¹)	8.3	13.0
Zn _{ext} (µg g ⁻¹)	0.5	3.3
Cu _{ext} (µg g ⁻¹)	2.2	9.2

filtrado del suelo correspondiente, según lo describen Frey y Schuepp (1993).

Condiciones de Cultivo

La unidad experimental fue una maceta de polietileno negro de alta densidad con capacidad para 2 kg de sustrato. La finalidad de utilizar esta reducida masa de sustrato fue asegurar que los sistemas radicales pudieran explorarlos y producir cambios en ellos. El sustrato fue una mezcla del suelo correspondiente con arena de cuarzo, lavada, cribada con malla de 2 mm y esterilizada como en el caso de los suelos, en proporción 1:1 (v/v). Se sembraron cinco ciclos consecutivos e ininterrumpidos de maíz, con duración de 40 días cada ciclo. En cada maceta creció sólo una planta. El sustrato no se alteró, excepto lo mínimo necesario para realizar la nueva siembra. Todo el experimento se desarrolló en condiciones de invernadero. El fotoperiodo fue de 16 h, con intensidad lumínica de 800 µmol m⁻² s⁻¹. La humedad relativa fluctuó de 50 a 70% y la temperatura diurna de 20 a 30 °C, en tanto que la temperatura nocturna osciló entre 15 y 25 °C. El riego se realizó con agua descalcificada cada 48 a 72 h, de acuerdo con los requerimientos hídricos de las plantas.

Variables de Respuesta

Al término de cada ciclo de cultivo se registraron los parámetros de crecimiento de las plantas (altura, número de hojas y área foliar) y la producción de materia seca aérea. Estos tejidos se analizaron para determinar las concentraciones de macro y micronutrientes (Lachica *et al.*, 1973; MAPA, 1986). Al finalizar el quinto ciclo de cultivo, se recuperaron las raíces y el suelo, después de eliminar la arena por tamizado con una malla de 2 mm. En las raíces se determinó la colonización micorrízica, siguiendo la técnica de clareo y tinción con azul de tripano (Phillips y Hayman, 1970) y la lectura en microscopio estereoscópico por la técnica de intercepción de cuadrantes (Giovannetti y Mosse, 1980). En el suelo se determinaron parámetros físicos: agregados hidroestables (Kemper y Rosenau, 1986, modificada por Bethlenfalvay y Barea, 1994), capacidad de retención de humedad (USDA, 1967); químicos: pH, materia orgánica, nitrógeno total, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu extraíbles (Watanabe y Olsen, 1965; Soltanpour y Schwab, 1977; MAPA, 1986; Lucena y Bascones, 1993); y biológicos: longitud de micelio micorrízico extraradical (MER). Para este último parámetro se utilizó la metodología descrita por Baath y Söderström (1979; 1980). Las intersecciones hifa-línea contadas se transformaron a longitud de micelio por unidad de peso de suelo utilizando la fórmula de Newman (1966):

$$R = \pi A N / 2H$$

Donde: R = longitud de micelio por unidad de peso de suelo, A = área de la placa, N = número de intersecciones hifa-línea, H = longitud total de las líneas sobre las que se contó.

Análisis Estadístico

Los datos se sometieron al análisis de varianza y, posteriormente, a la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (Steel y Torrie, 1988), para lo cual se utilizó el software Statgraphics Plus 2.0 (Manugistics, Inc., 1996). Los datos de concentración de nutrientes en los tejidos vegetales se interpretaron por el Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS, por sus siglas del inglés) (Beaufils, 1973; Walworth y Sumner, 1987),

utilizando para ello las normas reportadas por Elwali *et al.* (1985) y Roberts y Rhee (1993). Los datos analíticos de suelos se interpretaron de acuerdo con el criterio de Niveles de Suficiencia de Nutrientes Asimilables (NSNA) (ASA, 1977; Brown, 1987), utilizando las tablas de interpretación compiladas por Etchevers (1987) y Vásquez-Alarcón y Bautista-Aroche (1993).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento Vegetal

La altura de las plantas reflejó el efecto de la inoculación sólo en el primer ciclo de cultivo; en los dos siguientes, se registró la mejor condición de fertilidad de S2 comparada con S1, y, en los dos finales, no hubo efecto de ninguno de los factores ensayados. El número de hojas no fue una variable indicadora del efecto de los tratamientos, ya que no se registraron diferencias significativas entre tratamientos en ninguno de los ciclos, excepto entre suelos en el segundo. El área foliar estimada en el primer ciclo resultó claramente afectada por ambos factores, en tanto que en el último de los ciclos no se determinó efecto de ninguno. Un comportamiento de caída en la productividad siguió en ésta como en otras variables indicadoras del crecimiento (Cuadro 2). Por motivos logísticos, no fue posible determinar el valor de esta variable en los ciclos de cultivo intermedios. La producción de biomasa en cada ciclo de cultivo y acumulada fue mayor en los tratamiento inoculados que en los no inoculados, en ambos suelos (Figura 1). El incremento acumulado en producción de materia seca promovido por la inoculación fue aproximadamente de 20% en S2 y sólo de 6% en S1. Para todas las variables, las diferencias entre los tratamientos inoculado y no inoculado se redujeron con el tiempo. La causa de esto fue posiblemente el agotamiento de la fertilidad del suelo por efecto de la extracción continua de nutrientes por el cultivo intensivo y por las cosechas, como lo han señalado otros autores (Kucey *et al.*, 1989; Bethlenfalvay y Schüepp, 1994). La colonización de las raíces por *G. intraradices* resultó similar en ambos suelos, 54.2% para S1 y 57.4% para S2, determinación realizada sólo al final de los cinco ciclos de cultivo. Esta evaluación sólo se realizó al final de los cinco ciclos para no modificar la respuesta de las variables

Cuadro 2. Altura de planta, número de hojas y área foliar de plantas de maíz cultivadas por cinco ciclos consecutivos e ininterrumpidos de 40 días en dos suelos (S1 y S2), que recibieron (IN) o no (NO) inoculación con microorganismos simbióticos (*Glomus*) y rizosféricos (*Azospirillum*, *Bacillus*).

Ciclo	Inoculación microbiana	Tipo de suelo	Altura cm	No. de hojas	Área foliar cm ²
1	Inoculado	S1	37.6 b	9.8 a	786.4 a
		S2	38.8 b	9.8 a	1836.1 b
	No inoculado	S1	25.3 a	9.0 a	722.2 a
		S2	34.9 a	9.3 a	1425.6 b
2	Inoculado	S1	25.3 a	7.3 a	n.d.
		S2	42.2 b	11.3 b	
	No inoculado	S1	23.7 a	7.5 a	
		S2	51.7 b	9.8 b	
3	Inoculado	S1	24.5 ab	8.0 a	n.d.
		S2	31.8 b	9.8 a	
	No inoculado	S1	22.2 a	7.5 a	
		S2	29.8 ab	9.8 a	
4	Inoculado	S1	21.1 a	8.0 a	n.d.
		S2	32.5 b	8.0 a	
	No inoculado	S1	17.7 a	7.8 a	
		S2	23.4 a	8.0 a	
5	Inoculado	S1	13.0 a	5.8 a	190.8 a
		S2	12.6 a	5.0 a	199.6 a
	No inoculado	S1	14.2 a	5.3 a	183.6 a
		S2	13.0 a	5.0 a	192.4 a

En cada uno de los ciclos, valores seguidos con la misma letra no son significativamente diferentes entre sí, de acuerdo con la prueba de la DSH de Tukey ($P < 0.05$). n.d. = no determinado.

físicas del suelo con la alteración provocada por el muestreo. Estos valores indican que la micorriza estuvo presente y activa a lo largo de los cinco ciclos de cultivo, que sólo ejerció su actividad en el incremento en las tasas de absorción de nutrientes y, por lo tanto, en el incremento en las tasas de producción de biomasa vegetal, pero que esos nutrientes fueron absorbidos de las mismas fuentes de donde lo hicieron las raíces no colonizadas, como lo han señalado Kothari *et al.* (1990), Bolan (1991) y Toro (1996).

Absorción Nutricional

Se reportan las concentraciones de ocho nutrientes en el tejido aéreo de las plantas de maíz, para los Ciclos 1, 3 y 5 (Cuadro 3), así como la cantidad acumulada en el tejido aéreo (Cuadro 4). Al expresarlas como concentración, muchas de las diferencias encontradas como efecto depresivo de la inoculación se explican fácilmente por el efecto de dilución (Kothari *et al.*, 1990). Este mismo efecto fue responsable de los casos en que se encontró mayor concentración en las plantas inoculadas crecidas en S1

en comparación con S2. Al ser reportados como nutrientes extraídos por planta, el comportamiento de todos ellos refleja el efecto del cultivo en el

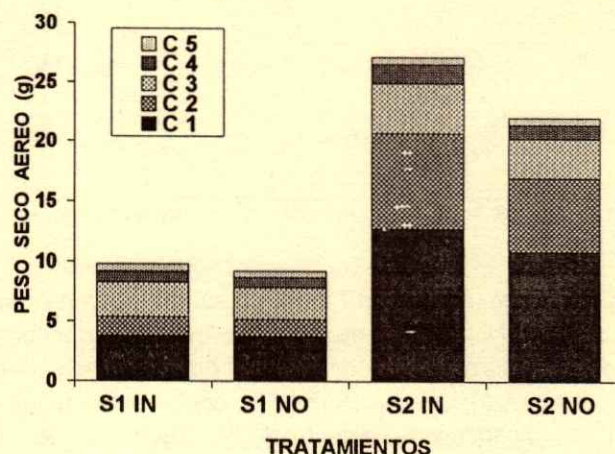


Figura 1. Peso seco de tejido aéreo de plantas de maíz que crecieron por 40 días en cinco ciclos consecutivos e ininterrumpidos en dos suelos (S1 y S2) y que recibieron (IN) o no (NO) inoculación con microorganismos simbióticos (*Glomus*) y rizosféricos (*Azospirillum*, *Bacillus*).

Cuadro 3. Concentración de macro- y micronutrientes en tejido aéreo de plantas de maíz cultivadas por cinco ciclos consecutivos e ininterrumpidos de 40 días en dos suelos (S1 y S2), que recibieron (IN) o no (NO) inoculación con microorganismos simbióticos (*Glomus*) y rizosféricos (*Azospirillum*, *Bacillus*).

Ciclo	Inoculación microbiana	Tipo de suelo	mg g ⁻¹					µg g ⁻¹			
			N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	
1	Inoculado	S1	10.0 a	1.5 a	30.4 b	6.2 a	4.6 ab	259 a	62 a	32 a	
		S2	10.9 a	1.5 a	17.8 a	7.4 a	5.2 ab	318 a	97 c	46 b	
	No inoculado	S1	9.2 a	1.6 a	29.4 b	5.8 a	3.8 a	265 a	64 a	22 a	
		S2	13.8 a	1.6 a	18.5 a	6.4 a	6.1 b	246 a	84 b	52 b	
3	Inoculado	S1	7.0 b	2.2 a	17.1 ab	7.6 a	5.0 b	274 a	40 a	38 a	
		S2	5.1 a	2.9 bc	11.9 a	5.9 a	4.5 ab	184 a	58 b	66 b	
	No inoculado	S1	5.8 ab	2.5 ab	19.8 b	5.8 a	3.5 a	167 a	39 a	37 a	
		S2	5.3 a	3.2 c	13.1 ab	4.9 a	5.0 b	196 a	72 b	64 b	
5	Inoculado	S1	12.0 a	5.3 ab	10.7 a	10.4 a	7.9 a	264 c	72 b	60 a	
		S2	12.7 a	4.7 a	11.6 a	14.9 b	9.9 b	82 a	87 b	79 b	
	No inoculado	S1	12.2 a	5.5 b	9.2 a	10.5 a	8.3 a	158 ab	41 a	74 ab	
		S2	11.9 a	4.6 a	11.2 a	13.0 b	8.9 ab	131 ab	78 b	76 ab	

En cada uno de los ciclos, valores seguidos con la misma letra no son significativamente diferentes entre sí, de acuerdo con la prueba de la DSH de Tukey ($P < 0.05$).

Cuadro 4. Nutrientes extraídos y acumulados en el tejido aéreo de plantas de maíz cultivadas por cinco ciclos consecutivos e ininterrumpidos de 40 días en dos suelos (S1 y S2), que recibieron (IN) o no (NO) inoculación con microorganismos simbióticos (*Glomus*) y rizosféricos (*Azospirillum*, *Bacillus*).

Ciclo	Inoculación microbiana	Tipo de suelo	mg pl ⁻¹					µg pl ⁻¹			
			N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	
1	Inoculado	S1	38.1 a	5.7 a	115.8 a	23.6 a	17.5 a	987 a	236 a	122 b	
		S2	139.2 b	19.2 a	227.3 b	94.5 c	66.4 b	4061 c	1239 c	587 c	
	No inoculado	S1	34.6 a	6.0 b	110.5 a	21.8 a	14.3 a	996 a	241 a	83 a	
		S2	149.9 b	17.4 b	200.9 b	69.5 b	66.2 b	2672 b	912 b	565 c	
3	Inoculado	S1	20.2 b	6.4 a	49.4 a	22.0 b	14.5 b	792 b	116 a	110 a	
		S2	21.3 b	12.1 c	49.6 a	24.6 b	18.8 b	767 b	242 b	275 c	
	No inoculado	S1	15.3 a	6.6 a	52.3 a	15.3 a	9.2 a	441 a	103 a	98 a	
		S2	17.4 a	10.5 b	43.0 a	16.1 a	16.4 b	643 b	236 b	210 b	
5	Inoculado	S1	7.3 a	3.2 b	6.5 b	6.3 a	4.8 a	161 c	44 b	37 a	
		S2	7.4 a	2.7 a	6.7 b	8.6 b	5.7 b	48 a	50 b	46 a	
	No inoculado	S1	6.7 a	3.0 b	5.1 a	5.8 a	4.6 a	87 b	23 a	41 a	
		S2	7.0 a	2.7 a	6.6 b	7.7 b	5.3 ab	77 b	46 b	45 a	

En cada uno de los ciclos, valores seguidos con la misma letra no son significativamente diferentes entre sí, de acuerdo con la prueba de la DSH de Tukey ($P < 0.05$).

agotamiento de la fertilidad del suelo. En todos los casos, la cantidad extraída sigue el comportamiento determinado por la producción de biomasa, esto es, la tendencia es decreciente con el tiempo, independientemente del tipo de suelo o de la inoculación.

El comportamiento concuerda con lo reportado por Enkhtuya *et al.* (2000), quienes encontraron, en experimentos de inoculación de HMA en maíz realizados en macetas, utilizando como sustrato suelos degradados y/o contaminados, que los parámetros de crecimiento vegetal resultaron afectados por los tipos

de suelo utilizados, mientras que no hubo efectos significativos de la inoculación. Darrah (1993) ha señalado que la cantidad de nutrientes inmovilizada por la biomasa microbiana es insignificante comparada con la cantidad requerida y extraída por los vegetales, de manera que éstos son los responsables finales del agotamiento de la fertilidad del suelo. En el modelo de manejo intensivo seguido en este trabajo, puede atribuirse el comportamiento decreciente con el tiempo de la producción de biomasa y la extracción de nutrientes a la especie vegetal, en tanto que el papel de los microorganismos

inoculados fue minimizado frente a los requerimientos y tasas de extracción de la planta.

Al analizar el comportamiento de la nutrición por el método DRIS, se determinó que los desequilibrios nutrimentales aumentaron de manera gradual con el tiempo, en ambos suelos (Cuadro 5). El efecto de la inoculación fue marcadamente diferente en ellos. En S1, la inoculación redujo la tasa de desequilibrio a partir del tercer ciclo, comparada con el tratamiento no inoculado, lo que queda de manifiesto por el valor del Índice de Desequilibrio Nutrimental (IDN) respectivo. En S2, no se registró ese efecto, por lo que el desequilibrio nutrimental aumentó incluso un poco más en las plantas inoculadas que en las no inoculadas. Para S1, los nutrientes sobre los que resultó notorio el efecto de la inoculación fueron Fe y Mn. En ambos suelos, el manejo del cultivo en forma intensiva produjo un incremento constante en el desequilibrio del K, efecto que no pudo evitar la inoculación. El efecto llegó a ser de magnitud tal que en el quinto ciclo, el K desplazó al N como nutriente más requerido, excepto en el tratamiento S2 IN. El equilibrio del P fue mejorado con todos los tratamientos, lo que permitió que éste saliera de la lista de nutrientes requeridos en el último ciclo. Ca, Mg y Zn no sufrieron ninguna alteración de consideración en sus equilibrios por efecto de ninguno

de los tratamientos. El efecto de la inoculación de microorganismos simbióticos y rizosféricos sobre el balance nutrimental en plantas se ha poco analizado. Herrera *et al.* (1984) revisaron el efecto de la fertilización y la inoculación con HMA sobre el balance de macronutrientes (N/P, K/P, N/K) en el follaje de las plantas. Concluyeron que, sin depender de la cantidad de P disponible en el sustrato, se obtienen altos valores de colonización micorrizica en las raíces cuando las relaciones entre esos nutrientes se acercan a valores estándar determinados. Sugirieron también que las plantas poseen algún mecanismo de autorregulación que, en determinadas ocasiones, con concentraciones de N, P y K desbalanceadas en el sustrato, resultan en un balance nutrimental adecuado, independientemente de que lo sea para el endófito, o de la actividad que éste pueda desarrollar. Brown *et al.* (1992) utilizaron el DRIS para evaluar la distribución de nutrientes en presencia de micorriza arbuscular, entre plantas de soya y maíz cultivadas en asociación. El balance nutrimental de ambas especies resultó beneficiado con el hecho de asociarlas, ya que, en los dos casos, el IDN resultó significativamente disminuido. Aunque el orden de requerimiento de los nutrientes no cambió, sí lo hizo la magnitud de sus índices, lo que indicó un efecto positivo de la actividad de la MA en el cultivo

Cuadro 5. Resultados del análisis del equilibrio nutrimental en tejido aéreo de plantas de maíz por la técnica del Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS).

Inoculación microbiana	Tipo de suelo	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	ORN	IDN
Primer ciclo											
Inoculado	S1	-17.7	-10.2	9.4	4.5	12.4	-2.8	-3.2	7.6	N>P>Mn>Fe	67.8
	S2	-16.6	-10.8	-3.3	7.1	12.5	-1.2	1.5	10.9	N>P>Fe	63.7
No inoculado	S1	-18.3	-8.2	10.6	4.8	10.9	-1.0	-1.8	2.9	N>P>K>Fe>Mn	58.2
	S2	-13.0	-10.3	-2.8	4.7	14.5	-5.0	-0.2	12.1	N>P>Fe>K>Mn	62.6
Tercer ciclo											
Inoculado	S1	-20.5	-1.0	-2.3	9.1	13.4	-0.9	-7.8	10.0	N>Mn>K>P>Fe	64.9
	S2	-21.4	5.2	-7.3	6.2	11.3	-5.8	-2.8	15.3	N>K>Fe>Mn	68.4
No inoculado	S1	-22.1	3.4	2.8	6.7	9.5	-6.3	-6.6	11.7	N>Mn>Fe	76.2
	S2	-22.3	6.1	-6.5	2.6	12.1	-5.8	-1.0	14.7	N>K>Fe>Mn	71.1
Quinto ciclo											
Inoculado	S1	-15.6	8.5	-16.0	8.4	13.8	-5.4	-4.6	10.8	K>N>Fe>Mn	83.2
	S2	-13.3	5.1	-13.3	11.9	15.2	-16.4	-2.0	12.7	K>N>Fe>Mn	90.0
No inoculado	S1	-12.1	9.5	-16.4	9.0	14.3	-9.1	-8.3	13.3	Fe>K>N>Mn	92.0
	S2	-14.6	5.7	-14.0	11.0	14.6	-12.8	-2.9	12.9	N>K>Fe>Mn	88.0

El maíz se cultivó por cinco ciclos consecutivos e ininterrumpidos de 40 días en dos suelos (S1 y S2), y recibió (IN) o no (NO) inoculación con microorganismos simbióticos (*Glomus*) y rizosféricos (*Azospirillum*, *Bacillus*). Se reportan los valores de los índices para cada nutriente, el orden de requerimiento nutrimental (ORN) y el índice de desbalance nutrimental (IDN) para cada tratamiento, en los Ciclos 1, 3 y 5.

asociado. El presente trabajo constituye el primer reporte de la utilización de la técnica DRIS para evaluar los cambios en el balance nutrimental por efecto de la inoculación de otros organismos rizosféricos, en adición a los HMA. Parece claro que el efecto diferencial registrado entre los suelos fue debido a las diferencias en la fertilidad entre ambos.

Parámetros del Suelo

El efecto de la inoculación fue significativo para la longitud de MER, con 44.5 y 102.1% de incremento con respecto al tratamiento no inoculado (en estos tratamientos, el MER encontrado es el que había en los suelos al inicio del ensayo y previo a la esterilización) en S1 y S2, respectivamente. Sin embargo, esto no tuvo repercusión sobre la formación de agregados hidroestables de ninguna de las dos fracciones determinadas. La retención de humedad resultó incrementada sólo para S2, a ambas tensiones hídricas, mientras que en S1 no se registraron efectos significativos (Cuadro 6). Diversos autores han encontrado relaciones directas entre el porcentaje de agregados hidroestables y la magnitud de las poblaciones y/o actividades microbianas en el suelo, específicamente con la densidad del MER (Tisdall, 1994; Tisdall *et al.*, 1997). El mecanismo de acción para este proceso involucra una acción mecánica, consistente en que las hifas de los hongos enlazan las partículas y las mantienen unidas, y otro bioquímico, consistente en la exudación de sustancias mucilaginosas que actúan como cementantes (Miller y Jastrow, 1992). Se ha demostrado que el MER produce glomalina, una glicoproteína de naturaleza hidrofóbica similar a las de las gomas (Wright y Upadhyaya, 1998). Sin embargo, en el proceso de formación y estabilización de la estructura del suelo intervienen muchos factores, por lo que resulta complicado diferenciar y cuantificar los efectos

específicos de la microbiota de los causados por los componentes químicos del propio suelo (Schreiner y Bethlenfalvay, 1995) o de los provocados por las raíces de las plantas (Thomas *et al.*, 1993). Morel *et al.* (1991) reportaron un espectacular e inmediato aumento en la cantidad de agregados hidroestables en dos tipos de suelo, después de incorporarles mucilago proveniente de raíces de maíz. Sin embargo, el porcentaje de agregados decreció con el paso del tiempo, de manera paralela a la degradación microbiana del mucilago. En el presente trabajo debió ocurrir un proceso similar al descrito, maximizado por la larga duración del experimento, que no permitió que se apreciara un efecto significativo de la inoculación sobre la cantidad de agregados hidroestables, a pesar de haberse registrado un gran incremento en la cantidad de MER. Los resultados de Laheurte y Berthelin (1988) refuerzan esta hipótesis, dado que estos autores demostraron que el mucilago excretado por plantas de maíz resultó disminuido cuando se inoculó la bacteria solubilizadora de fosfato *Enterobacter agglomerans*, lo que atribuyeron a su degradación directa por esta bacteria. El significativo incremento en la capacidad de retención de humedad puede ser atribuido a un posible aumento en la fracción húmica de la materia orgánica, causado a su vez por la presencia y degradación de las raíces de las plantas y los productos y tejidos microbianos (Porta *et al.*, 1994). Los efectos de la inoculación de microorganismos simbióticos y rizosféricos sobre esta variable aún deben estudiarse con mayor amplitud.

Los efectos de la inoculación sobre los parámetros químicos del suelo se reportan en el Cuadro 7. El pH se incrementó en S2, mientras que en S1 no hubo efecto. Excepto para el Fe extraíble, en el resto de las variables estudiadas no se registraron efectos significativos de la inoculación en ninguno de los suelos. Sin embargo, en el caso del P extraíble se registró una tendencia a disminuir su concentración en

Cuadro 6. Parámetros físicos del suelo relacionados con la densidad de micelio extraradical (MER) de hongos formadores de micorriza arbuscular (HMA), en dos suelos (S1 y S2) cultivados con maíz durante cinco ciclos consecutivos e ininterrumpidos de 40 días, y que recibió (IN) o no (NO) inoculación con microorganismos simbióticos (*Glomus*) y rizosféricos (*Azospirillum*, *Bacillus*).

Inoculación microbiana	Tipo de suelo	MER mg suelo ⁻¹	Retención de agua		Agregados hidroestables	
			0.33 atm	15 atm	< 1 mm	< 0.5 mm
			----- % -----		----- % -----	
Inoculado	S1	2.14 b	25.1 c	12.6 bc	4.5 a	6.8 a
	S2	2.93 c	21.9 b	11.1 b	6.8 b	9.0 b
No inoculado	S1	1.48 a	26.5 c	14.1 c	5.0 a	7.1 a
	S2	1.45 a	20.0 a	7.8 a	6.5 b	8.9 b

En cada columna, valores seguidos con la misma letra no son significativamente diferentes entre sí, de acuerdo con la prueba de la DSH de Tukey (P < 0.05).

Cuadro 7. Parámetros fisicoquímicos y nutrimentales de dos suelos (S1 y S2) en los que se cultivó maíz durante cinco ciclos consecutivos e ininterrumpidos de 40 días, y que recibió (IN) o no (NO) inoculación con microorganismos simbióticos (*Glomus*) y rizosféricos (*Azospirillum*, *Bacillus*).

Inoculación microbiana	Tipo de suelo	pH	Materia orgánica	N _t	P _{ex}	K _{ex}	Mg _{ex}	Fe _{ex}	Mn _{ex}	Zn _{ex}	Cu _{ex}
			%	mg g ⁻¹		μg g ⁻¹					
Inoculado	S1	8.51 a	1.80 a	1.05 a	2.03 a	82.3 b	248 b	10.4 a	2.9 a	0.59 a	2.70 a
	S2	8.69 c	2.20 b	1.22 b	6.26 b	36.7 a	111 a	17.0 c	5.8 b	3.21 b	9.47 b
No inoculado	S1	8.52 a	1.75 a	1.03 a	2.19 a	93.7 b	231 b	12.1 ab	3.0 a	0.53 a	2.67 a
	S2	8.59 b	2.33 b	1.22 b	6.45 b	35.6 a	113 a	14.7 bc	5.7 b	3.05 b	9.20 b

En cada columna, valores seguidos con la misma letra no son significativamente diferentes entre sí, de acuerdo con la prueba de la DSH de Tukey (P < 0.05).

el tratamiento inoculado en comparación con el no inoculado, en ambos suelos. Esta tendencia significó una reducción de 7.9% en S1 y 3.1% en S2. El comportamiento de los suelos fue diferente para el caso del Fe, pues la inoculación significó su reducción en S1, mientras que para S2 resultó en incremento.

Ha sido ampliamente demostrado que las plantas utilizan las mismas fuentes de nutrimentos asimilables, estén o no colonizadas (Barea, 1991). Otro hecho confirmado es que las plantas micorrizadas extraen mayor cantidad de fósforo, y otros nutrimentos, que sus correspondientes controles. Algunas especies de bacterias acidificantes del medio tienen la capacidad de disolver fuentes de fósforo de baja solubilidad, incrementando su disponibilidad para las plantas y, con ello, incrementar las tasas de extracción por las plantas colonizadas (Toro, 1996). Este mismo efecto puede tener relación con la liberación o inmovilización del hierro. Se ha demostrado que la actividad de los HMA y otros microorganismos rizosféricos puede mejorar, al paso del tiempo, los parámetros fisicoquímicos y biológicos de suelos en ecosistemas desertificados sujetos a procesos de reforestación (Requena *et al.*, 2001), pero no es el caso de agrosistemas en cultivo intensivo con extracción de la biomasa total aérea, como en este experimento.

CONCLUSIONES

- La respuesta vegetal a la inoculación fue positiva en los dos primeros ciclos de cultivo, posteriormente este efecto se disminuyó hasta perderse, con independencia del tipo de suelo. Los parámetros que presentaron esta respuesta fueron los indicadores de crecimiento y la extracción de nutrimentos. La concentración de éstos en el tejido vegetal aéreo no tuvo un comportamiento consistente. El desbalance

nutrimental, determinado con la técnica DRIS, se aumentó con el tiempo por efecto del cultivo intensivo. La inoculación tuvo un efecto retardador del desbalance sólo en uno de los suelos (S1), mientras que en el otro no se detectó efecto. El fósforo fue el elemento cuyo balance fue mejorado por la inoculación, debido a la acción conjunta de la bacteria solubilizadora de fosfato y el hongo MA. Aun cuando la densidad de MER resultó incrementada por efecto de la inoculación, esto no se reflejó en otros parámetros físicos del suelo, en particular el porcentaje de agregados hidrostables. Se registró una tendencia decreciente en la concentración de fósforo extraíble del suelo por efecto de la inoculación, que estuvo asociada con las mayores tasas de extracción por las plantas en esos tratamientos.

- El cultivo intensivo de un suelo, sin prácticas de reposición de elementos nutrimentales, lleva a su agotamiento y/o degradación, aun aplicando prácticas de manejo consideradas sostenibles, como es el caso de la inoculación con microorganismos benéficos.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para realizar estudios doctorales. Este trabajo fue financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (AMB95-0699) del estado Español.

LITERATURA CITADA

- ASA. American Society of Agronomy. 1977. Soil testing: Correlating and interpreting the analytical results. Special Publ. 29. Madison, WI.
- Azcón, R. 1993. Growth and nutrition of nodulated mycorrhizal and non-mycorrhizal *Hedysarum coronarium* as a result of treatment with fractions from a plant growth-promoting rhizobacteria. Soil Biol. Biochem. 25: 1037-1042.

- Baath, E. y B. Söderström. 1979. Fungal biomass and fungal immobilization of plant nutrients in Swedish coniferous forest soils. *Revue d'Écologie et de Biologie du Sol* 16: 477-489.
- Baath, E. y B. Söderström. 1980. Comparisons of the agar-film and membrane-filter methods for the estimation of hyphal lengths in soil, with particular reference to the effect of magnification. *Soil Biol. Biochem.* 12: 385-387.
- Barea, J.M. 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhizae as modifiers of soil fertility. *Adv. Soil Sci.* 15: 1-40.
- Barea, J.M. y P. Jeffries. 1995. Arbuscular mycorrhizas in sustainable soil-plant systems. pp. 521-560. *In: Hock, B. y A. Varma (eds.). Mycorrhiza: Structure, function, molecular biology and biotechnology.* Springer-Verlag, Heidelberg, Germany.
- Beaufils, E.R. 1973. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). A general scheme of experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. *Soil Sci. Bull.* 1. University of Natal, Pietermaritzburg, South Africa.
- Berthelin, J., C. Leyval, F. Laheurte y P. de Giudici. 1991. Involvement of roots and rhizosphere microflora in the chemical weathering of soil minerals. pp. 187-200. *In: Atkinson, D. (ed.). Plant root growth: An ecological perspective.* Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
- Bethlenfalvay, G.J. y J.M. Barea. 1994. Mycorrhizae in sustainable agriculture. I. Effects on seed yield and soil aggregation. *Am. J. Altern. Agric.* 9: 157-161.
- Bethlenfalvay, G.J. y H. Schuepp. 1994. Arbuscular mycorrhizas and agrosystem stability. pp. 117-131. *In: Gianinazzi, S. y H. Schuepp (eds.) Sustainable agriculture and natural ecosystems.* Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland.
- Bolan, N.S. 1991. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant Soil* 134: 189-207.
- Brown, J.R. 1987. Soil testing: Sampling, correlation, calibration and interpretation. *Soil Science Society of America.* Madison, WI.
- Brown, M.S., R. Ferrera-Cerrato y G.J. Bethlenfalvay. 1992. Mycorrhiza-mediated nutrient distribution between associated soybean and corn plants evaluated by the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). *Symbiosis* 12: 83-94.
- Chanway, C.P., R.K. Hynes y L.M. Nelson. 1989. Plant growth-promoting rhizobacteria: Effects on growth and nitrogen fixation of lentil (*Lens esculenta* Moench) and pea (*Pisum sativum* L.). *Soil Biol. Biochem.* 21: 511-517.
- Darrah, P.R. 1993. The rhizosphere and plant nutrition: A quantitative approach. *Plant Soil* 155/156: 1-20.
- Elwali, A.M.O., G.J. Gascho y M.E. Sumner. 1985. DRIS norms for 11 nutrients in corn leaves. *Agron. J.* 77: 506-508.
- Enkhtuya, B., J. Rydlová y M. Vosátka. 2000. Effectiveness of indigenous and non-indigenous isolates of arbuscular mycorrhizal fungi in soils from degraded ecosystems and man-made habitats. *Appl. Soil Ecol.* 14: 201-211.
- Etchevers, J.D. 1987. Interpretación de los análisis químicos de suelo. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México.
- Frey, B. y H. Schuepp. 1993. Acquisition of nitrogen by external hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Zea mays* L. *New Phytol.* 124: 221-230.
- Giovannetti, M. y B. Mosse. 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular infection in roots. *New Phytol.* 84: 489-500.
- Herrera, R.A., R.L. Ferrer, M.O. Orozco, G. Hernández y V. Vancura. 1984. Fertilización y micorrizas. II. Análisis del balance de macroelementos en varios experimentos. *Acta Bot. Cub.* 20: 111-141.
- Kemper, W.D. y R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. pp. 425-442. *In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis. Part I. Agronomy Monograph 9.* American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Kirk, G.J.D., C.B.M. Begg y J.L. Solivas. 1993. The chemistry of the lowland rice rhizosphere. *Plant Soil* 155/156: 83-86.
- Kirlew, P.W. y D.R. Bouldin. 1987. Chemical properties of the rhizosphere in an acid subsoil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 128-132.
- Kothari, S.K., H. Marschner y V. Römheld. 1990. Direct and indirect effects of VA mycorrhizal fungi and rhizosphere microorganisms on acquisition of mineral nutrients by maize (*Zea mays* L.) in a calcareous soil. *New Phytol.* 116: 637-645.
- Kucey, R.M.N., H.H. Jenzen y M.E. Leggett. 1989. Microbially mediated increases in plant-available phosphorus. *Adv. Agron.* 42: 199-226.
- Lachica, M., A. Aguilar y J. Yañez. 1973. Análisis foliar. Métodos analíticos utilizados en la Estación Experimental del Zaidín. *Anal. Edafol. Agrobiol.* 32: 1033-1047.
- Laheurte, F. y J. Berthelin. 1988. Effect of a phosphate solubilizing bacteria on maize growth and root exudation over four levels of labile phosphorus. *Plant Soil* 105: 11-17.
- Lucena, J.J. e I. Bascones. 1993. AB-DTPA cation extraction in Spanish soil samples. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24: 2427-2440.
- Manugistics, Inc. 1996. User's Manual for Statgraphics Plus. Rockville, MD.
- MAPA. 1986. Métodos Oficiales de Análisis. Tomo III. Dirección General de Política Alimentaria. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.
- Miller, R.M. y J.D. Jastrow. 1992. The role of mycorrhizal fungi in soil conservation. pp. 29-44. *In: Bethlenfalvay, G.J. y R.G. Linderman (eds.). Mycorrhizae in sustainable agriculture.* ASA Special Publication 54. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Morel, J.L., L. Aviv, S. Plantureux y A. Guckert. 1991. Influence of maize root mucilage on soil aggregate stability. *Plant Soil* 136: 111-119.
- Newman, E.I. 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.* 3: 139-145.
- Olivares, J. y J.M. Barea. 1995. Fijación y movilización biológica de nutrientes. *Front. Cien. Tecnol.* 8: 42-44.
- Phillips, D.A. y D.S. Hayman, 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55: 158-161.
- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundiprensa. Madrid, España.
- Ramos, A. y V. Callao. 1967. El empleo de la solubilización de fosfatos en placa como técnica diferencial bacteriana. *Microbiología Española* 20: 1-2.
- Requena, N., E. Pérez-Solis, C. Azcón-Aguilar, P. Jeffries y J.M. Barea. 2001. Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. *Appl. Environ. Microbiol.* 67: 495-498.

- Roberts, S. y J.K. Rhee. 1993. Critical nutrient concentrations and DRIS analysis of leaf and grain from high-yielding corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24: 2679-2687.
- Ruiz-Lozano, J.M., M. Gómez y R. Azcón. 1995. Influence of different *Glomus* species on the time-course of physiological plant responses to progressive drought stress periods. *Plant Sci.* 110: 37-44.
- Sánchez-Díaz, M. y M. Honrubia. 1994. Water relations and alleviation of drought stress in mycorrhizal plants. pp. 167-178. In: Gianinazzi, S. y H. Schüepp (eds.). Impact of arbuscular mycorrhizas on sustainable agriculture and natural ecosystems. Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland.
- Schreiner, R.P. y G.J. Bethlenfalvay. 1995. Mycorrhizal interactions in sustainable agriculture. *Crit. Rev. Biotech.* 15: 271-285.
- Soltanpour, P.N. y A.P. Schwab. 1977. A new soil test for simultaneous extraction of macro- and micro-nutrients in alkaline soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 8: 195-207.
- Steel, R.G. y J.H. Torrie. 1988. Bioestadística: Principios y procedimientos. Trad. al español por R. Martínez B. McGraw-Hill, México, D.F.
- Thomas, R.S., R.L. Granzón y G.J. Bethlenfalvay. 1993. Separation of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and root effects on soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 77-81.
- Tisdall, J.M. 1994. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant Soil* 159: 115-121.
- Tisdall, J.M., S.E. Smith y P. Rengasamy. 1997. Aggregation of soil by fungal hyphae. *Austr. J. Soil Res.* 35: 55-60.
- Toro G., M. 1996. Interacción de bacterias solubilizadoras de fosfatos y micorrizas arbusculares en la optimización del uso de rocas fosfóricas y su evaluación mediante la aplicación de técnicas isotópicas. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Granada, España.
- Toro, M., R. Azcón y R. Herrera. 1996. Effects on yield and nutrition of mycorrhizal and nodulated *Pueraria phaseoloides* exerted by P-solubilizing rhizobacteria. *Biol. Fert. Soils* 21: 23-29.
- USDA. US Department of Agriculture. 1967. Soil survey. Laboratory methods and procedures for collecting soil samples. Soil Survey Investigation Rep. 1. Soil Conservation Service. Washington, D.C.
- Vásquez-Alarcón, A. y N. Bautista-Aroche. 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Vázquez, M.M., S. César, R. Azcón y J.M. Barea. 2000. Interactions between mycorrhizal fungi and other microbial inoculants (*Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*) and their effects on microbial populations and enzyme activities in the rhizosphere of maize plants. *Appl. Soil Ecol.* 15: 261-272.
- Walworth, J.L. y M.E. Sumner. 1987. The Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). *Adv. Soil Sci.* 6: 139-188.
- Watanabe, F.S. y S.R. Olsen. 1965. Test of an Ascorbic Acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil. *Soil Sci. Soc. Proc.* 29: 677-678.
- Wright, S.F. 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.

PRODUCTIVIDAD DEL TEPETATE CON SISTEMAS ROTACIONALES

Productivity of Hardened Volcanic Soil under Rotatory Systems

Hermilio Navarro-Garza^{1†}, Antonia Pérez-Olvera¹ y Diego Flores-Sánchez¹

RESUMEN

Los tepetates se originan de horizontes subyacentes que afloran a la superficie por la erosión ocasionada por mal manejo. En el centro de México ocupan más de 300 mil ha; la superficie es importante en América Latina. Estos suelos son de interés actual con fines de producción agrícola; sin embargo, es insuficiente el registro y conocimiento de sus resultados productivos anuales y acumulados a mediano y largo plazo. La metodología identificó al fragipan como el tepetate con mayor superficie territorial, en consecuencia, fue seleccionado para evaluar sus limitantes productivas y prospectar alternativas. El protocolo experimental fue por cinco años, los tratamientos integraron prácticas culturales y patrón de cultivos locales, como base para cuatro modelos rotacionales, T-A-T-T-A, V-A-T-T-A, Ai-A-A-T-A y A-A-A-T-A (Ai = Asociación maíz-haba inoculada con rhizobium, A = Asociación sin inocular; T= Trigo y V=Veza), en seis bloques al azar, con aplicación de excremento animal en tres bloques, por dos ocasiones y como testigo tres bloques sin aplicación. Las producciones anuales acumuladas de biomasa total y de grano en los modelos rotacionales evaluados tendieron a incrementarse con aumento del número de años de utilización agrícola del fragipan. La tendencia presenta irregularidades influenciada por características climáticas interanuales y otros factores. La producción promedio anual de grano y de biomasa total tienden a ser superiores con aplicación de excremento animal, en comparación con el testigo. Los cuatro modelos rotacionales muestran potencialidad productiva, así como efecto por aplicación del excremento, en comparación con el testigo, tanto para la producción de biomasa total como para grano. La mayor producción acumulada de biomasa aérea y grano en el sistema rotacional

Trigo - Asociación (maíz-frijol) - Trigo - Trigo - Asociación (maíz-haba), fue estadísticamente igual al sistema rotacional Veza-Asociación (maíz-frijol) - Trigo - Trigo - Asociación (maíz-haba). El desarrollo de la aptitud productiva del fragipan mediante modelos rotacionales locales es una alternativa técnica.

Palabras clave: Fragipan, rotación, restauración productiva, producción biomasa y grano.

SUMMARY

Hardened volcanic soils have their origin in horizons that protrude on the surface because of erosion caused by bad management. In Mexico, they occupy an area of more than 300 thousand ha; the area is important in Latin America. At present, these soils are of interest for agricultural production. However, knowledge of annual and accumulated productivity on medium and long-term bases is insufficient. The methodology identified fragipan soil as the tepetate that occupies the largest area and, as a consequence, was selected to evaluate its productive limitations and to prospect alternatives. The five-year experimental design integrated local cultural practices, and local crop patterns with four rotation models, T-A-T-T-A, V-A-T-T-A, Ai-A-A-T-A, and A-A-A-T-A (Ai = intercrop corn-broad bean or bean inoculated with rhizobium, A = intercrop without inoculation, T = wheat, and V = Vetch) and six random blocks with the application of animal manure in three blocks on two occasions and three blocks without application. The accumulated annual production of total biomass and grain tend to increase with the number of years of agricultural use of tepetate. The tendency presents irregularities influenced by yearly climatic characteristics and other limiting factors. The average annual production of grain and total biomass tends to be appreciably superior with the application of animal manure, compared with the control. The four rotation models showed productive potential as well as a positive effect of the application of animal manure, in comparison with the control, for both total biomass production and grain production. The highest

¹ Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

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

accumulated production of biomass area and grain in the rotation system Wheat – Association (corn-bean) – Wheat – Wheat Association (corn-broad bean) was statistically equal to the rotation system Vetch-Association (corn-bean) – Wheat – Wheat – Association (corn-broad bean). The development of the productive ability of the hardened volcanic soils through local rotational models is a technical alternative.

Index words: “Fragipan”, rotation, productive ability, production of biomass and grain.

INTRODUCCIÓN

Los tepetates son materiales volcánicos denominados tobas que constituyen horizontes de diagnóstico y que afloran a la superficie a causa de un manejo agrícola precedente de efecto degradativo, que ocasiona la erosión de los horizontes superficiales. En numerosos países latinoamericanos se reportan entre las principales causas de diversos impactos erosivos a los sistemas agrícolas regionales, así como el cambio de uso para suelos con vocación de praderas, agostaderos y zonas forestales. La erosión de los suelos es un problema de origen social actual e importante. Los suelos volcánicos endurecidos según el país son denominados como: Tepetates (México), Talpetates (Nicaragua) o Cangahua (Ecuador). De acuerdo con FAO/UNESCO, modificada por CETENAL (1975), se identifican como: Duripanes o Fragipanes, dependiendo del agente cementante.

Los suelos volcánicos endurecidos cubren una superficie estimada de 30 700 km² en la región central de México, de acuerdo con estimación de Zebrowski *et al.* (1991). Según Dubroeuq *et al.* (1991), su presencia está limitada por factores topográficos y climáticos; en México, los autores señalaron que se localizan en el pie de monte, a altitudes comprendidas entre 2400 y 2800 m, en un régimen que se caracteriza por una estación seca que dura de cinco a seis meses. En Ecuador, Peña y Zebrowski (1992), con base en planimetría de mapas edafológicos, estimaron que los suelos con “cangahua” representan una superficie de 240 mil ha en la región septentrional de la sierra entre Alausi y Tulcan.

Los fragipanes son motivo de interés para la investigación por ser los que cubren una mayor área en el eje neovolcánico de México. En varios países se han registrado, en los últimos años, acciones para la

recuperación productiva de los suelos endurecidos que emergen; las experiencias reportan modalidades para su recuperación pese a sus restricciones físicas, químicas y biológicas, las cuales son limitantes para obtener una productividad aceptable. Según Arias (1992), los principales factores limitativos para la producción agrícola de los fragipanes son: dureza, escasa porosidad y su poca conductividad hidráulica. Según Pérez *et al.* (2000), en los tepetates tipo fragipan antes de roturar hay bajos porcentajes de materia orgánica y nitrógeno, los cuales pueden considerarse como limitantes máximas para su incorporación a la producción agrícola. Además, los autores señalaron que el contenido de fósforo es reportado únicamente como trazas; por lo que constituye otro factor limitativo que afecta la producción de cosechas. Por su parte, Álvarez, citado por Ferrera *et al.* (1997), reportó las siguientes poblaciones microbianas (en unidades formadoras de colonias) encontradas en tres condiciones: a) Bacterias en tepetate antes de roturar 2.2×10^4 , después de roturar 6.0×10^4 y con aplicación de estiércol 2.5×10^6 ; b) Actinomicetos antes de roturar 1.2×10^4 , después de roturar 2.0×10^4 y con aplicación de estiércol 1.4×10^5 .

El objetivo del presente trabajo contempló mejorar la productividad de los horizontes volcánicos endurecidos mediante una secuencia de acciones: i) Identificar los principales cultivos del patrón regional de uso del suelo, y ii) Con base en referentes agronómicos e información disponible, diseñar y evaluar varios modelos rotacionales durante un periodo de cinco años como alternativas posibles para la solución de las restricciones de tipo agronómico.

El supuesto hipotético prevé la modificación favorable de los factores limitativos del tepetate como efecto de su utilización agrícola mediante sistemas biológicos y técnicos. Esta investigación pretende aportar elementos para analizar la evolución y el potencial productivo de un tepetate, tipo fragipan, durante los primeros cinco años de su incorporación al uso agrícola, con apoyo en prácticas culturales que contribuyan a minimizar las limitantes y puedan favorecer el desarrollo de su aptitud productiva. Cabe resaltar la pertinencia y actualidad del tema en función de la importante y creciente superficie de suelos endurecidos, el interés social de los productores para su recuperación con fines productivos y la insuficiente información y registros productivos, durante los años iniciales de su incorporación productiva.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en Hueyotlipan, estado de Tlaxcala, en las estribaciones orientales de la Sierra Nevada, que colinda al oeste con el valle de México. Las coordenadas territoriales son 19°20' N y 98°20' O, a una altitud de 2600 metros. La producción agrícola se realizó en condiciones de secano. Según Velásquez, citado por García (1990), el área de estudio se ubica entre las isoyetas de 400 y 500 mm; con un inicio probable de la temporada de lluvias entre finales de mayo y mediados de junio, con duración del ciclo hasta la primera quincena de octubre. Las heladas en octubre ocurren aproximadamente en ocho de cada 10 años.

El tepetate seleccionado fue tipo fragipan, con restricciones físicas por la baja porosidad, la baja estabilidad de los agregados y la baja conductividad hidráulica. De acuerdo con Baumann (1996), la dureza del fragipan en estado seco y sin roturar fue de 115 kg cm⁻¹, la densidad aparente fue de 1.47 g cm⁻³, la conductividad hidráulica de 10 mm h⁻¹ que se considera baja. En cuanto a las propiedades químicas, el pH promedio es de 7.6; la conductividad eléctrica de 0.29 dS m⁻¹; el contenido de materia orgánica de 0.1%, el cual es sumamente bajo y es también identificado como un factor limitativo.

La roturación se realizó en el año 1991 con un tractor tipo caterpillar (D-7). La profundidad de roturación fue variable entre 30 y 40 cm, aproximadamente se invirtieron 20 h tractor⁻¹ ha⁻¹; después de la roturación, se realizaron un barbecho y dos pasos de rastra, se construyó una terraza con una superficie útil para siembra del protocolo experimental de 1800 m².

El diseño experimental consistió en seis bloques, en cada uno se repitieron los sistemas rotacionales:

T-A-T-T-A, V-A-T-T-A, Ai-A-A-T-A y A-A-A-T-A,

Donde: Ai = asociación maíz-haba inoculada con rhizobium, A = asociación sin inocular; T = trigo y V = veza.

Entre bloques, el tratamiento fue la aplicación de excremento animal de bovino en tres bloques y el testigo en los tres bloques restantes. En el primer año del protocolo (1991), la cantidad de excremento animal aplicada fue equivalente a 40 t ha⁻¹. Al inicio del quinto año, se realizó una segunda aplicación de 24 t ha⁻¹, de igual forma que en el Año 1.

Los factores de interés se centraron en el efecto de la aplicación de materia orgánica y el testigo sin aplicación; ambos tratamientos en combinación con los cuatro modelos rotacionales evaluados y el efecto del año climático, considerando que se realizó en condiciones de secano. Por lo que existen efectos de variabilidad entre años y los riesgos que ello implica.

Las unidades experimentales fueron los sistemas de cultivo realizados al interior de una rotación y de un bloque, por año. El tamaño de la unidad experimental fue de 16 m². Los cultivos que componen las rotaciones manejadas en el experimento fueron: trigo (*Triticum vulgare*) y maíz (*Zea mays*) asociado con haba (*Vicia faba*) y/o frijol (*Phaseolus vulgaris*), ambos identificados en las encuestas preliminares como los cultivos asociados comunes en la región, así como en los sistemas locales diseñados para la incorporación productiva de los suelos volcánicos. Además, se incluyó el cultivo de veza (*Vicia sativa*) como una leguminosa forrajera alternativa, de amplia cobertura del suelo y con potencial para inducir las dinámicas biológicas necesarias en el mejoramiento del tepetate.

La siembra y el establecimiento de los cultivos en los diferentes años se realizaron durante la segunda quincena de mayo y la primera de junio. La semilla de maíz fue blanco criollo de la región, el trigo fue la variedad Zacatecas, el frijol fue tipo bayo, el haba una semilla local y la veza una variedad utilizada comúnmente en Valles Altos. Como variables se analizaron: la producción media anual de biomasa aérea total y de grano, así como las producciones acumuladas durante los cinco años del período rotacional. En ambos casos, se reportan resultados comparativos con aplicación de excremento animal y su testigo.

El muestreo de biomasa aérea total y de rendimiento se realizó según el arreglo topológico de siembra: a) en surcos se utilizaron los tres surcos centrales, de 5 m cada uno; b) en los cultivos de cobertura se seleccionaron cinco sitios de muestreo al azar, con un área de muestreo en cada uno de 40 x 50 cm. El secado del material vegetal para la estimación de rendimiento de biomasa y grano se realizó en estufas de aire forzado a 70 °C, durante 48 horas. En seco, se calcularon la producción de biomasa aérea total y la producción de grano. La estimación del rendimiento de grano se realizó mediante los componentes del rendimiento. Los resultados se analizaron estadísticamente mediante análisis de

varianza y pruebas de medias Tukey ($\alpha = 0.05$) mediante el uso de la Versión 6.03 de SAS (SAS Institute, 1988).

Los perfiles de comportamiento de los diferentes años climáticos se realizaron con datos de precipitaciones locales y tomados en campo. El período con disponibilidad de humedad se calculó a partir del momento en que la oferta proporcionada por la lluvia supera la demanda climática, estimada por evapotranspiración total a 50%; al respecto, cabe aclarar que se contabilizaron también los días que la precipitación superó la evapotranspiración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción Anual de Grano y de Biomasa Total

Los resultados obtenidos en el protocolo experimental corresponden a la producción anual de grano y biomasa; ambos se estimaron a través del promedio general de los cuatro modelos rotacionales para cada uno de los cinco años de duración del protocolo. Una primera lectura de los resultados se muestra en la Figura 1, en la cual se observa una variabilidad de la producción anual de grano asociada al número de años de su utilización con fines de producción agrícola. Los resultados productivos de grano en su conjunto muestran el potencial del desarrollo productivo del fragipan durante el proceso de su incorporación productiva como suelo. Sin embargo, la tendencia hacia el incremento de la producción de grano en el fragipan fue variable entre años, lo cual sugiere cuestionar sobre las causas e importancia de dicha variabilidad. En particular, en el

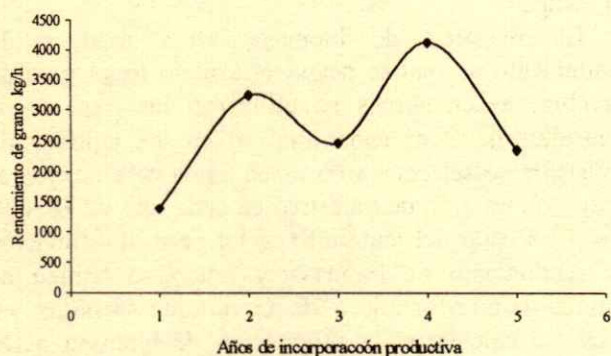


Figura 1. Producción de grano promedio anual en suelo volcánico endurecido en función del número de años de su aprovechamiento agrícola.

marco de una tendencia hacia el incremento de la producción de grano se distinguen los Años 2 y 4 con los resultados productivos más elevados y, en contraparte, los Años 3 y 5 con las producciones de grano más bajas.

La Figura 1 muestra la tendencia hacia el incremento productivo de grano en un tepetate recién roturado, en función del número de años de uso agrícola del mismo. No obstante, la producción obtenida es variable entre años, en su caso influenciada por el tipo de año climático y la interacción con sus atributos productivos y las prácticas agrícolas. Al respecto, Pérez *et al.* (2000) estudió la dinámica del nitrógeno y de la materia orgánica en los tepetates del estado de México, con diferentes años de haberse cultivado (1 a 60 años) en la ladera noroccidental de la Sierra Nevada en el estado de México y concluyó que existe una relación entre los tamaños de los reservorios de nitrógeno en los tepetates y la práctica de adicionar materia orgánica.

El análisis climático comparativo entre años demostró una variabilidad importante de la precipitación y la duración de la estación de crecimiento. Entre la precipitación mínima de 362 mm para el Año 3 y la máxima de 647 mm para el Año 1 existió una diferencia de 79%. Por su parte, para los Años 5 y 2, la duración de la estación de crecimiento mostró una diferencia de 88.7%, como variabilidad durante la rotación entre los valores extremos registrados (107 a 202 días, respectivamente, Cuadro 1).

Los Años 2 y 4, que mostraron los resultados de producción de grano más elevados, presentaron un promedio de lluvia de 531 mm, superior en 30% al promedio de 410 mm para los Años 3 y 5, durante los cuales se obtuvo el menor rendimiento de grano.

Cuadro 1. Precipitación en periodo de estación de crecimiento y duración en número de días.

Año climático	Precipitación junio-septiembre	Duración del período de humedad disponible [†]
	mm	día
1	647	(304-142) = 162
2	468	(350-148) = 202
3	362	(281-168) = 113
4	594	(300-138) = 162
5	458	(265-158) = 107

[†] Calculada como el número de días con humedad disponible superior o igual a 50% de ETC.

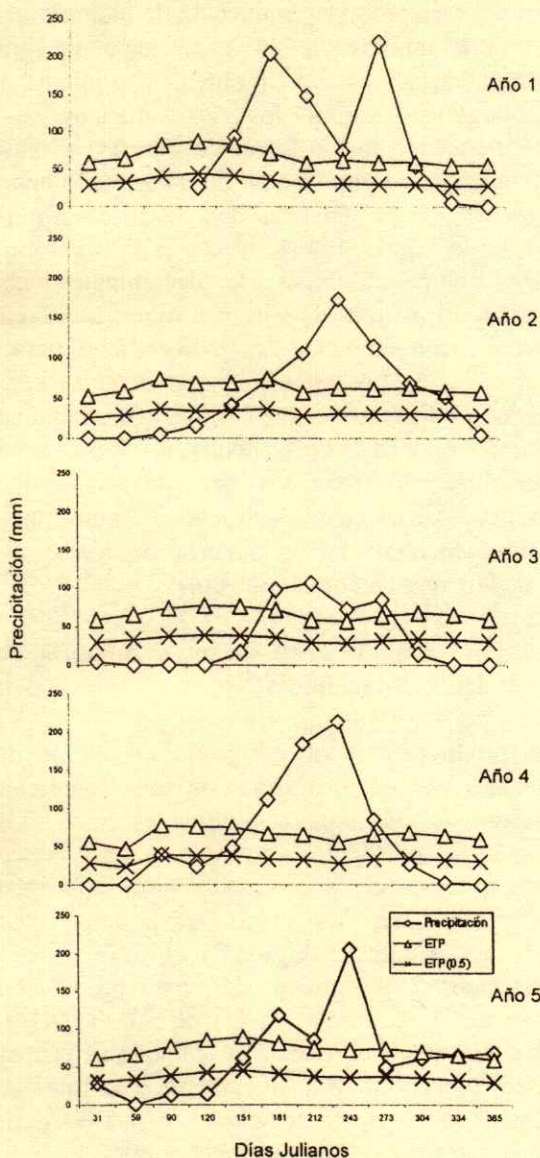


Figura 2. Variabilidad de la precipitación y los periodos de humedad disponible entre años.

En la Figura 2, se presenta para los cinco años del protocolo, el número de días con humedad disponible a partir de la oferta proporcionada por la lluvia y la demanda climática estimada mediante la evapotranspiración a 100 y a 50%. Los Años 2 y 4 con producción elevada de grano presentaron periodos con humedad relativamente más amplios, durante los cuales el agua disponible para el crecimiento de los cultivos no actuó como limitante, en comparación con los Años 3 y 5, con menor productividad. La duración de la estación de crecimiento para los Años 2 y 4 en promedio fue de 160 días, para los Años 3 y 5 el promedio fue de 133 días. Comparativamente, los

años de mejor rendimiento tuvieron 20% más días con humedad disponible durante su ciclo.

Con relación al efecto del clima en estos materiales, Fetcher (1997) evaluó el cultivo del maíz en condiciones de labranza reducida con y sin cobertura vegetal y concluyó que los factores de estrés de tipo climático fueron determinantes en los resultados (falta de agua durante el periodo de germinación, falta de agua durante la sequía interestival y presencia de vientos fuertes que provocaron acame). Esto permite inferir la necesidad de incrementar o mejorar la capacidad de almacenamiento de agua aprovechable en este sustrato de al menos 150 mm, lo que equivale a una profundidad de rehabilitación de por lo menos 55 cm.

La producción de grano en las rotaciones como efecto de la aplicación de excremento animal, de acuerdo con la Figura 3, muestra para cada año un comportamiento y una variabilidad similares a los resultados de la producción promedio de grano, que se reporta en la Figura 1. En particular, la producción de grano como tratamiento promedio de todas las rotaciones con aplicación de excremento animal es superior, en comparación con la producción en el tratamiento testigo en todos los años, excepto para el Año 4. Para este último, se observó una respuesta similar entre los dos tratamientos, debido a la mineralización total del excremento animal aplicado cuatro años antes. Es evidente, como función de respuesta de los cultivos al mejoramiento del

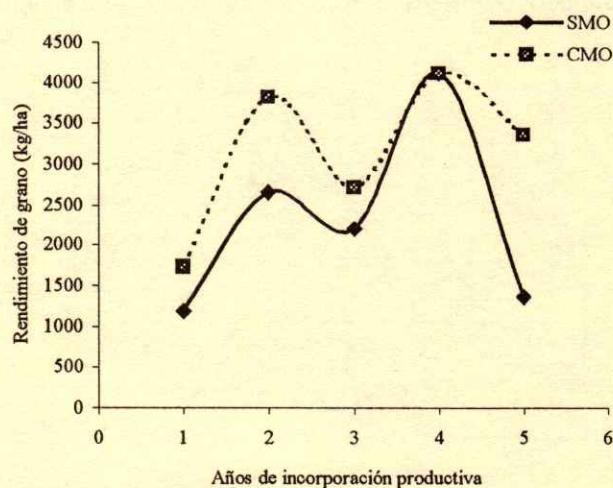


Figura 3. Producción anual de grano durante el periodo rotacional, con y sin aplicación de estiércol animal. SMO = sin aplicación de excremento animal. CMO = con aplicación de excremento animal.

potencial productivo del fragipan, que durante el Año 4 de incorporación productiva y en las condiciones de un año climático favorable, la aptitud demuestra un potencial productivo elevado, sin importar la aplicación precedente de excremento animal o la ausencia del mismo. Cabe señalar que previo al ciclo agrícola del Año 5 se realizó una segunda aplicación de excremento animal.

Con los resultados del Año 5, se estimó una diferencia significativa entre el promedio de todas las rotaciones para los dos tratamientos, o sea 3150 kg ha⁻¹ de grano con aplicación de excremento animal y de 2322 kg ha⁻¹ sin aplicación. Estos promedios fueron diferentes significativamente de acuerdo con una diferencia mínima significativa (DMS) de 292.49. Los resultados evidencian la importancia diferenciada de ambos factores limitativos, tanto del año climático como del excremento animal y su efecto interactivo para la producción vegetal, así como para otros comportamientos favorables.

La producción promedio de las rotaciones de biomasa aérea total anual, como resultado de la aplicación de excremento animal y su testigo sin aplicación, se muestra en la Figura 4. Es notorio que los comportamientos anuales y las variaciones entre años son sensiblemente similares a los mostrados para la producción de grano en la Figura 3. La producción de biomasa aérea anual muestra variaciones entre los cinco años de evaluación; sin embargo, se aprecia una tendencia generalizada hacia el aumento de la producción de biomasa aérea en función del incremento del número de años de utilización

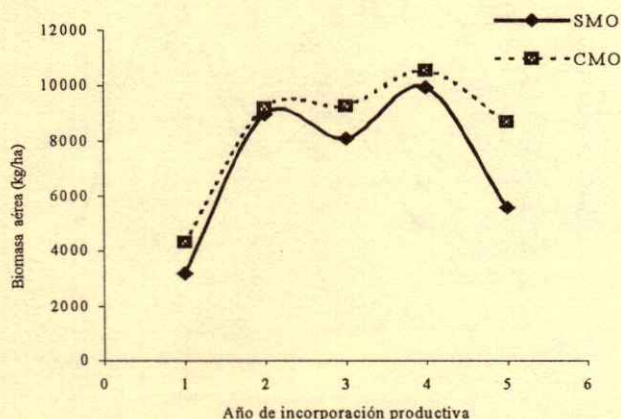


Figura 4. Variabilidad de la producción anual de biomasa durante el período rotacional en función de la aplicación de abono. SMO = sin aplicación de excremento animal. CMO = con aplicación de excremento animal.

agrícola del fragipan. La producción de biomasa aérea en términos similares a la producción de grano presenta variaciones interanuales importantes explicables, en su caso, por los años climáticos.

La producción media anual de biomasa aérea, en los tratamientos con aplicación de excremento animal, fue superior en la mayoría de los años, según se observa en la Figura 4. Este efecto es más notorio en los Años climáticos 3 y 5, denominados como restrictivos. El análisis de varianza muestra diferencia significativa con un valor de DMS = 782.7 para los Años 1, 3 y 5. Lo anterior y, de acuerdo con lo reportado por Fassbender (1975), pequeñas cantidades de materia orgánica pueden modificar las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo, además de proporcionar estabilidad estructural, aumentar la porosidad, mejorar las relaciones agua-aire y la capacidad de intercambio catiónico.

Producción Comparada de Grano y Biomasa Total entre Modelos Rotacionales

La producción total de grano en los modelos rotacionales se calculó mediante la suma acumulativa de las producciones anuales, durante los cinco años de evaluación del protocolo experimental. La producción total de biomasa aérea se calculó para cada modelo rotacional durante los cinco años del protocolo experimental (Cuadro 2; Figura 5).

El Cuadro 2 muestra que la mayor producción de biomasa aérea se obtuvo en la rotación T-A-T-T-A. No obstante que su producción obtenida es la mayor, la misma es similar estadísticamente a la producción de biomasa del sistema rotacional V-A-T-T-A. Entre ambas se estimó una diferencia menor que 1%.

El análisis del rendimiento del grano muestra, de una manera más clara, la existencia de dos grupos de respuesta, los cuales están conformados por los

Cuadro 2. Producción de biomasa total vegetativa, de grano e índice de cosecha según sistemas rotacionales.

Modelo rotacional [†]	Producción		Índice de cosecha
	Biomasa	Grano	
	----- kg ha ⁻¹ -----		
T-A-T-T-A	41 544 a	14 993 a	0.36
V-A-T-T-A	41 268 ab	14 122 a	0.34
Ai-A-A-T-A	35 709 bc	11 435 b	0.32
A-A-A-T-A	32 154 c	10 606 b	0.33

[†] Ai = asociación maíz-haba inoculada con rhizobium, A = asociación, T = trigo, V = veza. Prueba de Tukey para comparación de medias.

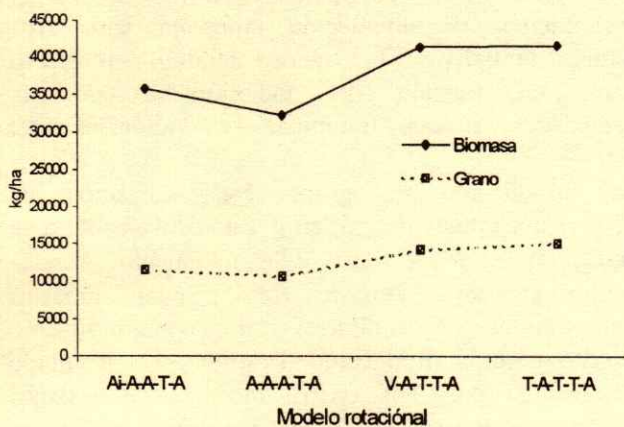


Figura 5. Producción acumulada de biomasa total y grano para cuatro modelos rotacionales.

mismos modelos rotacionales que se agruparon para la producción de biomasa total. La mayor producción de grano estadísticamente diferente fue la obtenida por las rotaciones T-A-T-T-A y V-A-T-T-A, con una producción total superior a 14 toneladas. El grupo constituido por los modelos Ai-A-A-T-A y por A-A-A-T-A obtuvieron 11.4 y 10.6 t de grano, respectivamente.

Finalmente, se aprecia que el índice de cosecha entre los sistemas rotacionales varía de 0.32 a 0.36, ámbito de variación al interior del cual los valores superiores corresponden al grupo rotacional con dominancia de trigo y veza-trigo.

En forma preliminar y con el apoyo empírico de situaciones de campo, se anticipa la siguiente reflexión como parte de la explicación a la variabilidad registrada en la producción de biomasa entre los grupos rotacionales.

Durante la etapa previa al establecimiento del protocolo experimental, la modalidad del tipo de roturación y la forma de preparación del suelo para la siembra no eliminan la totalidad de los terrones en el horizonte laborado y en la superficie. Comúnmente permanecen numerosos terrones después de las roturaciones y preparaciones de este tipo de suelo, y el terreno donde se llevó a cabo este experimento no fue la excepción y quedaron terrones en la superficie; por lo tanto, las condiciones estructurales del horizonte cultivado fue una limitante en el establecimiento de una adecuada densidad en las poblaciones del maíz y de frijol-haba (en general menor que 20 mil plantas ha^{-1}), tanto por características físicas de la superficie, que se han señalado, como por las

restricciones de una limitada actividad biológica del suelo, la cual se supone influyó, inhibiendo el establecimiento de la asociación de maíz-leguminosas. Yamada *et al.* (1994) mencionaron que, en Japón, los suelos con horizontes endurecidos presentan problemas de penetración de raíces, además de requerir en su manejo agronómico grandes cantidades de fertilizantes fosfatados.

Fetcher (1997) evaluó las características físicas de tepetates en Tlaxcala con diferentes años de haberse incorporado a la producción agrícola. Este autor no encontró diferencias significativas en porosidad entre las diferentes edades de incorporación, y que el contenido de poros gruesos se redujo en las parcelas con mayor edad de incorporación; asimismo, concluyó que de los parámetros físicos estudiados, la estabilidad de los agregados determinada mediante el método de percolación resulta ser la más sensible a los cambios estructurales a corto plazo.

Para trigo y veza con características de cultivos de elevada cobertura poblacional, la densidad estimada en campo osciló entre 600 mil y 800 mil plantas ha^{-1} y el número superior de raíces favorece una mayor área de establecimiento, así como un elevado volumen en el horizonte de exploración y de colonización biológica del sustrato. Lo anterior, aunado a la interacción de ciertos procesos, repercute de manera significativa en el mejoramiento de las limitantes físicas, químicas y biológicas del suelo volcánico.

La producción promedio de biomasa y grano total rotacional, con y sin aplicación de excremento animal, sumó, para biomasa, 40.86 y 34.91 $t ha^{-1}$, respectivamente, y, para grano, 14.80 y 10.98 $t ha^{-1}$, respectivamente. Los resultados obtenidos en el tratamiento con aplicación de excremento fueron superiores estadísticamente al testigo (Figura 6).

La producción de biomasa total entre los modelos rotacionales, de acuerdo con los resultados del Cuadro 3, muestra una variabilidad con aplicación de abono entre 47.89 y 35.21 $t ha^{-1}$. La variabilidad para la producción de biomasa total sin aplicación de excremento oscila entre 35.19 y 30.15 $t ha^{-1}$.

La producción de grano entre los modelos rotacionales, según el tratamiento aplicación de abono y su testigo, muestra valores de 17.72 a 13.37 $t ha^{-1}$ para la aplicación de abono orgánico y de 13.60 a 8.75 $t ha^{-1}$ para el testigo.

El efecto de la aplicación del excremento animal para la producción de biomasa aérea fue significativa sólo en la rotación T-A-T-T-A, en el caso de la producción de grano; el efecto de la aplicación de

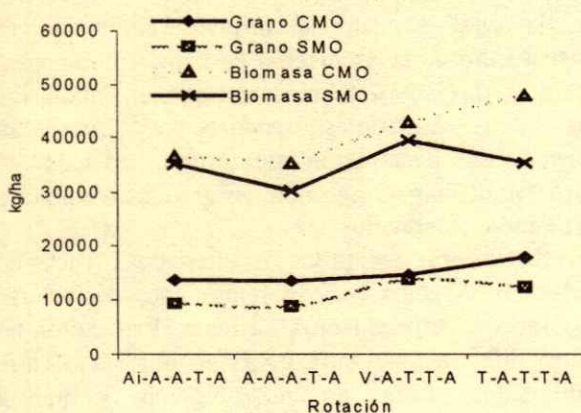


Figura 6. Producción acumulada de biomasa y grano total para cuatro modelos rotacionales, con y sin aplicación de excremento animal. SMO= Sin aplicación de excremento animal CMO= Con aplicación de excremento animal.

Cuadro 3. Producción de biomasa total aérea y de grano en cuatro modelos rotacionales, con y sin aplicación de excremento animal.

Modelo rotacional [†]	Excremento animal	Producción acumulada en la rotación	
		Biomasa	Grano
----- kg ha ⁻¹ -----			
T-A-T-T-A	Con	47 892	17 729
	Sin	35 195	12 259
V-A-T-T-A	Con	42 735	14 512
	Sin	39 310	13 602
Ai-A-A-T-A	Con	36 411	13 579
	Sin	35 006	9 298
A-A-A-T-A	Con	35 212	13 378
	Sin	30 115	8 758

[†] Ai = asociación maíz-haba inoculada con rhizobium, A = asociación, T = trigo, V = veza.

excremento se reporta para las rotaciones T-A-T-T-A, Ai-A-A-T-A y A-A-A-T-A (Cuadro 3).

CONCLUSIONES

- El diseño y el manejo de sistemas rotacionales en los tepetates permiten la incorporación de éstos a la producción agrícola y fomentan la formación de suelo en un tiempo relativamente corto, lo cual tiene un efecto directo en el mejoramiento de las condiciones ambientales y sociales de la población de esas zonas.
- La producción anual de grano tiende a incrementarse en función del aumento del número de años de utilización agrícola, no obstante, la tendencia presenta comportamientos irregulares en función de la

variabilidad de la cantidad y distribución de la precipitación, en interacción compleja con otros factores limitativos, los cuales tendrán un efecto menor en función del mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato.

- La producción de grano con aplicación de excremento animal fue superior estadísticamente a la producción del testigo. El incremento de la producción de biomasa total anual muestra comportamientos similares al comportamiento descrito para la producción de grano. Un resultado generalizado para los cuatro modelos de sistemas rotacionales que se han evaluado puede resumirse en el efecto positivo de la aplicación de excremento animal, tanto para la producción de biomasa total, como para la producción del grano.

- La producción de biomasa total vegetativa de las rotaciones Trigo-Asociación maíz-frijol-Trigo-Trigo-Asociación maíz-haba y Veza-Asociación maíz-frijol-Trigo-Trigo-Asociación maíz-haba fueron iguales estadísticamente.

- La mayor producción de grano fue la obtenida por los modelos de rotación: Trigo-Asociación maíz-Trigo-Trigo-Asociación maíz-haba y el modelo Veza-Asociación maíz-frijol-Trigo-Trigo-Asociación maíz-haba; los cuales son sensiblemente similares, con una producción total superior a 14 toneladas.

LITERATURA CITADA

- Arias, R.H. 1992. Rehabilitación de tepetates: Una alternativa para la producción agropecuaria y forestal. *Terra* 10 Número Especial: 309-317.
- Baumann, J. 1996. Die Wirkung der Tieflockerung auf Erodierbarkeit und Estragspotential verbärteter Vulkanascheböden im Staat Tlaxcala, México. *Boden und Landschaft*. Bd. 10 Giesen, Deutschland.
- CETENAL. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. 1975. Clasificación de Suelos FAO/UNESCO (1970) modificado por CETENAL 1975. Secretaría de la Presidencia. México, D.F.
- Dubroeuq, D., P. Quantin y C. Zebrowski. 1991. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra* 7: 3-12.
- Fassbender, W.H. 1975. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Turrialba, Costa Rica.
- Fechter, Escamilla, U. 1997. Maíz bajo labranza reducida en un suelo volcánico endurecido (tepetate T3) rehabilitado en Tlaxcala, México. pp. 317-324. *In: Suelos Volcánicos Endurecidos*. III Simposio Internacional. Quito, Ecuador.
- Ferrera C., R., A. Ortiz, J. Delgadillo y S. Santamaría. 1997. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos. pp. 225-237. *In: Suelos*

- Volcánicos Endurecidos. III Simposio Internacional. Impresora Polar. Quito, Ecuador.
- García C., G. 1990. Análisis regional del funcionamiento y reproducción y sistemas familiares agropecuarios en el Distrito de Calpulalpan, Tlaxcala. Tesis de Maestría Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.
- Peña H., D. y C. Zebrowsky. 1992. Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (Tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del Mapa Morfopedológico de la Vertiente Occidental de la Sierra Nevada. Colegio de Postgraduados-ORSTOM. Montecillo, Texcoco, México.
- Pérez O., Ma. A., J.D. Etchevers, H. Navarro y R. Núñez. 2000. Aporte de los residuos del cultivo anterior al reservorio de nitrógeno en tepetates. *Agrociencia* 34: 115-125.
- SAS Institute Inc. 1988. SAS/STAT User's guide. Release 6.03. Cary, NC.
- Yamada, I., I. Kubotera y S. Shoji. 1994. Indurated volcanic ash soils in Japan. Their characterization, use and management. pp. 487-496. *In: Transactions of the 15th World Congress of Soil Science*. Acapulco, Mexico.
- Zebrowski, C., P. Quantin, H. Arias y G. Werner. 1991. Les "tepetates" récupération et mise en valeur des terres volcaniques indurées au Mexique. Dans *ORSTOM Actualités* 33.

INFLUENCIA DEL TIPO DE DRENAJE EN EL APROVECHAMIENTO DE NITRÓGENO POR LA CAÑA DE AZÚCAR

Influence of Type of Drainage on Nitrogen Uptake by Sugar Cane

M.A. Estrada-Botello^{1‡}, I. Nikolskii-Gavrilov¹, J.D. Etchevers-Barra¹, F. Gavi-Reyes¹,
O.L. Palacios-Vélez¹, J.D. Palma-López² y J.D. Mendoza-Palacios³

RESUMEN

El presente estudio se realizó en el campo experimental del Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados ubicado en la planicie aluvial La Chontalpa, Tabasco, México, con el objetivo de evaluar el efecto de tres tipos de drenaje agrícola parcelario: drenaje superficial (*ds*), drenaje topo (*dt*) y combinación del drenaje topo y drenaje subterráneo entubado con trincheras rellenas con arena (*dc*), en el aprovechamiento de nitrógeno por la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Se aplicó una dosis de 120 kg de N ha⁻¹ en noviembre de 1999 en la parcela experimental con el drenaje *dc* y un mes después en las otras parcelas. Cada mes se realizaron muestreos de plantas, en las que se determinó el contenido de nitrógeno en toda la planta. Estos datos permitieron establecer la dinámica de absorción de N durante el período de desarrollo del cultivo. La mayor acumulación de N por la caña de azúcar se registró en el mes de septiembre con la cantidad de 97, 143 y 226 kg ha⁻¹ en las parcelas drenadas con *ds*, *dt* y *dc*, respectivamente. Al final del estudio, la cantidad de N acumulado en las plantas fue 61, 100 y 164 kg ha⁻¹ y el rendimiento de tallos 74, 93 y 124 Mg ha⁻¹ en las mismas parcelas con *ds*, *dt* y *dc*, respectivamente. Esto indica que el tipo de drenaje agrícola influye de manera significativa en el desarrollo del cultivo de la caña de azúcar y el consumo de N en las condiciones del trópico húmedo.

Palabras clave: Drenaje agrícola, fertilizante nitrogenado, *Saccharum officinarum*, zona tropical húmeda.

¹ Instituto de Recursos Naturales y ² Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

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

³ Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.

Recibido: Octubre de 2001. Aceptado: Agosto de 2003.

Publicado en Terra *Latinoamericana* 22: 81-89.

SUMMARY

The present study was done in the experimental plot of the Tabasco Campus of the Colegio de Postgraduados, located on the alluvial plain "La Chontalpa", Tabasco, Mexico with the purpose of estimating the efficiency of nitrogen use by sugar cane depending on three types of agricultural field drainage: surface (*ds*), mole (*dt*) and subsurface pipe drainage with trenches filled with sand combined with mole and surface drainage (*dc*). The N fertilizer with dosage of 120 kg ha⁻¹ was applied in the experimental plot with drainage type *dc* in November 1999 and one month later in the other plots. The samples taken from different parts of the plants were analyzed in order to determine the N content. These data permitted determination of the dynamics of N absorption during plant development. The highest N accumulation by sugar cane was registered in September with 97, 143, and 226 kg ha⁻¹ in the *ds*, *dt* and *dc* plots, respectively. The quantity of accumulated N in the plants was 61, 100, and 164 kg ha⁻¹ at the end of the study and the crop yield of stems was 74, 93, and 124 Mg ha⁻¹ in the same *ds*, *dt*, and *dc* parcels, respectively. This indicates that the type of the agricultural drainage significantly influences the development of sugar cane and N consumption in humid tropics.

Index words: Agricultural drainage, nitrogen fertilizer, *Saccharum officinarum*, humid tropical zone.

INTRODUCCIÓN

La pérdida de nitrógeno del suelo y la baja eficiencia de utilización de los fertilizantes nitrogenados son problemas comunes en el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), en el trópico húmedo del sureste mexicano. Ambos problemas se relacionan con precipitaciones abundantes, que causan escurrimiento superficial y lavado del suelo cuando el tipo de drenaje agrícola o el diseño del mismo no es el apropiado. La absorción

de nutrientes (incluyendo el nitrógeno) por cultivos de zonas húmedas es altamente influenciada por el contenido de oxígeno del suelo (Payne y Gregory, 1992). En los períodos húmedos, la saturación del suelo con agua por la abundante precipitación interrumpe la entrada de oxígeno atmosférico hacia el suelo e influye en su conducción, disminuyendo la absorción de oxígeno y nutrientes y, por lo tanto, afecta el desarrollo del cultivo. Este fenómeno ha sido documentado para el caso de la caña de azúcar por Pérez *et al.* (1996), quienes lo relacionaron con un ascenso del nivel freático, excesiva humedad del suelo y aparición de charcos.

Para prevenir la saturación con agua de los suelos e inundación de las parcelas agrícolas en las zonas tropicales húmedas, se recomienda construir diferentes tipos de drenaje agrícola:

- surcos de drenaje superficial con pendiente para facilitar el desagüe;
- drenaje topo o túneles subterráneos (con diámetro aproximadamente de 0.1 m) localizados a una profundidad de 0.4 a 0.7 m, con espaciamiento de 1 a 5 m;
- drenaje subterráneo de tubos perforados de 0.75 a 0.1 m de diámetro, colocados de 1 a 1.5 m de profundidad, con pendiente, en trincheras (o sin ellas), espaciados de 10 a 50 m;
- o, combinaciones entre algunos de estos tipos (Ritzema, 1994). En el caso de suelos arcillosos, se recomienda llenar las trincheras con material filtrante (arena, grava, etc.) hasta alcanzar la superficie de suelo. Esto se hace para facilitar la entrada del agua de lluvia al tubo perforado y reducir el flujo de agua a través del perfil de suelo (evitando así lixiviación excesiva de los nutrientes y, principalmente, de los nitratos).

El drenaje influye en el aprovechamiento de los nutrientes presentes en el suelo para las plantas, al incrementar la aireación de la zona radical permite al cultivo explotar más el perfil del suelo, en busca de nutrientes (Davies y Payne, 1992). Este ambiente incrementa la disponibilidad del N del suelo para las plantas durante la etapa de desarrollo de la caña de azúcar (aproximadamente los primeros cinco meses), ya que las reservas de N que la planta logra acumular en ese período, las utiliza en los siguientes etapas de desarrollo (Fauconnier y Bassereu, 1975).

El contenido de N en el suelo influye en la dinámica de acumulación del N en el cultivo de la caña de azúcar, la cual tiene una forma similar a la de la biomasa (Campbell *et al.*, 1977). En general, las

tasa de acumulación de N y biomasa dependen de la etapa del cultivo, suministro de N del suelo, fertilidad del suelo y régimen hídrico del suelo (Campbell *et al.*, 1977, 1990; Campbell y Davidson, 1979; Rivera *et al.*, 1991).

En la zona de estudio, en condiciones de drenaje superficial, se ha reportado que el tallo tiene de 0.091 a 3.15% de N en el momento de la cosecha; estos porcentajes son afectados por la cantidad de fertilizante aplicado, patrón de distribución de la lluvia y humedad del suelo (Salgado, 1999). Salgado (1999) reportó concentraciones de N de 0.553 a 0.36% en la paja de la caña de azúcar en el momento de la cosecha.

La caña de azúcar en el período de crecimiento asimila aproximadamente de 54 a 63% de N del total absorbido (Rivera *et al.*, 1991; Coale *et al.*, 1993). Para el período de crecimiento, Coale *et al.* (1993) reportaron una producción de 0.15 Mg de N ha⁻¹ d⁻¹ de materia seca. Rivera *et al.* (1991) reportaron que 0.5% de la materia seca del total se produjo en los dos primeros meses de edad de la caña de azúcar y en el séptimo mes acumuló 30% de masa seca, rendimientos afectados por el régimen de precipitación, riego y temperatura.

Las altas extracciones de N del suelo por el cultivo de la caña de azúcar disminuyen la fertilidad del suelo. Con la cosecha de dicho cultivo del campo agrícola se pierde de 78 a 111 kg de N ha⁻¹ año⁻¹ (Coale *et al.*, 1993; Salgado, 1999). Por la quema de otras partes vegetativas del cultivo se provoca una disminución de nutrientes del suelo.

El objetivo del presente estudio fue determinar cómo el tipo de drenaje influye en el aprovechamiento del N por el cultivo de caña de azúcar en condiciones de clima tropical húmedo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó de noviembre de 1999 a noviembre de 2000, en la planicie aluvial del Plan Chontalpa, Tabasco, México, en un suelo Vertisol crómico arcilloso, según FAO-UNESCO (FAO-UNESCO, 1988), con más de 40% de arcilla montmorillonita (Trujillo y Palma, 1988). Las propiedades físicas del suelo en las parcelas experimentales son: porosidad de 50 a 55%, densidad aparente de 1.21 a 1.25 g cm⁻³, humedad volumétrica de capacidad del campo (CC) de 33 a 35%, humedad volumétrica de punto de marchitez permanente (PMP) de 15 a 17%, conductividad hidráulica a saturación de

0.02 a 0.23 m d⁻¹ (Trujillo y Palma, 1988; Mendoza *et al.*, 1998).

La caracterización de las propiedades químicas del suelo se presenta en el Cuadro 1 y ésta coincide aproximadamente con la reportada anteriormente por Trujillo y Palma (1988) y Salgado *et al.* (2000). Además, según los datos de Trujillo y Palma (1988), la capacidad de intercambio catiónico es de 32 a 38 meq en 100 g del suelo, la saturación de bases es de 84 a 92%. Salgado *et al.* (2000) reportaron una baja relación C:N (7:1) en el suelo de las parcelas experimentales, esto propicia que el suelo tenga la posibilidad de mineralización y liberación de N, lo que asegura la disponibilidad de este elemento para la planta.

La precipitación, evaporación de la superficie libre del agua y temperatura promedio anual son: 2163 mm, 1234 mm y 26.5 °C, respectivamente. El clima es cálido húmedo y lluvioso en verano y otoño; en el período más lluvioso, de septiembre a diciembre, la precipitación varía de 873 a 2011 mm, con un valor promedio de 1371 mm (Trujillo y Palma, 1988).

Se evaluaron tres tipos de drenaje agrícola: superficial (*ds*), topo (*dt*) y una combinación del drenaje topo con subterráneo, con trincheras rellenas con arena (*dc*), que se describen a continuación.

- Drenaje superficial (*ds*): consistió de 38 surcos de 50 m de longitud espaciados a 1.3 m. Los surcos funcionaron como drenaje superficial que permitió el desagüe con mayor facilidad y desalojaron el agua del suelo durante las lluvias. Al final del surco, se construyó una cuneta de sección trapezoidal con una profundidad 80 cm.

- Drenaje topo (*dt*): se construyó a una profundidad de 60 cm con diámetro promedio de túnel de 10 cm, separación entre los túneles de 2 m y perpendicular a

los surcos (con características iguales al tipo de drenaje anterior). Las grietas verticales que aparecen en el perfil del suelo durante la instalación de los túneles facilitan la infiltración del agua superficial y la entrada a estas cavidades. Además, el drenaje topo recibe el agua freática cuando el nivel freático se encuentra por arriba del nivel de los túneles (Cannell *et al.*, 1984). El agua de lluvia se descarga por la superficie a través de los surcos y por los túneles del drenaje topo.

- Drenaje combinado (*dc*): drenaje subterráneo entubado con trincheras rellenas con arena, construido en 1993, a una profundidad promedio de 1.2 m, con espaciamiento de 30 m entre las líneas de tubos perforados (de 0.1 m de diámetro) y una longitud de 150 m. Los drenes topo con las características iguales al tipo de drenaje anterior se colocaron de forma perpendicular a las líneas del drenaje entubado. Los surcos se ubicaron a lo largo del drenaje topo. Los drenes topo desalojan agua a las trincheras rellenas con arena, después esta agua percola hacia los tubos perforados que descargan el agua fuera del terreno agrícola. Los tubos perforados también reciben el agua freática cuando la profundidad del nivel freático es menor que 1.2 m y el agua superficial se descarga a través de los surcos. Este tipo de drenaje es más intensivo en comparación con los demás; sin embargo, su instalación es más complicada y más costosa (Ritzema, 1994).

El tamaño de las parcelas para *ds* y *dt* fue de 50 x 50 m (0.25 ha) y para la parcela con *dc* fue de 120 x 150 m (1.4 ha). Las parcelas se sembraron con caña de azúcar (var. Mex. 69-290) el 22 de agosto de 1999 y se fertilizaron el 19 de noviembre en *dc* y el 9 de diciembre en *ds* y *dt*, a un lado del brote de la caña con una dosis tradicional en la zona de estudio de

Cuadro 1. Propiedades químicas del perfil del suelo a diferentes profundidades (de 0 a 90 cm) en las parcelas de estudio.

Características [†]	<i>dc</i> [‡]			<i>dt</i>			<i>ds</i>		
	0 a 30 cm	30 a 60 cm	60 a 90 cm	0 a 30 cm	30 a 60 cm	60 a 90 cm	0 a 30 cm	30 a 60 cm	60 a 90 cm
CE, dS m ⁻¹	0.44	0.52	0.53	0.43	0.56	0.46	0.43	0.59	0.65
pH	5.90	5.40	6.80	6.30	6.60	7.00	6.30	6.60	7.20
MO, %	2.20	2.10	1.50	2.90	1.30	0.90	2.50	1.20	0.60
Nt, %	0.14	0.10	0.06	0.13	0.07	0.05	0.13	0.07	0.04
P-Olsen, mg kg ⁻¹	0.18	0.13	0.13	0.21	0.06	0.05	0.18	0.08	0.05
K, cmol(+) kg ⁻¹	0.54	0.32	0.10	0.60	0.24	0.23	0.62	0.24	0.24
Ca, cmol(+) kg ⁻¹	8.60	8.70	20.76	24.05	24.85	23.05	20.46	22.36	16.47
Mg, cmol(+) kg ⁻¹	9.88	6.58	9.88	8.23	8.23	11.52	8.13	8.23	8.23
Na, cmol(+) kg ⁻¹	0.22	0.38	0.46	0.21	0.44	0.59	0.24	0.36	0.50

[†] CE = conductividad eléctrica; MO = materia orgánica; Nt = contenido total de nitrógeno; P = fósforo; K = potasio; Ca = calcio; Mg = magnesio; Na = sodio.

[‡] *dc* = drenaje combinado; *dt* = drenaje topo; *ds* = drenaje superficial.

120, 60 y 60 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente, con el complejo 20-10-10.

Al inicio del experimento, se determinaron las propiedades químicas del suelo, con muestras provenientes de las profundidades de 0 a 30, 30 a 60 y 60 a 90 cm (Cuadro 1), en un muestreo puntual al centro de cada parcela.

En cada una de las parcelas se delimitaron 10 microparcels de 2 m x 2 m. En las que, cada mes, a partir de noviembre de 1999 a noviembre de 2000, se colectaron todas las plantas (tallo, hoja y raíz) de una micro parcela establecida para obtener una muestra compuesta, esto para cada una de las parcelas experimentales. Las muestras compuestas, para cada una de las parcelas experimentales, tomadas en el mismo período de muestreo, se consideraron como repeticiones para determinar la dinámica de acumulación de N extraído por el cultivo. Los muestreos correspondieron a tres etapas del cultivo: crecimiento (de cinco a seis meses), sazonado (de seis a nueve meses) y madurez (de nueve a 15 meses) de acuerdo con Salgado (1999). Se tomaron muestras de raíces en los primeros 30 cm de profundidad del suelo, donde se localiza aproximadamente 80% de éstas (Alfonso *et al.*, 1981). El tallo se dividió en dos partes: rastrojo de 0 a 15 cm, aproximadamente, y el resto para producción industrial. La cuantificación de la materia seca del rastrojo se usó para estimar la cantidad de N que queda en el suelo después de la cosecha. También se tomaron muestras de las hojas muertas desde el momento que aparecieron las primeras en el mes de abril.

Para conocer el efecto del drenaje sobre la dinámica de acumulación de N por el cultivo, cada mes se determinó en cada parcela experimental la masa de materia seca y materia fresca de las plantas, contenido de N en cada una de las partes vegetativas del cultivo (hoja viva, hoja muerta, tallo y raíz), humedad volumétrica del suelo y nivel freático.

La precipitación y evaporación de la superficie libre de agua se cuantificó en la estación meteorológica del Campus Tabasco. Los métodos empleados para los análisis de planta y suelo fueron los descritos por Etchevers (1988).

La humedad del suelo se midió en el estrato superior de 30 cm de profundidad con un medidor del tipo TDR (time domain reflectometry) (Zegelin y White, 1989). A diario se registró el nivel freático en pozos de observación.

La concentración de N promedio ($C_{promedio}$) para toda la planta de la caña de azúcar se determinó

considerando la masa seca (m_i) de cada parte vegetativa y las concentraciones de N (C_i) en cada una de ellas, es decir

$$C_{promedio} = \frac{\sum C_i m_i}{\sum m_i}$$

Con los datos de N adsorbido en la caña de azúcar se construyeron las gráficas y se obtuvo un modelo matemático de la dinámica de acumulación de N en la planta en cada parcela experimental durante el ciclo vegetativo del cultivo aplicando el método de regresión con mínimos cuadrados con el programa de cómputo Curve Expert, Versión 1.34 (Hyams, 1997) para lograr el mejor ajuste entre los datos de N y las gráficas. Los valores de N se calcularon en la forma siguiente:

$$N = \sum_j C_{ij} m_{ij}$$

Donde: C_{ij} y m_{ij} son las concentraciones de N y masa seca de diferentes partes i de la planta al final del mes j durante el ciclo vegetativo, respectivamente. Se realizó un análisis estadístico de los datos de N presentados en la forma adimensional:

$$(N_j/N_{max})/(N_j/N_{max})_{j\ mean}$$

Donde: N_j y N_{max} son los valores de acumulación de N en toda la planta al final del mes j y el valor máximo observado en cada parcela experimental, respectivamente; $(N_j/N_{max})_{j\ mean}$ son los valores medios de N_j/N_{max} para cada mes j entre las parcelas experimentales. El análisis de variación de los valores $(N_j/N_{max})/(N_j/N_{max})_{j\ mean}$ permitió comprobar confiabilidad de las gráficas de acumulación de N en la caña de azúcar durante su ciclo vegetativo en las parcelas con diferentes tipos de drenaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La dinámica de cambio de los valores mensuales de precipitación y evaporación de la superficie libre de agua y de los niveles freáticos promedio mensual en las parcelas experimentales se presenta en la Figura 1. Durante la investigación, existió un período seco de enero a abril y dos períodos húmedos: el primero de noviembre de 1999 a enero de 2000 y el segundo de mayo a noviembre de 2000. El período de estudio fue más húmedo en comparación con las condiciones medias. Durante la investigación, la

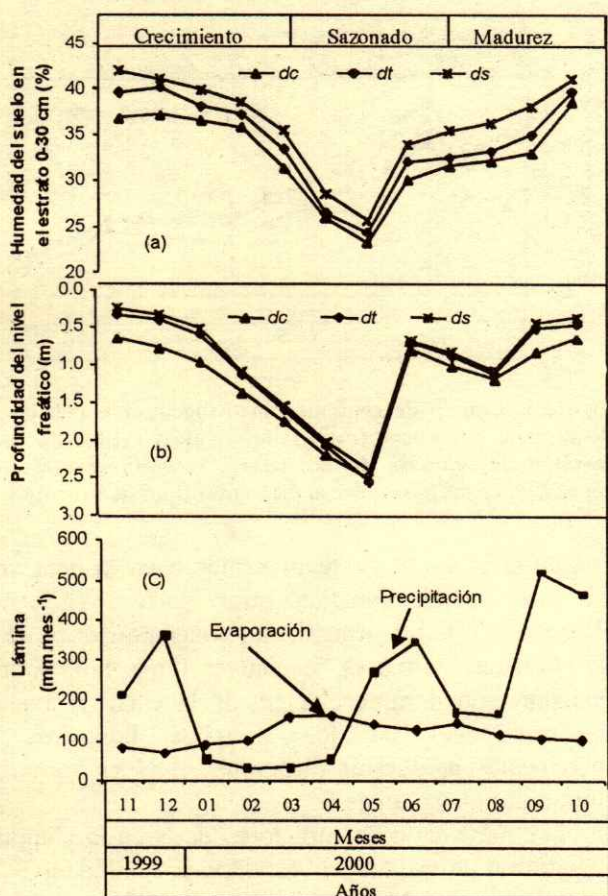


Figura 1. Dinámica del cambio de: (a) humedad del suelo (en el estrato de 0 a 30 cm) y (b) nivel freático en las parcelas con diferentes tipos de drenaje; (c) láminas mensuales de precipitación y evaporación de la superficie libre de agua.

lámina de precipitación fue de 2666 mm, 23% mayor que el promedio anual. La lámina de evaporación de la superficie libre de agua fue de 1388 mm, 12% menor que el promedio. Algunas precipitaciones causaron saturación del suelo y la formación de charcos durante varios días, principalmente en la etapa de crecimiento del cultivo.

En los períodos húmedos, los niveles freáticos en los tres tipos de drenaje se encontraron a una profundidad menor que 1 m y la humedad del suelo en el estrato de 0 a 30 cm fue mayor que 32%, valor aproximado a la capacidad de campo. En el período seco, el nivel freático superó 2.5 m de profundidad y la humedad de suelo en el estrato de 0 a 30 cm fue menor que 25%, que es cercano al valor del punto de marchitez permanente. El drenaje combinado (*dc*) presentó los niveles freáticos más profundos, la humedad del suelo fue menor y la aireación mayor

durante los períodos lluviosos, en comparación con los otros tipos de drenaje (Figura 1). Esto dio lugar a la formación de un mejor régimen de humedad del suelo para el desarrollo del cultivo, en comparación con las otras parcelas. De acuerdo con los datos bibliográficos (Hagan *et al.*, 1987), la humedad óptima del suelo para la caña de azúcar se encuentra entre la CC y un valor de 0.5 (PMP + CC), es decir, entre los valores de 35 y 24%. La humedad del suelo en las parcelas experimentales varió en los intervalos de 42 a 27% (36% en promedio), 40 a 25% (34% en promedio) y 37 a 24% (32% en promedio) para los tipos de drenaje *ds*, *dt* y *dc*, respectivamente, es decir, que la humedad del suelo promedio durante el ciclo del cultivo fue superior al intervalo óptimo en la parcela con el drenaje *ds*, mientras que los drenajes *dt* y *dc* permitieron mantener la humedad dentro de este intervalo. Durante la fase de crecimiento y la parte final de la fase de madurez, la humedad del suelo fue mayor que el intervalo óptimo en todos los tipos de drenaje.

El rendimiento de materia fresca de tallos (para la industria) fue de 74, 93 y 124 Mg ha⁻¹ en las parcelas con los tipos de drenaje *ds*, *dt* y *dc*, respectivamente. Estos rendimientos fueron superiores al valor promedio (65 Mg ha⁻¹) de la zona de estudio (Salgado *et al.*, 2000), aunque las condiciones climáticas durante la investigación se presentaron desfavorables para el desarrollo del cultivo, por los excesos de humedad en el período de crecimiento.

En la Figura 2, se presenta la dinámica de acumulación de la materia seca de la caña de azúcar durante el ciclo del cultivo de los diferentes tipos de drenaje. Para el cálculo de la materia seca en esta gráfica se consideró toda la planta (parte aérea y subterránea). En la parcela con *dc* se produjo la mayor biomasa seca total (65 Mg ha⁻¹) durante el periodo de estudio, en comparación con los otros tipos de drenaje (34 y 53 Mg ha⁻¹ con el drenaje *ds* y *dt*, respectivamente). Esto significa que el drenaje combinado propició las mejores condiciones de humedad del suelo para el desarrollo del cultivo de caña de azúcar en los períodos húmedos.

En la Figura 3, se presenta la gráfica de la dinámica del cambio del contenido de N en promedio para todas las partes vegetativas de la planta (raíz, tallo y hojas) para cada tipo de drenaje durante el período del experimento. La concentración de N en toda la planta al principio del experimento (en noviembre de 1999) fue 0.5% en la parcela con el drenaje *ds*, 0.7% en *dt* y 0.9% en *dc*. En este mes, la

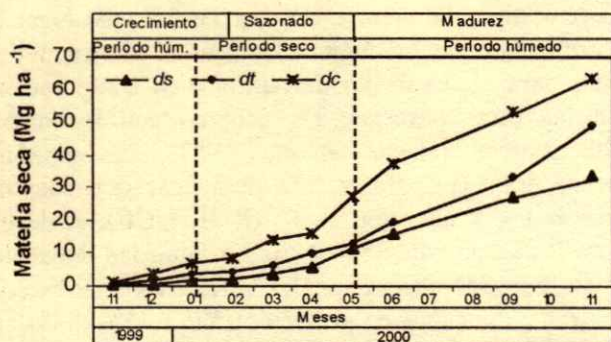


Figura 2. Acumulación de materia seca de caña de azúcar en las parcelas con diferentes tipos de drenaje.

humedad del suelo fue 42% en el *ds*, 39% en el *dt* y 37% en el *dc* (Figura 1), lo que corresponde a los valores cercanos a la saturación del suelo, al considerar que la porosidad del suelo es igual a 50% (Trujillo y Palma, 1988). La aplicación del fertilizante incrementó el contenido de N del cultivo en enero. Después, dicho contenido disminuyó paulatinamente en las parcelas experimentales; esto coincidió con lo reportado por Campbell *et al.* (1977). Al final del experimento no se observó diferencia significativa en la concentración de N en toda la planta entre las diferentes parcelas. Las diferencias de las concentraciones de N en el cultivo de caña de azúcar entre las parcelas experimentales se deben al contenido de humedad del suelo durante el período de estudio. Aunque se fertilizó primero en la parcela *dc* y después en las parcelas *dt* y *ds*, se supone que puede compararse las dinámicas de absorción de N por la caña de azúcar en todas las parcelas experimentales. Además, según el Cuadro 1, las propiedades químicas del suelo (incluyendo contenido de N total) en todas estas parcelas son similares. Por otro lado, Salgado (1999) reportó que la dinámica de las reservas de N mineral en el suelo en las parcelas adjuntas fue prácticamente igual durante la mayor parte del experimento: desde enero hasta noviembre de 2000, cuando se terminó el experimento. La diferencia significativa se observó únicamente durante los meses de noviembre y diciembre de 1999 cuando se aplicaron los fertilizantes.

En el Cuadro 2, se presentan las concentraciones de N de las partes vegetativas del cultivo para las parcelas experimentales, durante el período de estudio. Durante todo el ciclo del cultivo, las mayores

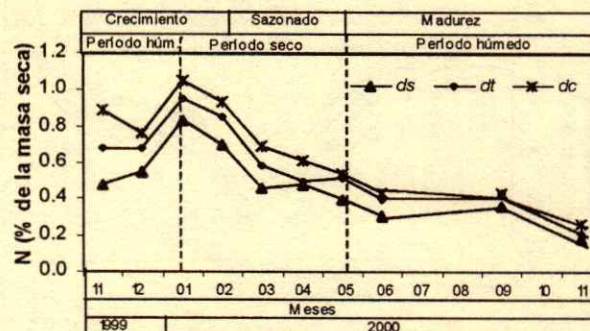


Figura 3. Cambio del contenido de nitrógeno en toda la planta de la caña de azúcar (raíz, tallo y hojas) expresado como fracción de la masa de la materia seca durante el ciclo vegetativo en las parcelas con diferentes tipos de drenaje.

concentraciones de N se presentaron en la hoja viva en comparación con las otras partes vegetativas (Resnik, 1980). En general, las concentraciones de N de cada una de las partes vegetativas (hoja, tallo y raíz) disminuyeron durante el ciclo de la caña de azúcar, mientras que, en los períodos húmedos, se incrementaron al estar disponible el N en forma de nitrato para las plantas.

Las mayores concentraciones de N en la planta se registraron en la parcela con drenaje combinado y las más bajas en la parcela con drenaje superficial (Figura 3). Esto se debe a que existe mejor humedad del suelo para el desarrollo del cultivo en la parcela con el drenaje *dc* durante los períodos húmedos (en diciembre de 1999 y junio y septiembre de 2000). Los niveles freáticos durante los mismos períodos también afectaron la extracción de N por la planta, al incrementar la profundidad de aireación del suelo.

En la Figura 4, se presentan las gráficas de la dinámica de acumulación de N en la planta durante el período del experimento. La parcela con *dc* provocó mayor intensidad de absorción de N durante la etapa de sazonado ($22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$), mientras que la mayor intensidad de absorción de N en las parcelas con *ds* y en el *dt* ocurrió en la etapa de madurez (17 y $22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$, respectivamente). En la etapa de crecimiento, la caña de azúcar absorbió 28, 24 y 42% de N con respecto al total absorbido en las parcelas con *ds*, *dt* y *dc*, respectivamente. Estos valores fueron inferiores a 59% de N absorbido en la misma etapa en otro estudio (Coale *et al.*, 1993).

La máxima cantidad de N extraído por la planta durante el período de estudio en todas las parcelas

Cuadro 2. Concentración de nitrógeno en las partes vegetativas de la caña de azúcar durante el periodo de estudio (noviembre de 1999 a noviembre de 2000) en función del tipo de drenaje agrícola.

Parte de la planta	Tipo de drenaje [†]	Año									
		1999		2000							
		Número de mes en cada año									
		11	12	01	02	03	04	05	06	09	11
----- mg kg ⁻¹ -----											
Hoja seca	dc							0.31	0.21	0.28	0.21
	dt							0.24	0.17	0.26	0.17
	ds							0.14	0.17	0.24	0.14
Hoja verde	dc	0.87	0.92	1.08	1.05	0.73	0.58	0.63	0.63	0.80	0.77
	dt	0.84	0.84	0.95	0.92	0.70	0.54	0.56	0.59	0.76	0.75
	ds	0.63	0.66	0.90	0.78	0.55	0.51	0.54	0.50	0.73	0.63
Tallo	dc	0.92	0.45	1.05	0.80	0.64	0.63	0.61	0.42	0.35	0.17
	dt	0.56	0.49	0.98	0.73	0.33	0.40	0.59	0.28	0.33	0.14
	ds	0.35	0.49	0.80	0.49	0.30	0.37	0.24	0.14	0.26	0.13
Raíz	dc	0.56	0.52	0.68	0.66	0.68	0.71	0.45	0.49	0.42	0.35
	dt	0.52	0.42	0.63	0.42	0.51	0.37	0.17	0.49	0.42	0.31
	ds	0.50	0.35	0.54	0.35	0.51	0.33	0.10	0.31	0.38	0.28

[†] dc = drenaje combinado; dt = drenaje topo; ds = drenaje superficial.

experimentales se presentó 13 meses después de la siembra (Cuadro 3) y, posteriormente, disminuyó hasta el final del experimento. El N absorbido por la planta fue superior al aplicado; esta diferencia posiblemente fue aportada por la fijación biológica del N, ya que de 25 a 80% de N en el cultivo de la caña de azúcar es obtenido por fijación biológica (Lima *et al.*, 1987; Boddey *et al.*, 1991, Urquiaga *et al.*, 1992) y otra parte es obtenida del N presente en el suelo. Posiblemente estos porcentajes de fijación biológica son afectados por el tipo de drenaje establecido, los cuales influyen en el desarrollo del cultivo y, por ende, en la fijación biológica del cultivo. En el periodo septiembre a noviembre, el N acumulado por la planta se redujo de 97, 143 y 226 kg ha⁻¹ a 61, 100 y 164 kg ha⁻¹ en las parcelas con ds, dt y dc, respectivamente. La muerte de las hojas y la maduración del tallo, durante el periodo de septiembre hasta el final del estudio, disminuyeron la cantidad de N acumulado. Esto es, posiblemente, por la transportación de N a otras partes vegetativas de la planta (para lograr su maduración), degradación de la proteína, ineficiencia de transpiración, reasimilación dentro de la planta y por la pérdida de N en forma gaseosa (NH₃) en la planta (Raun *et al.*, 1993; González *et al.*, 1997).

Con el manejo estadístico de los datos sobre la dinámica de acumulación de N en toda la planta, utilizando el programa de cómputo Curve Expert,

Versión 1.34 (Hyams, 1997), se obtuvo la ecuación analítica:

$$N = ae^{\left[\frac{-1(t-13)^2}{2(3.97)} \right]} \quad (1)$$

Donde: N = es la concentración acumulada de N en toda la planta (en kg ha⁻¹) en el mes número t = 1, 2, 3, etc. después de la siembra; a = un parámetro de ajuste entre los datos experimentales y calculados (en kg ha⁻¹). El análisis de correlación entre los valores del parámetro a y el rendimiento de tallo para la industria Y (en Mg ha⁻¹) permitió desarrollar la ecuación:

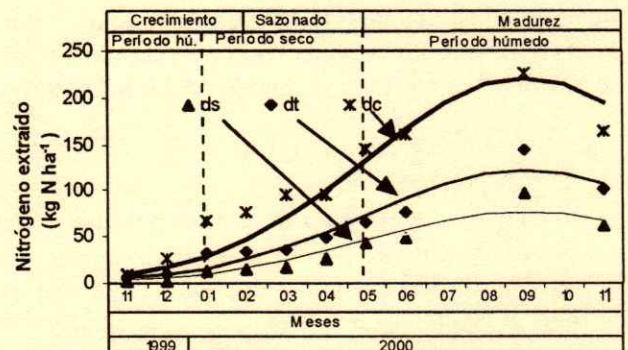


Figura 4. Dinámica de acumulación de nitrógeno extraído por el cultivo en las parcelas con diferentes tipos de drenaje.

Cuadro 3. Nitrógeno acumulado en las partes vegetativas de la planta al final del experimento, y el valor máximo acumulado en función del tipo del drenaje.

Tipo de drenaje [†]	Al final del estudio					Total	Máximo acumulado
	Raíz	Rastrojo	Tallo	Hoja viva	Hoja seca		
	----- kg ha ⁻¹ -----						
<i>dc</i>	3	9	59	61	32	164	226
<i>dt</i>	2	6	45	34	13	100	143
<i>ds</i>	2	4	26	21	8	61	97

[†] *dc* = drenaje combinado; *dt* = drenaje topo; *ds* = drenaje superficial.

$$a = 17.7 e^{0.02Y} \quad (2)$$

con valores de $r = 0.99$. Para obtener la Ecuación 2, se utilizaron los valores de $Y = 74, 93$ y 124 Mg ha^{-1} en las parcelas con *ds*, *dt* y *dc*, respectivamente.

En la Figura 4, se presentan las gráficas de la Ecuación 1. Las características estadísticas de correlación entre los valores calculados y medidos son: $r = 0.96, 0.97$ y 0.95 , y $s = 8.40, 10.89$ y 20.34 para las parcelas con *ds*, *dt* y *dc*, respectivamente. Las gráficas están dentro del intervalo determinado por el valor promedio más o menos la desviación estándar.

Este tipo de modelo ayuda a pronosticar la dinámica de acumulación de N en la caña de azúcar durante el desarrollo del cultivo y los requerimientos y las dosis de N, por lo que es útil para planificar la fertilización en función del tipo de drenaje empleado.

Debido a que las hojas de la planta en el momento de la cosecha contienen mayor cantidad de N en comparación con otras partes vegetativas, la quema de éstas durante la zafra ocasiona una pérdida significativa de N en forma gaseosa, cuantificada en 29, 47 y 93 kg de N ha⁻¹ en las parcelas con *ds*, *dt* y *dc*, respectivamente. Estas cantidades son superiores a las que el tallo extrae, indicando que para conservar las reservas de N en los campos agrícolas es preferible incorporar los residuos de las hojas al suelo en lugar de quemarlos. Esto también reducirá la contaminación de la atmósfera con humos emitidos durante la quema.

CONCLUSIONES

- El rendimiento de la caña de azúcar y la cantidad de N absorbido por la planta en las condiciones del trópico húmedo dependen del tipo de drenaje agrícola. El sistema de drenaje que propició un mejor desarrollo de la caña de azúcar (variedad Mex. 69-290) fue la combinación del drenaje topo con drenaje subterráneo con trincheras rellenas con arena, determinado por el

rendimiento de la caña de azúcar y por la máxima absorción de N observada en cada parcela experimental. La aplicación de este sistema de drenaje permite obtener el rendimiento más alto de tallo para la industria (124 Mg ha^{-1} en experimento) y una mayor absorción de N (225.6 kg ha^{-1}), en comparación con los otros tipos de drenaje parcelario, cuando se aplica una dosis de 120 kg ha^{-1} .

- En la parcela con el drenaje superficial se obtuvo el menor rendimiento (74 Mg ha^{-1}) y una menor absorción de N (97 kg ha^{-1}), causado por el alto contenido de humedad del suelo presentado en los períodos lluviosos.

LITERATURA CITADA

- Alfonso, C.A., B. González y M. Ovcherenko. 1981. Estudio del sistema radicular de la caña de azúcar por el método de cilindros. *Cienc. Tec. Agric. Suelos y Agroquímicos* 4(3): 45-57.
- Boddey, R.M., S. Urquiaga, V. Reis y J. Döbereiner. 1991. Biological nitrogen fixation associated with sugar cane. *Plant Soil* 137: 111-117.
- Campbell, C.A. y H.R. Davidson. 1979. Effects of temperature, nitrogen fertilization and moisture stress on growth, assimilate distribution and moisture use by Manitou spring wheat. *Can. J. Plant Sci.* 59: 603-626.
- Campbell, C.A., D.R. Cameron, W. Nicholaichuk y H.R. Davidson. 1977. Effects of fertilizer N and soil moisture on growth, N content, and moisture use by spring wheat. *Can. J. Soil Sci.* 57: 289-310.
- Campbell, C.A., H.W. Cutforth, F. Selles, R.M. Depauw y J.M. Clarke. 1990. Dynamics of dry matter, N, and P accumulation in the developing kernels of four spring wheat cultivars for irrigation and dryland. *Can. J. Plant Sci.* 70: 1043-1056.
- Cannell, R.Q., M.J. Goss, G.L. Harris, M.G. Jarvis, J.T. Douglas, K.R. Howse y S. Le Grice. 1984. A study of mole drainage with simplified cultivation for autumn-sown crops on a clay soil. I. Background, experiment and site details, drainage systems, measurement of drainflow and summary of results, 1978-80. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 102: 539-559.
- Coale, F.J., C.A. Sánchez, F.T. Izuno y A.B. Bottcher. 1993. Nutrient accumulation and removal by sugarcane grown on Everglades Histosols. *Agron. J.* 85: 310-315.

- Davies, D.B. y D. Payne. 1992. Manejo de las propiedades físicas del suelo. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Etchevers B., J. 1988. Análisis químicos de suelos y plantas. Colegio de Postgraduados. México, México.
- FAO-UNESCO. 1988. Soil map of the world. Revised legend world soil resources report 60. Rome, Italy.
- Fauconnier, D. y D. Bassereu. 1975. La caña de azúcar: Técnicas agrícolas y producciones tropicales. Blume. Barcelona, España.
- González E., D.R., S. Alcalde B., J. Ortiz C. y A. Castillo M. 1997. Dinámica de extracción de nitrógeno por trigo en diferentes ambientes. *Agrociencia* 31: 133-142.
- Hagan, R.M., H.R. Haise y T.W. Edminster. 1987. Irrigation of agricultural crops. *Agron. J.* 11: 649-652.
- Hyams, D. 1997. A curve fitting system for Windows (computer programme). Version 1.34. Microsoft Corp. San Francisco, CA.
- Lima, E., R.M. Boddey y J. Döbereiner. 1987. Quantification of biological nitrogen fixation associated with sugar cane using a ^{15}N aided nitrogen balance. *Soil Biol. Bioch.* 19: 165-170.
- Mendoza P., J. De D., I. Nikolskii G. y O.L. Palacios V. 1998. Evaluación del funcionamiento hidráulico de un drenaje subterráneo en la Chontalpa, Tabasco. *Agrociencia* 32: 217-223.
- Payne, D. y P.J. Gregory. 1992. La atmósfera del suelo. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Pérez L., J., R. Cabrera y J.R. Martín O. 1996. Drenaje en la caña de azúcar. *Cuba & Caña* 1(2): 25-27.
- Raun, W.R., G.V. Johnson, R.K. Broman, S.L. Taylor, E.R. Allen, M.E. Jojola, E.N. Ascencio, E.A. Guertal y R.L. Westerman. 1993. Fate of fertilizer nitrogen in soils. pp: 93-100. *In: Soil fertility research highlights 1993*. Oklahoma State University. Stillwater, OK.
- Resnik, M.E. 1980. Nutrición mineral. Fisiología vegetal. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina.
- Ritzema, H.P. 1994. Drainage principles and applications. Publ. 16. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, The Netherlands.
- Rivera, R., A. Velazco y E. Treto. 1991. La fertilización (^{15}N), nutrición nitrogenada y actividad de los microorganismos nitrificadores en la caña de azúcar, cepa de caña planta, cultivada sobre suelo ferrolítico rojo. *Cultivos Trop.* 12(2): 21-28.
- Salgado G., S. 1999. La fertilización NPK en el rendimiento de la caña de azúcar. Tesis de Doctor. Colegio de Postgraduados, México, México.
- Salgado G., S., R. Núñez E., J.J. Peña C., J.D. Etchevers B., D.J. Palma L. y R.M. Soto H. 2000. Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* 34: 689-698.
- Trujillo N., A. y D.J. Palma L. 1988. Estudio agroecológico detallado del CECAIDES-CP. Área del Trapecio Km 21. Colegio de Postgraduados. H. Cardenas, Tabasco.
- Urquiaga, S., K.H. Cruz y R.M. Boddey. 1992. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: Nitrogen-15 and nitrogen-balance estimates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 105-114.
- Zegelin, S.J. e I. White. 1989. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 25: 2367-2376.

DELIMITACIÓN DE ÁREAS SALINAS EN EL DISTRITO DE RIEGO DE CABORCA, SONORA, MÉXICO

Delimitation of Saline Areas in the Irrigation District of Caborca, Sonora, Mexico

Benjamín Zamudio-González², Luis López-Pérez¹, Gabriel Alcántar-González³,
Diego R. González-Eguiarte^{4†}, José Ariel Ruiz-Corral⁴ y Javier Z. Castellanos⁵

RESUMEN

No obstante que la degradación de suelos por exceso de sales es un problema actual y un riesgo latente en más de 115 000 ha de los distritos de riego de la costa de Sonora, no existen estudios sistemáticos y actualizados del avance de este problema a escala regional, por lo cual, el presente estudio tuvo como objetivo delimitar las áreas potencialmente salinas y determinar el grado de salinidad del distrito de riego de Caborca. Se utilizó información de características físicas y químicas de suelo proveniente de la descripción de 125 perfiles agrológicos, efectuada en el año 1995; estos datos se complementaron con información de pozos agrológicos descritos en mapas edafológicos de DGETENAL de 1982. Se utilizó estadística no paramétrica para determinar la correlación entre las características fisicoquímicas de suelo y la conductividad eléctrica con el fin de delimitar áreas potenciales de salinización. Con los resultados de este análisis, se logró identificar tres variables físicas como causas potenciales de salinización: presencia de al menos una capa de limo fino y/o arcilla, drenaje interno lento y estructura grumosa. La delimitación de las áreas salinas se hizo al correlacionar, por fotointerpretación, atributos de las fotografías aéreas de la región, como vegetación, drenaje, textura y tonalidad, con datos del contenido

de sales medidos en campo. Con el sistema de información geográfica (SIG) ILWIS, se digitalizaron los resultados de la fotointerpretación para elaborar un mapa de áreas con salinización potencial del cual se concluyó que 55.68% de la cuenca posee algún grado de exceso de sales.

Palabras clave: Degradación de suelos, salinización de suelos, fotointerpretación, cartografía, SIG.

SUMMARY

Even though soil degradation due to excess salt is an on-going problem and a latent risk in more than 115 000 ha of the irrigation districts of the coast of Sonora, Mexico, there are no systematic and updated regional studies of how this problem has advanced. For this reason, the objective of the present study was to delimit the potentially saline areas and to determine the degree of salinity of the Caborca irrigation district. Information related to soil physical and chemical properties from a description of 125 agrological profiles, done in 1995, was used; these data were complemented with information from agrological wells described in edaphological maps from DGETENAL in 1982. Non-parametric statistics were used to establish correlation between soil physical and chemical properties and variables indicating salinity, such as electrical conductivity, in order to delimit areas of potential salinization. With the results of this analysis, three physical variables were identified as potential causes of salinization: presence of at least one layer of fine silt and/or clay, slow internal drainage and cloddy soil structure. Using photo-interpretation, saline areas were delimited by correlating attributes of aerial photographs of the region with field data of salt content. Results of the photo-interpretation process were digitized with the geographic information system (GIS) ILWIS to obtain a map of areas of potential salinization, from which it was concluded that 55.68% of the watershed has some degree of salt excess.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Centro de Investigación Regional del Centro. Toluca, estado de México.

² Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.

³ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.

⁴ INIFAP-Centro de Investigaciones del Pacífico Centro. Parque Los Colomos s/n, Col. Providencia. 44660 Guadalajara, Jalisco, México.

[†] Autor responsable. (drgonzal@udgserv.cencar.udg.mx)

⁵ INIFAP-Campo Experimental Bajío. Celaya, Guanajuato, México.

Index words: Soil degradation, soil salinization, photointerpretation, cartography, GIS.

INTRODUCCIÓN

En México, la distribución y extensión de suelos con problemas de sales se está incrementando en áreas de riego de las zonas áridas (Ortiz, 1992). De forma simultánea, la calidad del agua de riego en estas áreas es deteriorada progresivamente debido al exceso de sales (Pulido, 1994); aunado a esto, cuando existe un mal manejo del agua y del suelo, desatendiendo los factores promotores de acumulación de sales, el proceso de salinización de los suelos se acelera y agrava (Rhoades, 1990). Esto trae como consecuencia un deterioro progresivo de los suelos por salinización, lo cual repercute en una disminución de la productividad de éstos y del rendimiento y de la calidad de las cosechas (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 2002; Carter, 2002), así como en un incremento de los impactos negativos sobre el ambiente y el nivel socioeconómico de la población (Sharma *et al.*, 1995).

Las costas del estado de Sonora no escapan a este fenómeno, ya que la cantidad de recursos hidráulicos es cada año más reducida, debido a la sobreexplotación de los acuíferos (INEGI, 1993; CNA, 1995); esto ocasiona que pozos cercanos a la costa se contaminan por sales a causa de la intrusión de agua de mar a los acuíferos. Los distritos de riego de Caborca y Hermosillo obtienen agua para irrigar un poco más de 115 000 ha, mediante bombeo profundo en el desierto del norte de Sonora e iniciaron la explotación de los acuíferos al principio de la década de los cincuenta. En la actualidad, esta superficie cultivada requiere que se extraiga un volumen del orden de $600 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, cuando las recargas naturales son de sólo $350 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (INEGI, 1993; CNA, 1995). Por otra parte, algunas condiciones de clima y manejo en la región propician un proceso de salinización, en especial la evaporación del agua que se acumula en las depresiones y por el movimiento ascendente de aguas procedentes de fuentes artesianas o de menor profundidad (Havlin *et al.*, 1999).

Como consecuencia de este diferencial tan significativo, se han generado políticas gubernamentales tendientes a la conservación del recurso, como: la restricción del bombeo, el encarecimiento de las tarifas eléctricas, la optimización del uso de agua a través de incentivar el

revestimiento de canales, la nivelación de suelos y, recientemente, el riego localizado y presurizado en cultivos hortícolas y frutícolas, los cuales generan, además, una alta demanda de mano de obra y productos exportables que ingresan divisas a México (CNA, 1995). No obstante que la implementación de estas medidas ha contribuido tal vez a contener un acelerado proceso de salinización en la región, debido a que se hace más eficiente el consumo del agua ocasionando con ello la disminución de los volúmenes de extracción de los acuíferos, el problema es palpable y carece, en la actualidad, de un estudio de caracterización que permita cuantificar los índices de salinidad con relación al potencial de daño a cultivos regionales.

Por lo anterior, los objetivos del presente estudio fueron determinar el grado de correlación entre variables indicadoras de salinidad y características físicoquímicas del suelo como base para la categorización, cuantificación y delimitación de áreas con diferentes índices potenciales de salinización sobre fotografía aérea.

Una manera de hacer un mapa de salinidad es con el uso de fotografías aéreas que, mediante la técnica de fotointerpretación (Verma *et al.*, 1995), asociada con patrones de vegetación (Krebb *et al.*, 1995), refracción y mineralogía de sales (Jacques *et al.*, 1994), permiten delimitar áreas salinas y, por digitalización, cuantificar la superficie degradada por exceso de sales. También, mediante la interpretación de imágenes de satélite colectadas con diferentes bandas, es posible asociar el desarrollo de cultivos específicos con datos de salinidad de campo, lo cual permite generar claves digitalizadas para elaborar con precisión planos generales de la salinidad de amplias superficies de los distritos de riego (Wiegand *et al.*, 1994). La utilización de datos de análisis de suelos como fuente de información para alimentar sistemas de información geográfica (Buin *et al.*, 1996), permite asociar la salinidad de perfiles a las claves taxonómicas (Pulido, 1994) y las limitantes del crecimiento de raíces y acumulación de sales (Oster *et al.*, 1992). Estudios realizados con estas técnicas permiten la digitalización y cuantificación de áreas ensalitradas a distintos niveles de detalle, mismos que se usan para el monitoreo de la extensión del fenómeno, además de la implementación de estrategias para la prevención, el control y manejo de estas áreas (Sharma y Bhargava, 1993; Pulido *et al.*, 1997).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se consideró como área de estudio la cuenca del distrito de riego de Caborca, Sonora, la cual es una planicie costera aluvial, con una altitud que va de 400 m en la parte continental a 20 m en una zona distanciada 10 km del litoral del Golfo de California (INEGI, 1993). El transecto tiene 120 km de longitud y la cuenca se ubica entre 29°20' y 32°00' N y entre 114°00' y 116°10' O, con una altitud promedio de 280 m.

La costa de Caborca está formada por corrientes fluviales recientes en una geoforma alargada en el curso de las huellas de arroyos y ríos con salida al mar; las texturas son más gruesas y uniformes en los perfiles a 1.50 m, presentando más de 80% de arenas y limos con alta proporción de gravillas finas; los subsuelos tienen acumulaciones de carbonato de calcio (DGGTENAL, 1982).

Los climas áridos, la sobreexplotación de los acuíferos y el mal manejo del riego a escala parcelaria, son factores que han causado la acumulación excesiva de sales en los suelos regionales (CNA, 1995).

Se conjuntó la información institucional disponible en estudios agrológicos del distrito de riego de Caborca, Sonora (INEGI, 1993; Pulido, 1994; CNA, 1995). La información de 125 pozos agrológicos (CNA, 1995) se ubicó en mapas edafológicos (INEGI, 1993) y fotografías aéreas en blanco y negro, escala 1:75 000, correspondientes al vuelo SINFA de 1994, las cuales fueron proporcionadas por el INEGI.

Se capturaron, en EXCEL, las características físicas y químicas de los suelos y el contenido de sales por cada capa de los perfiles de suelo. Dichos datos se verificaron en cuanto a su calidad por medio de la concordancia del valor de la suma de cationes y aniones, así como la proporcionalidad de la conductividad eléctrica (CE) con la suma de cationes multiplicada por 10 y el valor del pH con la presencia de HCO_3^- y CO_3^{2-} .

Los estudios se enfocaron a dos tipos de análisis: uno, estadístico, y otro, de fotointerpretación. Para el primero, se utilizó estadística no paramétrica debido a que se categorizaron las variables. Las categorizaciones de las propiedades físicas se realizaron según sus características, para la estructura por su tipo (Ortiz y Ortiz, 1990), la clase textural de acuerdo con las proporciones de arena, limo y arcilla (Ortiz y Ortiz, 1990), para el drenaje interno según el

avance definiéndose cinco clases: 1 Muy lento ($< 1 \text{ cm h}^{-1}$), 2 Lento (1 a 2 cm h^{-1}), 3 Normal (2 a 4 cm h^{-1}), 4 Rápido (4 a 8 cm h^{-1}) y 5 muy rápido ($> 8 \text{ cm h}^{-1}$); y para la salinización se categorizaron de acuerdo con los índices propuestos por el US Department of Agriculture (USDA, 1993). Para obtener las matrices de correlación, se usó el paquete de cómputo "ABSTAT" (AndersonBell, 1991) y, utilizando el algoritmo "SRANK" (coeficiente de Spearman), se obtuvieron correlaciones entre características fisicoquímicas de cada capa del suelo y la variable de salinización (conductividad eléctrica, CE). Una vez determinadas las correlaciones, se localizaron los pozos agrológicos que tenían por lo menos alguna de las características correlacionadas con la salinización. Los pozos se localizaron geográficamente en el mapa edafológico de INEGI, en el cual estaba delimitada el área de estudio. Se ubicaron las unidades de suelo en que se encontraron y se concluyó que toda la unidad de suelo donde se localizaba el pozo presentaba la característica que propició la salinización; lo mismo se realizó para cada una de las propiedades físicas con alta correlación. Las características que mejor se correlacionaron con la CE se identificaron como variables indicadores de salinidad, por lo que se utilizó para definir una escala de riesgo de salinización. En esa clave se calificó la presencia o ausencia de alguna de las variables indicadoras, asignando el máximo índice de riesgo a la condición que reunía a todas las variables y el mínimo a la condición en que no estaba presente ninguna variable. Entre estas dos condiciones extremas se consideraron también condiciones intermedias, valorando el número de variables indicadoras presentes. Se consideró como salinización una $\text{CE} > 4 \text{ dS m}^{-1}$. De esta manera, se generaron mapas base por cada una de las propiedades con una alta correlación y, al final, se obtuvo un mapa paramétrico en el cual se ubicaron todas las propiedades.

Para el segundo tipo de análisis, el de fotointerpretación, se establecieron claves de fotointerpretación (Stramberg, 1975), con base en los atributos de fotografías aéreas de la región (vegetación, drenaje, texturas y tonalidad), y los datos relacionados con los potenciales de salinización (previamente determinados). En la fotointerpretación se ubicaron los linderos de las unidades de suelo con problemas de salinización de acuerdo con el mapa paramétrico. La fotointerpretación consistió básicamente en la verificación y corrección de los

linderos, de igual modo se ubicaron nuevas áreas con algún grado de afectación salina de acuerdo con rasgos observados en la fotografía. Asimismo, se proporcionaron nuevos valores de grado de afectación salina en áreas que así lo requirieron. La fotointerpretación se realizó con un estereoscopio de espejos marca Wild ST-4 y las unidades delimitadas se transfirieron con un Zoom-transferoscopio sobre un mapa base, escala 1:75 000. Los mapas generados se digitalizaron en el sistema de información geográfica (SIG) "ILWIS" (ITC, 1992) y la edición cartográfica final se obtuvo con el paquete "AUTOCAD" versión 10 (AUTODESK, 1991).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las características analizadas del suelo de Caborca, las que mejor se correlacionaron con el parámetro CE fueron: textura fina (limos y/o arcillas), estructura (grumosa) y drenaje interno (lento). Los valores de los coeficientes de correlación en las matrices fueron del orden de 0.70 a 0.82. Éstos se incrementaron a los valores que se muestran en el Cuadro 1, al considerar en el análisis un índice refinado de esas variables, que consiste en una ponderación de las mismas por el espesor de las capas de suelo en cada perfil.

Estos coeficientes de correlación (Cuadro 1) indican que dichas variables podrían ser utilizadas en la región para inferir salinización potencial en suelos de la Cuenca.

Los resultados obtenidos concuerdan con los consignados por Condom *et al.* (1999), quienes mencionaron que texturas finas irrigadas con aguas con problemas de sales, tienden a un mayor riesgo de salinización respecto a texturas gruesas. Esto es explicable, considerando que el movimiento de agua salinizada por capilaridad hasta la zona de raíces es más lento en texturas finas que en gruesas, debido al menor tamaño de poros del suelo (Franzen *et al.*, 1994).

Cuadro 1. Coeficiente de correlación entre variables físicas y conductividad eléctrica (CE) del suelo de Caborca, Sonora, México.

Variable	CE × espesor de capa
Textura fina (limos o arcillas)	0.94
Drenaje interno lento	0.84
Estructura grumosa	0.89

Con respecto a la condición de drenaje interno lento, esto se explica considerando que la acumulación de sales en los primeros estratos del suelo en general está asociada a limitaciones de drenaje (Villafañe *et al.*, 1999). Un drenaje lento, que normalmente está ligado a la presencia de texturas finas, hace que un suelo sea propenso a la salinización debido a que facilita que el agua con sales diluidas se mantenga por más tiempo cercana a la zona de raíces y superficie del suelo (Swift y Koski, 2001).

Debe tomarse en cuenta que, aun cuando fue la condición de drenaje interno lento (1 a 2 cm h⁻¹), la que resultó altamente correlacionada con conductividad eléctrica; es razonable considerar que también la condición de drenaje interno muy lento (< 1 cm h⁻¹) se encuentre vinculada con una predisposición o propensión a procesos de salinización del suelo.

Con respecto a la condición de estructura grumosa, su correlación significativa con un proceso de salinización puede explicarse al considerar que esta forma de estructura del suelo promueve un desplazamiento lento de líquidos en el suelo, lo que ocasiona que las sales disueltas permanezcan por más tiempo en los estratos superiores del suelo y, por lo tanto, con mayores posibilidades de alojarse en los horizontes agrícolas.

Aunado a ello, los suelos con un contenido de limo superior al de un suelo de textura media son proclives a una baja estabilidad estructural (Villafañe *et al.*, 1999), como es el caso de la estructura del tipo grumosa, lo cual propicia salinización del suelo por las razones expuestas en el párrafo anterior.

Estos resultados permiten concluir que es factible utilizar propiedades físicas del suelo para inferir, de manera indirecta, el potencial de salinización.

De acuerdo con estos resultados, las tres variables físicas mencionadas se consideraron en lo subsiguiente como variables indicadoras de salinización potencial y se tomaron como base para establecer los índices de salinización que se describen en el Cuadro 2.

En esta clasificación, el índice máximo de salinización lo representa la Clase 1, en la cual se combinan o se hacen presentes los tres factores limitativos del suelo (variables indicadoras); en contraste, la Clase 4 corresponde a un nulo riesgo de salinización, dado que ningún factor limitativo se encuentra presente en el suelo. Las Clases 2 y 3 son condiciones intermedias de salinización potencial al incluir el Factor de riesgo 2 y 1, respectivamente.

Cuadro 2. Niveles de salinización potencial en función de factores limitativos del suelo.

Clase	Factor limitativo del suelo presente
1	Perfil con capa(s) de textura fina, drenaje interno lento y estructura grumosa
2	Perfil con capa(s) de textura fina y drenaje interno lento o Perfil con capa(s) de textura fina y estructura grumosa o Drenaje interno lento y estructura grumosa
3	Perfil con capa(s) de textura fina o Drenaje interno lento o Estructura grumosa
4	Ningún factor limitativo

Clase 1 > 2 > 3 > 4 respecto a salinización potencial.

Con base en esta clasificación, se derivó el mapa de salinización potencial de Caborca, el cual se presenta en la Figura 1. En este mapa se observa que de un total de 738 887 ha que cubre la región de Caborca, 29.1% de la superficie, esto es 214 889 ha, resultó con un alto potencial de salinización (Clase 1), debido a la conjugación de los tres factores limitativos del suelo (drenaje interno lento, textura fina y estructura grumosa). Estas áreas se localizan principalmente en una franja adyacente al Golfo de California y en las zonas este y sureste, cercanas al centro urbano de Caborca. De la superficie, 12.4%, que corresponde a 92 033 ha, se identificó como Clase 2 ó regular potencial de salinización, distribuyéndose en cinco zonas localizadas al noroeste, oeste y sur de la cuenca hidrográfica. Otra condición de salinización que pudiera denominarse de bajo potencial de salinización (Clase 3), se identificó en 14.1% de la superficie de la cuenca, esto es 104 472 ha, las cuales se localizaron en áreas que se distribuyeron de manera generalizada en casi toda la región. Finalmente, 44.3% de la superficie regional, o sea 327 483 ha, corresponden a la Clase 4, esto es sin riesgo de salinización, las cuales se ubican en la parte alta de la zona, cerca de la plataforma continental.

Esta delimitación de áreas, de acuerdo con su mayor (Clase 1) o menor propensión (Clase 4) a la salinización, constituye una información clave en la toma de decisiones para el manejo futuro de los suelos de la región, ya que permite establecer tratamientos específicos preventivos o de control, diferenciados para cada tipo de tierra.

De acuerdo con estos resultados, es posible concluir que aproximadamente la mitad de la superficie de la cuenca de Caborca es potencialmente salina, al menos en algún grado. Sin embargo, dado que estos resultados se expresan en términos de

salinidad potencial, antes de proceder a operar un manejo de tierras, es necesario validar, en campo, la estratificación de zonas obtenida, mediante el muestreo de conductividad eléctrica y variables indicadoras de salinidad en dichas zonas.

De manera coincidente con Rhoades (1999), la información generada en este trabajo será de gran utilidad a futuro para el monitoreo, el manejo y las prácticas de recuperación de las áreas salinas, así como para la planeación del buen manejo de las áreas no salinas y el uso racional del agua de riego, todo ello en pro del aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos y edáficos de la región.

Es preciso considerar, en el futuro inmediato, la necesidad de contrastar la cartografía de salinidad potencial con la cartografía de salinidad actual para caracterizar de forma integral el problema de salinización de suelos de la Cuenca.

CONCLUSIONES

- Existe una correlación estadísticamente significativa entre propiedades físicas y la conductividad eléctrica del suelo del distrito de riego de Caborca, Sonora.
- Las propiedades físicas que presentan este tipo de correlación son: estructura, textura y drenaje interno. De estas propiedades, las condiciones que causan propensión a salinización son estructura grumosa, textura fina de limos o arcillas y drenaje interno lento, por lo que pueden ser utilizadas como variables indicadoras de salinidad potencial en los suelos de la cuenca de Caborca.
- Es posible delimitar zonas de distribución espacial de las propiedades físicas antes mencionadas y así generar mapas de salinidad potencial, utilizando sistemas de información geográfica alimentados con datos de muestreos de campo e información a partir de interpretación de fotografía aérea.
- De acuerdo con estas variables indicadoras, un poco más de la mitad de la superficie de la cuenca experimenta, en la actualidad, algún grado de salinización. De un total de 738 887 ha que cubre la cuenca de Caborca, 29.1% de la superficie, esto es 214 889 ha, presenta un alto potencial de salinización.
- El mapa de áreas potenciales de salinización, generado en este estudio, puede constituir una herramienta de apoyo para establecer estrategias de manejo preventivo diferenciado de las tierras del distrito de Caborca, en función de su distinto índice de salinización potencial. Sin embargo, es importante considerar, a corto plazo, la necesidad de cotejar la

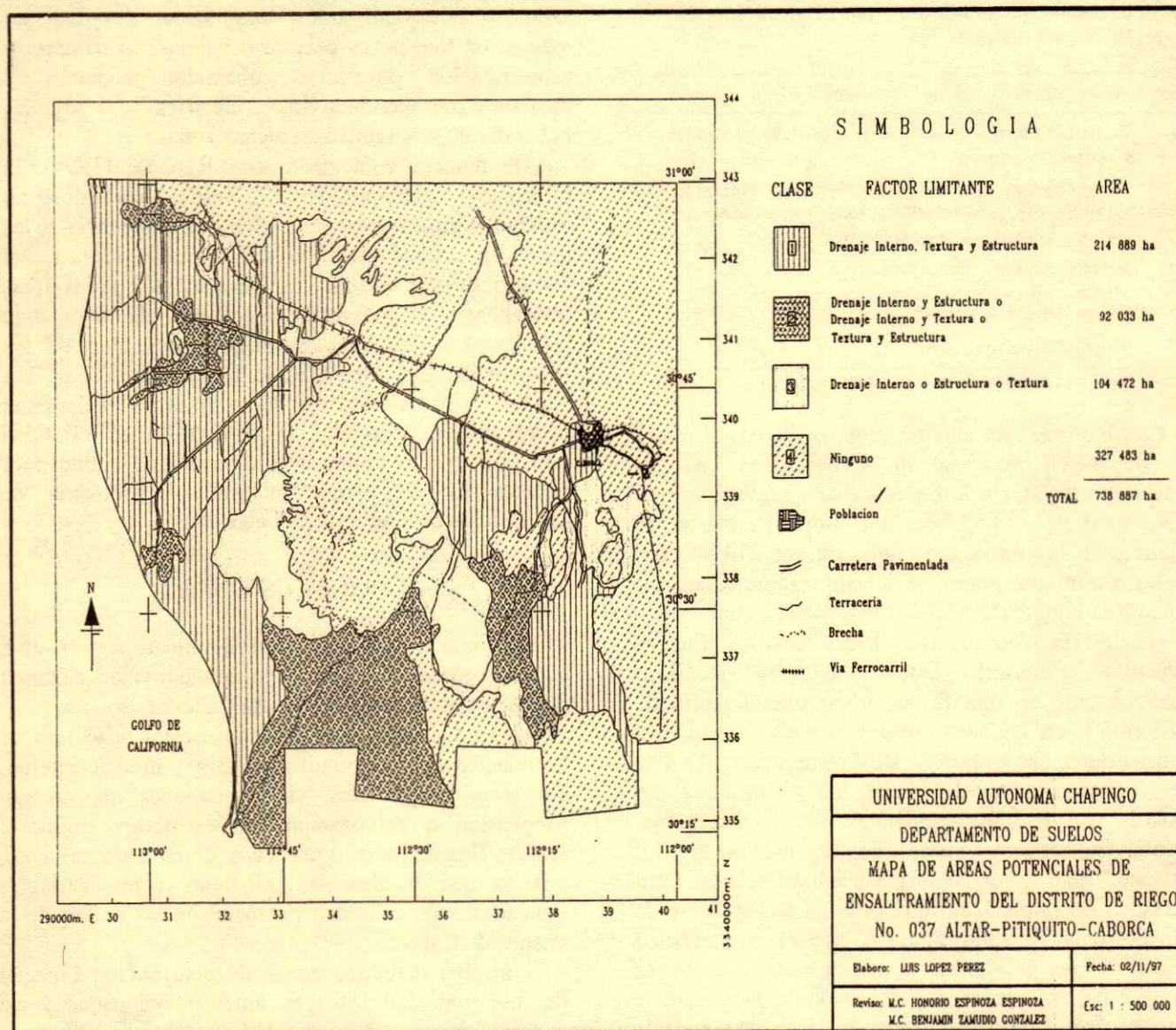


Figura 1. Mapa de áreas potenciales de ensalitramiento del Distrito de Riego 037 Altar-Pitiquito-Caborca.

cartografía de salinidad actual con la de salinidad potencial para obtener una visión integral del problema y diseñar adecuadamente un programa de manejo de los suelos de la región, tanto en el aspecto de prevención de salinización de suelos, como en el de recuperación de tierras donde ya existe el problema.

LITERATURA CITADA

- AndersonBell. 1991. ABSTAT v. 2.0 for DOS. User's manual. Arvada, CO.
- AUTODESK. 1991. AUTOCAD v. 10 para DOS. User manual. AUTODESK Inc. Las Vegas, NV.
- Bayuelo-Jiménez J.S., R. Craig y J.P. Lynch. 2002. Salinity tolerance of *Phaseolus* species during germination and early seedling growth. *Crop Sci.* 42: 1584-1594.
- Buin, E.N., K.R.J. Smettem, C.J. Moran y J. Williams. 1996. Use of soil survey information to assess regional salinization risk using geographical information systems. *J. Environ. Quality* 25(3): 433-439.
- Carter, M.R. 2002. Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94: 38-47.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1995. Características generales del Distrito de Riego 037 Altar-Pitiquito-Caborca. H. Caborca, Sonora. Gerencia Estatal en Sonora, Caborca, Sonora, México.
- Condom, N., M. Kuper, S. Marlet, V. Valles y J. Kijne. 1999. Salinization, alkalization and sodification in Punjab

- (Pakistan): Characterization of the geochemical and physical processes of degradation. *Land Degradation and Dev.* 10(2): 123-140.
- DGGTENAL. Dirección General de Geografía y Estudios del Territorio Nacional. 1982. Carta edafológica, escala 1:50 000. Cartas H12A53-57 y H12A63-67. Unidad de suelo según clasificación FAO/UNESCO (1970), modificada por DETENAL. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, D.F.
- Franzen, D., C. Fanning y T. Gregoire. 1994. Managing saline soils in North Dakota. SF-1087. NDSU Extension Service, North Dakota St. University. Fargo, ND.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale y W.L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. Sixth Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1993. Recursos hidrológicos del estado de Sonora. Dirección de Estadística. Secretaría de Gobernación. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- ITC. International Training Center. 1992. ILWIS v. 3.1. 1992. Integrated Land and Water Information System. User manual. Department of Earth Resources Surveys-International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands.
- Jacques, D., Y. Guero, P. Fallavier y V. Sergel. 1994. Mineralogy of salt efflorescences in paddy field soils of Kollo, southern Niger. *Geoderma* 64: 57-71.
- Krebb, K.H., R.D.B. Whalley y J.L. Charley. 1995. Some investigations into soil and vegetation relationships associated with alkaline-saline soil surfaces in the Walcha area, Northern Tablelands, New South Wales. *Austr. J. Agric. Res.* 46: 209-224.
- Ortiz V.B. y C.A. Ortiz S. 1990. Edafología. Séptima reimpresión. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Ortiz O. M. 1992. Distribución y extensión de los suelos afectados por sales en México y el mundo. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Oster, J.D., M.J. Singer, A. Fulton, W. Richardson y T. Prichard. 1992. Water penetration problems in California soils. Kearney Foundation of Soil Science. University of California. Berkeley, CA.
- Pulido M. L. 1994. Estudio general de salinidad analizada. Anexo Técnico. Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje. Subcoordinación de Uso Eficiente del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Pulido M., L., C.L. Wiegand, C. Rodríguez Z. y S. Neck. 1997. Imágenes de satélite para identificar la salinidad del suelo en los distritos de riego. *Terra* 15: 201-210.
- Rhoades, J.D. 1990. Overview: Diagnosis of salinity problem and selection of central practices. pp. 18-41. *In: Tanji, K.K. (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. Manual 71. American Society of Civil Engineering. New York.*
- Rhoades, J.D. 1999. Integrated irrigation drainage management to sustain irrigation and to protect soil and water resources. *US Salinity Laboratory. GRID-IPTRID-Network-Magazine* 13: 3-5.
- Sharma, R.C. y G.P. Bhargava. 1993. Remote sensing for assessing the distribution and characterization of saline and alkali soils in Harvana. *Agropedology* 3: 95-104.
- Sharma, R.C., R.K. Saxena y K.S. Verma. 1995. Limitations and productivity potential of alkali soils of North-West Indian plains. *Agropedology* 5: 79-82.
- Strandberg, C.H. 1975. Manual de fotografía aérea. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- Swift, C.E. y A.J. Koski. 2001. Growing turf on salt-affected sites. Fact Sheets 7227. Colorado State University, Cooperative Extension Service. Grand Junction, Colorado.
- USDA. US Department of Agriculture. 1993. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salino-sódicos. 7a reimpresión. LIMUSA. México, D.F.
- Verma, K.S., R.K. Saxena y A.K. Bartwal. 1995. Mapping of salinity/sodicity levels for improving reclamation strategy in Etah district. *Agropedology* 5: 15-24.
- Villafañe, R., O. Abarca, M. Azpúrua, T. Ruiz y J. Dugarte. 1999. Distribución espacial de la salinidad de los suelos de Quibor y su relación con las limitaciones de drenaje y la calidad del agua. *Bioagro* 11(2): 43-50.
- Wiegand, C.L., J.D. Rhoades, D.E. Escobar y J.H. Everitt. 1994. Photographic and videographic observations for determining and mapping the response of cotton to soil salinity. *Remote Sensing Environ.* 49(3): 212-223.

RENDIMIENTO Y CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL FOLIAR DE ÁRBOLES DE LIMÓN MEXICANO FERTILIZADOS CON NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO

Yield and Leaf Nutritional Concentration in Mexican Lime Fertilized with Nitrogen, Phosphorus, and Potassium

Octavio Pérez-Zamora^{1†} y José Orozco-Romero¹

RESUMEN

El estado de Colima es el principal productor de limón mexicano [*Citrus aurantifolia* Christm (Swingle)] en México; sin embargo, algunas de las prácticas de manejo, como la fertilización, están poco definidas y las dosis usadas son muy heterogéneas. El objetivo del estudio fue estimar la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada, fosfatada y potásica en el rendimiento de fruta y estado nutricional del follaje. El trabajo se efectuó en un suelo de textura arenosa, plantado con árboles de 15 años de edad, donde se aplicaron dosis de 0 a 2.7, de 0 a 1.675 y de 0 a 1.675 kg árbol⁻¹ de N, P y K, respectivamente. Las concentraciones foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Fe, Mn, Zn y Cu se analizaron en brotes vegetativos de cinco y medio meses de edad. El rendimiento de fruto se incrementó únicamente con N (1.2 a 2.7 kg árbol⁻¹); esta respuesta se expresó analíticamente con la ecuación: $Y = 15.62 + 13.4 * N - 2.88 * N^2$, donde Y = rendimiento de fruta en t ha⁻¹ y N = kg N árbol⁻¹. La máxima concentración foliar de N se obtuvo con 2.4 kg N árbol⁻¹. No se observó respuesta del P ni K sobre el rendimiento ni sobre el estado nutricional del árbol. Todos los tratamientos mostraron concentraciones de N, K, Ca, Mg, Na, Fe y Cu mayores que el valor de suficiencia, mientras que las de S y Zn fueron menores que el valor de referencia. Al aplicar N, se incrementó el N y Mg foliar, pero decreció el P, K y Ca.

Palabras clave: [*Citrus aurantifolia* Christm (Swingle)], fertilización nitrogenada, análisis foliar, Calcisol pétrico.

¹ Campo Experimental Tecomán. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 88. 28100 Tecomán, Colima, México.

[†] Autor responsable (inifaptecoman@prodigy.net.mx)

SUMMARY

The state of Colima, Mexico, is the main producer of Mexican lime [*Citrus aurantifolia* Christm (Swingle)]. However, some management practices like fertilization are not well defined and used doses are very heterogeneous. The objective of this work was to observe the response of Mexican lime to nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization in terms of fruit yield and foliar nutrient concentration. The study was carried out on a sandy soil planted with a 15-year old orchard, where N, P, and K were applied at levels of 0 to 2.7, of 0 to 1.675, and of 0 to 1.675 kg tree⁻¹, respectively. Chemical concentrations of N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Fe, Mn, Zn, and Cu were determined in five-and-a-half-month-old vegetative buds. Fruit yield increased only with N (1.2 a 2.7 kg tree⁻¹). This response was expressed analytically with following equation: $Y = 15.62 + 13.4 * N - 2.88 * N^2$, where Y = fruit yield in t ha⁻¹ and N = kg of N tree⁻¹. Maximum N foliar concentration was also obtained with 2.4 N kg tree⁻¹. No response to P and K fertilization was observed for fruit yield or for chemical concentration. All the fertilization treatments had N, K, Ca, Mg, Na, Fe, and Cu concentrations above the sufficiency reference level, while S and Zn were below this level. Nitrogen application increased N and Mg foliar concentration, but lowered that of P, K, and Ca.

Index words: [*Citrus aurantifolia* Christm (Swingle)] nitrogen fertilization, foliar analysis, Petric calcisol.

INTRODUCCIÓN

En el estado de Colima, la mayoría de la superficie dedicada al cultivo del limón mexicano [*Citrus aurantifolia* Christm (Swingle)] corresponde a suelos cuya textura va desde arenosa a arena franca, con contenido bajo de materia orgánica y nitrógeno, pero adecuado nivel de fósforo y muy ricos en potasio (INEGI, 1999).

Estudios previos indican que estos suelos respondieron positivamente a las aplicaciones anuales de 1.2, 0.6, y 0.6 kg árbol⁻¹ de N, P y K, respectivamente (Orozco, 1996); el N incrementó el rendimiento de frutos de limón mexicano, mientras que el P y K tuvieron efecto positivo en la calidad de fruta de limón. Sin embargo, cuando el limón está asociado con palma de coco, Medina *et al.* (2001) recomendaron la fórmula 1.2, 0.6 y 0.9 kg árbol⁻¹ de N, P y K, respectivamente, y sugirieron aplicar el P y el K cada dos años.

En cambio, Cruz *et al.* (1984) observaron efecto diferencial en la respuesta a la fertilización del limón mexicano en el estado de Oaxaca. Las variaciones, atribuidas a diferencias en edad, altura y diámetro de tronco de los árboles, dificultaron recomendar dosis de fertilización para el cultivo y sirvieron para sugerir el uso de plantaciones homogéneas en futuros experimentos.

Sin embargo, la cantidad de fertilizante que los árboles requieren podría determinarse con mayor precisión conociendo el estado nutricional de los árboles. Al respecto, el análisis foliar es uno de los métodos de diagnóstico más útiles para evaluar el estado nutricional, aunque existan fuertes variaciones en el contenido foliar de la mayoría de los nutrientes en función del desarrollo fisiológico del árbol (Sepúlveda *et al.*, 1983). Por tal motivo, estos investigadores prefirieron evaluar el fruto a la caída de los pétalos en lugar de las hojas, encontrando que el contenido de N en éstos, resultó ser buen estimador de rendimiento. En contraste, Orozco (citado por Medina *et al.*, 2001) recomendó el análisis foliar con N en el intervalo de 2.05 a 2.3%, P de 0.157 a 0.24% y de K de 0.48 a 0.99% como concentraciones óptimas.

Según Maatouk *et al.* (1990), las aplicaciones de N incrementaron el contenido de N foliar, pero decrecieron el de P y K; por su parte, el uso de potasio aumentó el K foliar, el área foliar y la relación C/N, pero disminuyó las concentraciones de N y P. Por lo que respecta al P, al incrementar la dosis de aplicación, aumentó el contenido de P foliar, área foliar, relación C/N, excepto N y K.

Ahmed *et al.* (1990) probaron dosis de N, P y K aplicadas al suelo y observaron que todos los tratamientos incrementaron el peso y diámetro de fruto, así como el porcentaje de jugo de limón Egyptian Balady (*Citrus aurantifolia* L.), mientras que el grosor de la cáscara y el número de frutos fueron mayores sólo cuando se incrementaron las dosis de N y K.

En cuanto a la determinación DRIS, como método de diagnóstico en limón Verna [(*Citrus limon* L.) Burm.f.], resultó ser influenciado por la especie de portainjerto y la época de muestreo de las hojas; además, en condiciones de salinidad del suelo, DRIS falló en demostrar si la deficiencia nutricional era causada por exceso salino o debido a fertilización deficiente (Cerdeña *et al.*, 1995).

Para obtener una buena cosecha de limón, se requieren aplicaciones de cantidades adecuadas de nutrientes, en especial de N; sin embargo, dichas aplicaciones se efectúan en forma heterogénea en el estado de Colima, por lo que los resultados también son muy variables. El objetivo del presente trabajo fue determinar la mejor respuesta del limón mexicano a la aplicación de fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos en el rendimiento y en la concentración foliar de nutrientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Rancho San José, municipio de Tecmán, Colima, de enero a diciembre de 1998; las coordenadas son 18° 52' 22.2" N y 103° 53' 21.3" O; la temperatura media anual es de 26.1 °C y la precipitación anual de 733 mm. La textura del suelo es arenosa, con porcentajes de 90.92, 3.28 y 5.80% de arena, limo y arcilla, respectivamente. El pH del suelo (en agua 1:2) en 0.3 m de profundidad fue 8.1; el contenido de materia orgánica de 2.9% y la conductividad eléctrica (CE) de 1.1 dS m⁻¹. El análisis químico del suelo mostró valores de N-NO₃ = 2.89 mg kg⁻¹, P = 61 mg kg⁻¹, Ca = 1400 mg kg⁻¹, Mg = 420 mg kg⁻¹, K = 389 mg kg⁻¹, Na = 38 mg kg⁻¹, Cu = 1.2 mg kg⁻¹, Zn = 0.7 mg kg⁻¹, Fe = 3.1 mg kg⁻¹ y Mn = 5.6 mg kg⁻¹. La pendiente del terreno es menor que 1% y la altitud 10 m. El suelo tiene horizonte petrocálcico de 0.2 m de espesor, a la profundidad de 0.5 a 0.7 m y se clasificó como Calcisol pétrico (FAO, 1991).

El cultivo de limón de 15 años está asociado con cocotero de más de 35 años; la distancia de plantación es de 10 x 10 m. El limón mexicano está injertado sobre naranjo agrio (*Citrus aurantium* L.). El diseño experimental fue bloques al azar, con arreglo de tratamientos San Cristóbal III ortogonalizado; las dosis evaluadas fueron 0 a 2.7 de N, 0 a 1.675 de P₂O₅ y 0 a 1.675 de K₂O kg árbol⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Se usaron tres repeticiones con una unidad experimental de cinco árboles y tres de parcela

útil. El arreglo de tratamientos, dentro del diseño experimental, se muestra en el Cuadro 1.

Los fertilizantes se fraccionaron en tres aplicaciones al año, en enero, junio y septiembre de 1997. Como fuentes de nutrimentos se emplearon sulfato de amonio, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio. Durante el año que duró el experimento (1998), se realizaron 10 cortes de fruta de limón. La cosecha se efectuó en los tres árboles de la parcela útil.

Se realizó un muestreo foliar en mayo de 1998 en cada uno de los tratamientos; la muestra consistió de 25 hojas de brotes vegetativos, de cinco y medio meses de edad; las hojas se lavaron con agua destilada y ácido clorhídrico diluido; se secaron a peso constante a 55 °C, se molieron en molino equipado con hojas de acero inoxidable y se pasaron a través de una malla de 2 mm; las muestras se volvieron a moler en molino de ciclón, cerniéndose por una malla de 1 mm y se almacenaron en bolsas de plástico a 4 °C de temperatura. Para el análisis químico se incineraron muestras de 1 g en crisoles de porcelana a 600 °C por 3 h, luego se solubilizaron en HCl caliente (200 g L⁻¹). Para remover interferencias aniónicas se llevó a una solución final de 1 g L⁻¹ de lantano, añadido como La₂O₃.

Las muestras se analizaron por duplicado para Ca, Mg, K, Cu, Mn, Zn y Fe con técnica de espectrofotometría de absorción atómica (Horwitz, 1975). El P se determinó por el procedimiento de Walls y Gehrke (1974). El N se analizó con el procedimiento convencional kjeldahl. La concentración mineral observada en los árboles del experimento, se comparó con los requerimientos nutricionales de los cítricos reportados por Platt (1965) y para N, P y K acorde con Orozco (citado por Medina *et al.*, 2001).

Los datos de cosecha y concentración nutrimental se procesaron estadísticamente mediante técnicas de

análisis de varianza, utilizando la interacción tratamientos x bloque como término del error experimental. También se efectuaron análisis de regresión múltiple para los coeficientes del arreglo de tratamientos San Cristóbal III ortogonalizado, además se compararon contrastes. Las comparaciones, contrastes ortogonales, seleccionadas fueron: 1) N vs NP (Tratamiento 5 vs 7+14), 2) N vs NK (Tratamiento 5 vs 6+13), 3) N vs NPK (Tratamiento 5 vs 8+9+10+11), 4) NPK (Tratamiento 9) vs resto de NPK (8+10+11) y 5) N vs NPK (Tratamiento 5 vs 9). El programa estadístico utilizado para procesar los datos fue CoStat 5.00 (CoHortSoftware, 1995).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de Fruta

En el Cuadro 2, se muestra el rendimiento de limón mexicano acumulado en los 10 cortes efectuados durante el año de 1998. El P y K aplicados, en ausencia de N, produjeron el rendimiento de fruta más bajo y estadísticamente igual al testigo absoluto. En contraste, al aplicar N solo, o en combinación con P, K y PK, el rendimiento fue significativamente mayor con respecto al testigo sin fertilizar. Este incremento, debido a la aplicación de N, fue congruente con lo reportado por Sánchez (1984), Ahmed *et al.* (1990) y Orozco (1996). Por otra parte, los resultados obtenidos se relacionaron con el estado de fertilidad del suelo donde se efectuó el experimento; las concentraciones de nitratos y materia orgánica fueron muy pobres, mientras que los de P estuvieron dentro del intervalo de rico a medianamente rico.

El rendimiento de fruta de los árboles de los Tratamientos 9, 5, 7, 10, 8 y 13, que incluyeron aplicaciones de 1.2 a 2.7 kg de N árbol⁻¹, fue estadísticamente igual (P < 0.05). El K solo

Cuadro 1. Tratamientos de fertilización nitrogenada, fosfatada y potásica, según San Cristóbal III ortogonalizado (Rojas, 1981).

Tratamiento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Tratamiento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	----- kg árbol ⁻¹ -----				----- kg árbol ⁻¹ -----		
1	0	0	0	8	2.4	1.5	1.5
2	0	0	1.5	9	2.7	0.75	0.75
3	0	1.5	0	10	1.2	1.675	0.75
4	0	1.5	1.5	11	1.2	0.75	1.675
5	2.4	0	0	12	0	0.75	0.75
6	2.4	0	1.5	13	1.2	0	0.75
7	2.4	1.5	0	14	1.2	1.75	0

Cuadro 2. Rendimiento de fruta de limón mexicano. Rancho San José. Municipio de Tecomán, Colima. 1998.

Tratamiento	Tratamiento de fertilización			Rendimiento t ha ⁻¹
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
	----- kg árbol ⁻¹ -----			
9	2.7	0.75	0.75	31.85 a
5	2.4	0	0	30.33 ab
7	2.4	1.5	0	29.17 abc
10	1.2	1.675	0.75	28.54 abc
8	2.4	1.5	1.5	28.21 abc
13	1.2	0	0.75	27.54 abc
14	1.2	0.75	0	26.57 bc
11	1.2	0.75	1.675	26.38 bc
6	2.4	0	1.5	24.89 c
4	0	1.5	1.5	19.31 d
3	0	1.5	0	17.36 de
1	0	0	0	16.43 de †
12	0	0.75	0.75	13.22 e
2	0	0	1.5	13.19 c
Tukey 5 %				5.21
C.V. (%)				15.33

† Separación de medias, valores con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales entre sí.

(Tratamientos 2 y 13) mostró efecto negativo sobre la producción de fruta, la cual fue inferior a la registrada en el testigo (sin fertilizantes). Estas diferencias en rendimiento podrían atribuirse a la severa deficiencia de N en el suelo, que ocasionó que al fertilizar las plantas con K se agudizara aun más la deficiencia de N. La tendencia anterior también se observó con la aplicación de P solo al suelo (Tratamientos 4 y 12).

Cuadro 3. Valor de los coeficientes de la ecuación de regresión múltiple y su significancia estadística, para rendimiento y concentración nutrimental en hojas de limón mexicano.

Fuente	gl	Coefficiente	Rend.	N	P	K	Ca	Mg	S	Na
			† ns	† ns	† ns	† *	† ns	† ns	† ns	† ns
		b ₀	15.62*	2.94**	0.12*	1.5***	3.1***	0.5***	0.18 ns	269**
N	1	b ₁	13.4**	0.84*	-0.07 ns	-0.66**	-0.1*	0.01 ns	-0.01 ns	-46*
P	1	b ₂	0.16 ns	0.52 ns	-0.04*	-0.36 ns	-0.30 ns	-0.04 ns	-0.09 ns	39 ns
K	1	b ₃	0.16 ns	-0.17 ns	-0.05 ns	-0.32 ns	-0.15 ns	-0.06*	-0.09 ns	-89 ns
N ²	1	b ₄	-2.87*	-0.16*	0.03*	0.17**	0.02 ns	0.01 ns	§	8.9 ns
P ²	1	b ₅	0.17 ns	-0.23 ns	0.03 ns	0.27*	0.10 ns	0.01 ns	0.04 ns	29.9 ns
K ²	1	b ₆	-1.31 ns	0.10 ns	0.04*	0.25*	-0.01 ns	0.03 ns	0.04 ns	54.2 ns
NP	1	b ₇	-0.58 ns	0.13 ns	0.01 ns	-0.01 ns	-0.02 ns	0.01 ns	0.03 ns	§
NK	1	b ₈	-0.62 ns	-0.07 ns	-0.01*	0.05*	-0.06 ns	0.01 ns	0.01 ns	18.3 ns
PK	1	b ₉	2.23 ns	0.14 ns	0.02 ns	-0.09 ns	0.17*	0.03*	0.04 ns	§
NPK	1	b ₁₀	-0.09 ns	0.05 ns	-0.01 ns	0.03 ns	0.01 ns	0.01 ns	0.02 ns	13.5 ns
Error	3		9.22 †	0.09	§	0.01	0.01	§	§	1039
R ²			0.94	0.88	0.96	0.98	0.90	0.91	0.84	0.88

† Coeficiente numérico de la ecuación de regresión múltiple y significancia estadística alcanzada. *, **, *** y ns, corresponden a 0.05, 0.01, 0.001 y no significativa, respectivamente. † Valor del cuadrado medio del error. § Coeficientes y cuadrados medios del error con valores de E⁻⁴ a E⁻¹⁴.

Los requerimientos de N para el limón mexicano resultaron el doble de lo encontrado por Sánchez (1984) y Orozco (1996), además, contrastaron con las recomendaciones de Medina *et al.* (2001) para P y K, ya que en el estudio actual no se encontró respuesta significativa a la aplicación de estos elementos. La falta de respuesta se debió a que el contenido de P y el K en el suelo fueron adecuados y muy ricos, respectivamente (INEGI, 1999).

De los contrastes ortogonales evaluados, sólo dos fueron estadísticamente significativos (P < 0.05): el de N vs NK (Tratamiento 5 vs Tratamientos (6 + 13) y NPK (Tratamiento 9) vs resto de NPK (Tratamientos 8 + 10 + 11); mientras que N (5) vs NP (5 + 7), N (5) vs PK (4 + 12) y N (5) vs NPK (8 + 9 + 10 + 11) no resultaron estadísticamente significativos. El análisis de contrastes corroboró los resultados que mostraron el efecto predominante del N sobre el rendimiento de fruta, ya sea solo o en combinación con P, K o PK (Cuadro 2).

El análisis de regresión múltiple para San Cristóbal III (Cuadro 3), mostró que únicamente los efectos lineales y cuadráticos de N resultaron estadísticamente significativos (P < 0.01 y P < 0.05, respectivamente) para la respuesta de rendimiento de fruta de limón mexicano. La ecuación resultante es:

$$Y = 15.62 + 13.4*N - 2.87 * N^2$$

Donde: Y = rendimiento de fruta de limón (en t ha⁻¹) y N = kg de N árbol⁻¹.

El rendimiento máximo ($\partial Y/\partial N = 0$) de fruta de limón (31.2 t ha⁻¹), calculado en la ecuación anterior, se obtuvo al aplicar 2.4 kg de N árbol⁻¹ año⁻¹. Dicho valor resultó similar al registrado en condiciones de campo al fertilizar el árbol con 2.4 kg de N (Cuadro 2). La cantidad de N a recomendar como tratamiento para fertilizar resultó confiable, ya que el coeficiente de determinación de la ecuación fue alto (0.94).

Concentración Nutricional

Los resultados del análisis químico de elementos mayores y secundarios se muestran en el Cuadro 4.

Nitrógeno. El valor de concentración de N más alto se registró en el Tratamiento 5; este tratamiento resultó estadísticamente igual a aquellos que se fertilizaron con 1.2 kg N en combinación con P y K y también al Tratamiento 4 que no incluye N. La concentración de N observada, inclusive en el testigo, fue mayor que la óptima recomendada (2.4 a 2.6%) para cítricos (Platt, 1965) y 2.05 a 2.35% reportado por Orozco (citado por Medina *et al.*, 2001); esto se debe a que en Colima la cantidad de N aplicado (1.2 kg N) por Orozco fue la mitad de la aplicada en el presente estudio, con la cual se maximizó el rendimiento de fruta de limón; otras causas de la diferencia podrían deberse al portainjerto empleado, el tipo de suelo, las variaciones climáticas entre años y manejo del cultivo.

La aplicación de N al suelo incrementó el N foliar, pero decreció las concentraciones de P y K (Cuadro 4); estos resultados fueron congruentes con los observados por Maatouk *et al.* (1990). Aparentemente, el N estimuló el crecimiento foliar del árbol y, en consecuencia, produjo un efecto de dilución de los elementos P y K (Dasberg, 1987; Righetti *et al.*, 1990).

En el Cuadro 3, se muestran los coeficientes de la ecuación de regresión múltiple para N foliar. Al igual que para rendimiento, la ecuación de concentración nutricional de N (Cuadro 3), sólo los coeficientes de N lineal y cuadrático resultaron estadísticamente significativos ($P < 0.05$). La ecuación resultante fue:

$$N_t (\%) = 2.94 + 0.83 * N - 0.17 * N^2$$

Donde: N_t (%) = porcentaje N kjeldahl y N = kg de N árbol⁻¹ año⁻¹.

La concentración máxima ($\partial N_t/\partial N = 0$) de N se obtuvo con 2.4 kg N árbol⁻¹ (Figura 1). Este valor resultó igual al obtenido para maximizar ($\partial Y/\partial N = 0$) el rendimiento de fruta de limón. El N foliar estimado con 2.4 kg N árbol⁻¹ fue de 3.9%, el cual resultó similar a los valores obtenidos experimentalmente con los Tratamientos 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13 y 14. La predicción de N foliar mediante la función de respuesta es confiable, dado el valor del coeficiente de determinación observado (0.88). Sin embargo, el valor

Cuadro 4. Concentración de elementos mayores y secundarios en hojas de limón mexicano. Rancho San José, municipio de Tecomán. 1998.

No	Tratamiento			Concentración						
	N	P	K	N	P	K	Ca	Mg	S	Na
--- kg árbol ⁻¹ ---			% ---							mg kg ⁻¹
1	0	0	0	3.05 cd	0.12 bcd	1.53 ab	3.15 a	0.50 ab	0.19 ab	270 a
2	0	0	1.5	2.99 d	0.13 bcd	1.58 a	2.86 ab	0.46 ab	0.14 bc	263 a
3	0	1.5	0	3.15 cd	0.14 ab	1.57 a	2.94 ab	0.44 b	0.13 bc	247 ab
4	0	1.5	1.5	3.40 abcd	0.20 a	1.41 abc	3.03 ab	0.46 ab	0.18 abc	240 abc
5	2.4	0	0	4.06 a	0.13 bc	0.96 fgh	2.96 ab	0.53 a	0.17 abc	220 abcd
6	2.4	0	1.5	3.76 abcd	0.09 cde	1.20 cde	2.46 b	0.44 b	0.15 abc	147 cd
7	2.4	1.5	0	3.70 abcd	0.17 ab	0.97 efgh	2.68 ab	0.48 ab	0.21 a	197 abcd
8	2.4	1.5	1.5	3.97 ab	0.11 cde	1.16 def	2.63 ab	0.47 ab	0.17 abc	197 abcd
9	2.7	0.75	0.75	4.05 a	0.10 cde	0.78 h	2.73 ab	0.47 ab	0.14 bc	157 bcd
10	1.2	1.675	0.75	4.10 a	0.08 cde	0.99 efgh	2.81 ab	0.46 ab	0.18 abc	200 abcd
11	1.2	0.75	1.675	4.08 a	0.08 cde	1.06 efg	2.74 ab	0.47 ab	0.18 abc	220 abcd
12	0	0.75	0.75	3.18 bcd	0.11 cde	1.34 bcd	2.83 ab	0.45 b	0.12 c	267 a
13	1.2	0	0.75	3.36 abcd	0.07 e	0.89 gh	2.91 ab	0.45 b	0.13 bc	140 d
14	1.2	0.75	0	3.83 abc	0.07 e	0.81 h	2.76 ab	0.47 ab	0.13 bc	250 ab
Tukey 5 %				0.82	0.04	0.22	0.66	0.07	0.06	98.7
C.V. (%)				13.58	23.89	11.54	13.95	9.35	23.43	27.33

[†] Separación de medias, valores con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales entre sí.

registrado de N foliar en el experimento, requerido para maximizar rendimiento, es mayor que lo recomendado para cítricos (Platt, 1965; Orozco, citado por Medina *et al.*, 2001); en el caso de Colima, se debe a que los valores reportados por Orozco para N foliar fueron limitativos para expresar el máximo potencial de rendimiento del limón mexicano. La mayor demanda de N en la región puede atribuirse a diferencias en la morfología del árbol de limón en contraste con la de otros cítricos (Sepúlveda *et al.*, 1983), así como a variaciones climáticas entre regiones productoras (Righetti *et al.*, 1990; Almaguer *et al.*, 1997).

Fósforo. Los resultados obtenidos en la concentración de P fueron congruentes con aquellos encontrados por Ferguson *et al.*, (1990) en naranja Valencia injertada sobre naranjo agrio, ya que este portainjerto se caracteriza por ser el menos eficiente de los cítricos para absorber P. Los valores medios (0.11%) de concentración de P, determinados en este experimento, se encuentran en el límite bajo de suficiencia recomendado por Orozco (citado por Medina *et al.*, 2001), lo cual se atribuye a diferencias en el portainjerto empleado. En el caso de usar naranjo agrio como portainjerto podría aplicarse P al suelo cada dos años como lo sugieren Medina *et al.* (2001), esto no obstante que el valor de P registrado en el análisis de suelo fue adecuado (61 mg kg^{-1}).

Los Tratamientos 1 (0N-0P-0K), 2 (0N-0P-1.5K), 3 (0N-1.5P-0K), 4 (0N-1.5P-1.5K), 5 (2.4N-0P-0K) y 7 (2.4N-1.5P-0K) registraron concentraciones de P en el intervalo óptimo para los cítricos (0.12 a 0.16%); el resto de los tratamientos tuvieron valores considerados como bajos (0.09 a 0.11%) y deficiente ($< 0.09\%$). Lo anterior se explica debido a que el P en el follaje tendió a presentar efecto de dilución a causa de un crecimiento foliar, estimulado al aplicar N al suelo; en contraste, en los Tratamientos 1, 2, 3 y 4 no se produjeron dichos crecimientos, debido a la deficiencia de N en el suelo. Los árboles a los que se aplicó el Tratamiento 7 mostraron valores adecuados de P, ya que además se añadió N.

Contrario a lo observado por Maatouk *et al.* (1990), el P aplicado al suelo sí incrementó la concentración foliar de N y K (Cuadro 4). El incremento en N foliar posiblemente se debió a la interacción de este nutrimento con el P, ya que este último promueve un mayor sistema radical y, por lo tanto, tiende a estimular la absorción del N (Pomares *et al.*, 1996;

Quaggio *et al.*, 1998); lo mismo podría haber ocurrido con el aumento de K.

Potasio. El valor medio del K foliar en la totalidad de los árboles del experimento fue de 1.16%, que corresponde a un valor adecuado para la nutrición del limón (Orozco, citado por Medina *et al.*, 2001), lo cual se relaciona con un nivel también adecuado en el suelo (389 mg kg^{-1}) (INEGI, 1999). Sin embargo, se observaron dos grupos de tratamientos diferentes en concentraciones de K. Los Tratamientos 1 (testigo), 2 (0N-0P-1.5K), 3 (0N-1.5P-0K), 4 (0N-1.5P-1.5K), 6 (2.4N-0P-1.5K) y 12 (0N-0.75P-0.75K) mostraron valores óptimos (1.2 a 1.7%), mientras que el resto de los tratamientos tuvieron registros dentro del intervalo bajo (0.7 a 1.1%). Lo anterior se explica debido a que no ocurrió efecto de dilución de K en los Tratamientos 1, 2, 3 y 4, y que en los Tratamientos 6 y 12 se incluyó el K como fuente de fertilizante. Las concentraciones de K en las hojas se incrementaron con las aplicaciones de K (0N-0P-1.5K) y P (0N-1.5P-0K), mientras que al aumentar la dosis de N (2.4N-0P-0K) disminuyó la concentración de dicho elemento (Figura 2). Esto último se atribuyó a que el N estimuló el crecimiento vegetativo (Maatouk, 1990; Righetti *et al.*, 1990; Pomares *et al.*, 1995).

Calcio. Todos los tratamientos mostraron valores de concentración de Ca mayores que el valor óptimo recomendado (2.4 a 2.6%) en la literatura para cítricos en general. Lo anterior se explica por la abundancia de este elemento en el suelo calcáreo donde se estableció el experimento. El análisis de suelo registró valores de Ca en los intervalos de medianamente ricos a ricos. En el testigo se observaron los valores más altos de Ca en las hojas, lo cual se asoció con un efecto de concentración de dicho elemento y menor crecimiento de la planta ocasionado por las deficiencias de N en el suelo.

Sólo el efecto de N lineal fue ($P < 0.05$) significativo y mostró efecto negativo sobre la concentración de Ca (2.96%) en el Tratamiento 5 (2.4N-0P-0K); este efecto se atribuyó a la dilución de dicho elemento en el follaje, sin embargo, el registro de Ca en dicho tratamiento estuvo dentro del intervalo de suficiencia.

Al fertilizar el árbol con N, la tendencia fue disminuir las concentraciones de Ca foliar (Figura 3). Los valores estimados son confiables, ya que el valor predicho de Ca con $2.4 \text{ kg N árbol}^{-1}$ fue muy cercano al observado ($x = 2.68\%$) con los Tratamientos experimentales 5, 6, 7 y 8 (Cuadro 4).

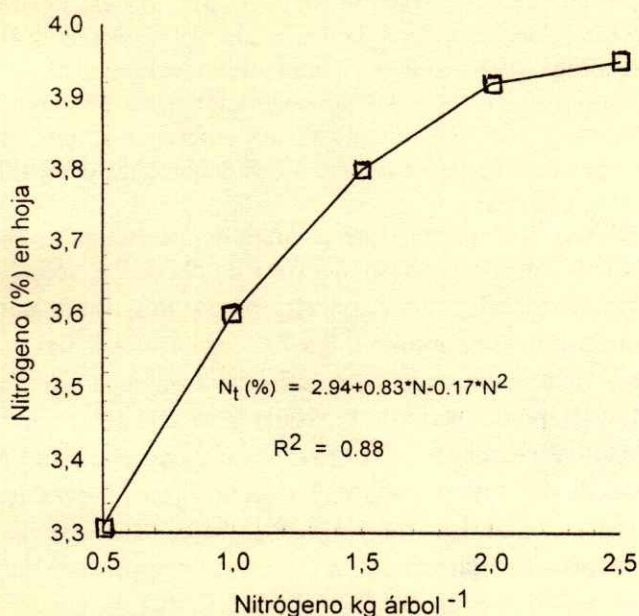


Figura 1. Relación entre nitrógeno aplicado al suelo y Nt en el follaje.

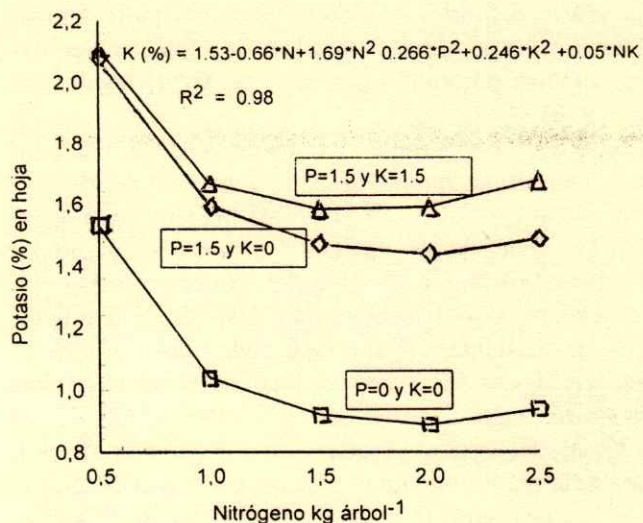


Figura 2. Relación entre nitrógeno aplicado al suelo y potasio en el follaje.

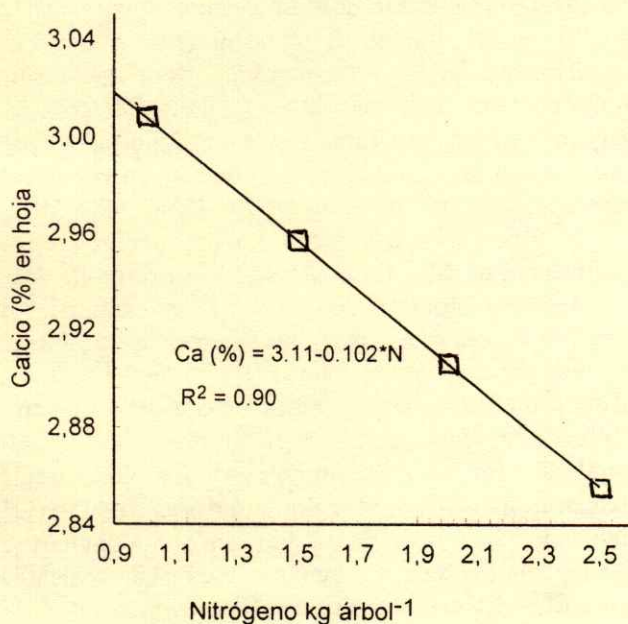


Figura 3. Relación calcio en el follaje y nitrógeno aplicado al suelo.

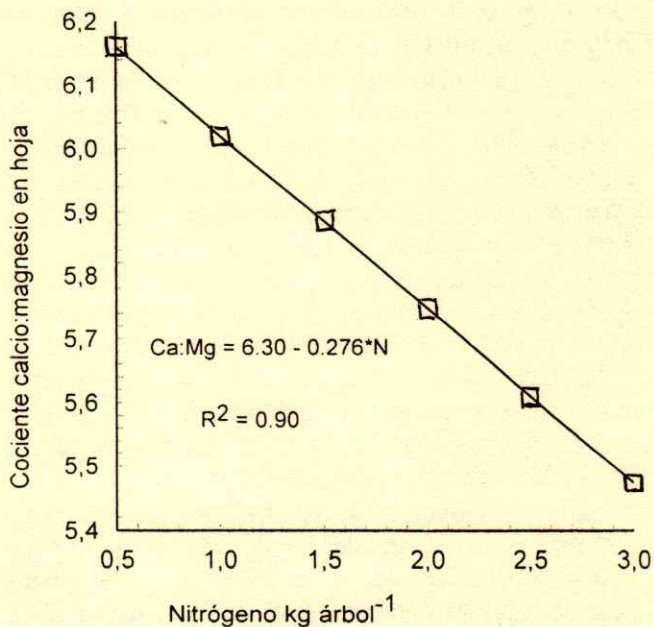


Figura 4. Relación calcio:magnesio en el follaje y nitrógeno aplicado al suelo.

Magnesio. El valor promedio de Mg encontrado en el análisis de suelo (420 mg kg^{-1}) fue el adecuado para el cultivo de los cítricos; en consecuencia, el valor medio de Mg foliar fue óptimo (0.46%). Todos los tratamientos mostraron concentraciones de Mg foliar

óptimas (0.26 a 0.6%). Además de la contribución del grado de fertilidad del suelo, también el tipo de portainjerto empleado (naranja agrio) para limón mexicano podría haber contribuido sobre el valor de Mg en el follaje, ya que los limones Volkameriana y

Macrofila acumulan menor concentración de Mg en las hojas que el naranjo agrio (Ferguson *et al.*, 1990). En cítricos es importante el valor del cociente entre Ca y Mg, debido a que dicha relación, entre ambos elementos, es modificada por la absorción preferencial que algunos portainjertos tienen de Mg (Ferguson *et al.*, 1990).

Al aplicar N al árbol, el cociente Ca/Mg tiende a disminuir, o sea, que favorece la absorción de Mg con respecto al Ca (Figura 4). De esta manera, se observa que las aplicaciones de 0.5, 1.0, 2.0, 2.5 y 3.0 kg tienden a disminuir el valor del cociente Ca/Mg. En consecuencia, al seleccionar la dosis de N a utilizar hay que considerar el valor de Ca/Mg foliar.

Azufre. Todas las muestras analizadas para S foliar mostraron valores por debajo del valor óptimo (0.2 a 0.23%), excepto el Tratamiento 7 (2.4N-1.5P-0K). Los resultados obtenidos en concentración de S son congruentes con la naturaleza del suelo (Calciol pétrico) donde se condujo el experimento; en estas circunstancias, la nutrición apropiada de las plantas con S es deficiente (Pérez, 1999), esto, no obstante que la fuente de fertilizante nitrogenado fue sulfato de amonio, el cual contiene S en forma soluble y fácilmente asimilable (SO_4^{2-}). Por otra parte, no se detectó la sintomatología de deficiencia de S en el follaje; es posible que ésta se haya confundida con la de N (las cuales son muy parecidas). En consecuencia, deberá tenerse presente la posible necesidad de suministrar N y S a las plantas de limón.

Sodio. Con excepción de los Tratamiento 6, 8 y 13, todos los tratamientos mostraron valores de concentración de sodio mayores que el valor óptimo ($> 160 \text{ mg kg}^{-1}$) recomendado en la literatura (Platt, 1965). La media de Na en el follaje fue de 200 mg kg^{-1} , la cual resultó no apropiada para el cultivo y, en congruencia, con los valores detectados en el análisis de suelos. El testigo (0N-0P-0K) y el Tratamiento 2 con 270 mg kg^{-1} y 263 mg kg^{-1} superaron a los Tratamientos 6, 7 y 13 y fueron estadísticamente iguales al resto de ellos. El efecto lineal de N mostró efecto significativo negativo en la concentración de Na; la función de respuesta fue $\text{Na}(\%) = 269.2 - 46.7 * \text{N}$, lo cual sugiere una tendencia a disminuir las concentraciones de Na foliar al aumentar la dosis de fertilizante nitrogenado. La predicción de sodio foliar con la ecuación indicada arriba fue muy similar a la obtenida con el tratamiento experimental de $2.4 \text{ kg N árbol}^{-1}$ (Cuadro 4).

La concentración nutrimental de elementos menores en hojas de limón se muestra en el Cuadro 5. Los

coeficientes de variación fueron altos, lo cual puede estar relacionado con la variación del suelo, con la fisiología del árbol y el contenido de humedad del suelo que afectaron las concentraciones de elementos menores, en consecuencia, las inferencias que se hagan con los registros obtenidos deben considerar tal circunstancia.

Hierro. No obstante que el suelo donde se estableció el experimento es calcáreo y tiene un pH de 7.9, todas las muestras de hojas registraron valores de Fe por arriba del valor óptimo (60 a 120 mg kg^{-1}). Además, la sintomatología común de deficiencia (clorosis) de Fe fue temporal (período de secas) y en algunos brotes; esta deficiencia tendió a desaparecer con el inicio de las lluvias (junio a julio). Las concentraciones de Fe resultaron, al igual que en otros trabajos (Zekri, 1995), altamente variables, por lo que puede interpretarse que su uso no es confiable (Alva y Tucker, 1999).

Manganeso. Es un elemento que con frecuencia se reporta como deficiente en suelos calcáreos, sin embargo, su sintomatología resultó difícil de observar en campo. El análisis de suelos efectuado sugirió potencial deficiencia de Mn (valores pobres en el suelo) en el limón; la concentración media del experimento fue de 29.4 mg kg^{-1} , valor que resultó muy cercano al límite inferior de suficiencia (25 mg kg^{-1}). Los intervalos óptimos reportados para cítricos van de 25 a 200 mg kg^{-1} de Mn; en el presente trabajo, los tratamientos PK (0N-1.5P-1.5K y 0N-0.75P-0.75K) registraron valores menores que la suficiencia de Mn. En contraste, N en dosis de 2.4 y $2.7 \text{ kg árbol}^{-1}$ combinado con P y K en cantidades de 1.5 y $0.75 \text{ kg árbol}^{-1}$, respectivamente, registraron los valores mayores de Mn foliar (41 y 35 mg kg^{-1}).

Zinc. En cítricos, la concentración óptima de Zn en el follaje debe encontrarse en el intervalo de 25 a 100 mg kg^{-1} . En el experimento, todos los árboles registraron valores de Zn inferiores al intervalo indicado. Las deficiencias de Zn son comunes en suelos con pH de 7.5 ó mayores y en suelos calcáreos como los del presente estudio (Ferguson *et al.*, 1990; Pérez, 1999). En contraste con las dificultades para detectar síntomas de deficiencia de Mn en el follaje, en el caso de Zn sí se detectó un patrón de sintomatología de deficiencia bien definido. Los Tratamientos 4 (0N-1.5P-1.5K) y 5 (2.4N-0P-0K) registraron las mayores concentraciones ($P < 0.05$) de Zn, pero la aplicación de P solo o en combinación con NK mostró tendencia a disminuir la concentración de Zn; este efecto pudo deberse a antagonismo de P-Zn

Cuadro 5. Concentración de elementos menores en hojas de limón mexicano. Rancho San José. Municipio de Tecomán. 1998.

No.	Tratamiento			Concentración nutrientes			
	N	P	K	Fe	Mn	Zn	Cu
----- kg árbol ⁻¹ -----				----- mg L ⁻¹ -----			
1	0	0	0	634 a [†]	32 ab	10.7 b	10.2 ab
2	0	0	1.5	390 ab	31 ab	10.0 b	8.1 b
3	0	1.5	0	363 ab	32 ab	8.7 b	7.7 b
4	0	1.5	1.5	220 b	18 b	16.2 a	7.8 b
5	2.4	0	0	269 b	29 ab	16.0 a	7.4 b
6	2.4	0	1.5	277 b	32 ab	12.0 ab	6.9 b
7	2.4	1.5	0	342 b	30 ab	10.0 b	9.3 b
8	2.4	1.5	1.5	499 ab	41 a	7.2 b	9.7 b
9	2.7	0.75	0.75	264 b	35 ab	11.8 ab	19.8 a
10	1.2	1.675	0.75	310 b	28 ab	7.1 b	6.8 b
11	1.2	0.75	1.675	346 b	30 ab	8.0 b	7.2 b
12	0	0.75	0.75	373 ab	23 ab	9.1 b	7.1 b
13	1.2	0	0.75	446 ab	27 ab	11.6 ab	6.6 b
14	1.2	0.75	0	402 ab	24 ab	7.7 b	7.3 b
Tukey, 5 %				284	19.9	4.9	9.7
CV (%)				46.2	34.9	28.2	66.3

[†] Separación de medias, valores con las mismas letras en cada columna son estadísticamente iguales entre sí.

(Higazi *et al.*, 1987; Zekri, 1995; Alva y Tucker, 1999).

Los efectos de interacciones entre nutrientes se corroboraron con la prueba de contrastes ortogonales, ya que N solo (Tratamiento 5) fue estadísticamente significativo con respecto a NP ($P < 0.001$), NK ($P < 0.05$) y NPK ($P < 0.0001$). La ecuación de regresión múltiple ($R^2 = 0.95$) fue:

$$Y = 10.84 - 5.0 * P + 1.55 * N^2 - 1.1 * N * P - 0.92 * N * K + 3.6 * P * K$$

Donde: Y = Zn (mg kg⁻¹), y N, P y K = kg árbol⁻¹.

La confiabilidad de predicción con la ecuación anterior se corroboró por la correspondencia, encontrada entre los valores de registros de Zn foliar y los valores predichos con dicha función de respuesta, en especial para el testigo, el N solo a dosis de 2.4 kg árbol⁻¹, el K solo y las interacciones NP, NK y PK, de manera de que las diferencias entre los datos observados y predichos fueron de 0.14, 0.84, 3.1, 0.01, 0.64 y 0.63 mg L⁻¹ de Zn foliar para los Tratamientos 1 (0N-0P-0K), 2 (0N-0P-1.5K), 5 (2.4N-0P-0K), 12 (0N-0.75P-0.75K), 13 (1.2N-0P-0.75K) y 14 (1.2N-0.75 P-0K), respectivamente.

Cobre. Todos los tratamientos registraron valores de Cu dentro del intervalo óptimo (5 a 16), no obstante que el suelo es arenoso. Sin embargo, los resultados pudieron estar afectados por contaminación, debido a que algunos de los agroquímicos empleados para el

control de plagas y enfermedades del cultivo del limón contienen Cu; dichos productos se emplean de forma regular durante todo el año.

CONCLUSIONES

- El limón mexicano mostró respuesta únicamente a N en dosis de 2.4 kg árbol⁻¹ para rendimiento y N en el follaje. La función de respuesta para rendimiento de fruta a N fue cuadrática y se expresó como $Y = 15.62 + 13.4 * N - 2.88 * N^2$, Donde: Y = rendimiento de fruta (en t ha⁻¹) y N = kg N árbol⁻¹. Todos los tratamientos tuvieron concentraciones de K, Ca, Mg, Na, Fe y Cu superiores al nivel de suficiencia. En contraste, las de S, Mn y Zn registraron valores de deficiencia, lo cual estuvo acorde con la naturaleza calcárea del suelo utilizado en el experimento. El N aplicado al suelo incrementó la concentración foliar de N y Mg, pero decreció la de P, K y Ca. El N en la hoja resultó un buen estimador de rendimiento de fruta y podría utilizarse como indicador de las necesidades de fertilización nitrogenada. Con base en los resultados, se sugiere fertilizar los árboles de limón mexicano con 2.4 kg de N árbol⁻¹ año⁻¹; en caso de que el portainjerto sea naranjo agrio aplicar P, no obstante que el análisis químico reporte valores adecuados en el suelo. La concentración de N (2.4%) foliar podría utilizarse como herramienta de fertilización para obtener altos rendimientos de fruta (31 t ha⁻¹).

LITERATURA CITADA

- Ahmed, F.F., M.A. El-Sayed y M.A. Maatouk. 1990. Effect of nitrogen, potassium and phosphorus fertilization on yield and quality of Egyptian Balady limes trees (*Citrus aurantifolia*). Ann. Agric. Sci. Ain-Shams Univ. (Egypt) 32(2): 1249-1268.
- Almaguer V., G., R. Maldonado T., F. Herrera M., C. Tirado B. y M. Contreras A. 1997. Fertilización foliar en naranja "Valencia late" en Álamo y Martínez de la Torre, Veracruz. Terra: 15: 211-218.
- Alva, A.A. y D.H. Tucker. 1999. Soils and nutrition. pp. 21-46. In: Timmer, L.W. y L.W. Duncan (eds.). Citrus health management. The American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN.
- Cerda, A., M. Nieves y V. Martínez. 1995. An evaluation of mineral analysis of Verna lemons by DRIS. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 26(11/12): 1697-1707.
- CoHortSoftware. 1995. CoStat Manual 5.00. Minneapolis, MN.
- Cruz M., R., M. Contreras M y V. Serrano A. 1984. Respuesta a la fertilización (N, P, K) de plantaciones de limón mexicano en producción en la Costa de Oaxaca. Terra 2: 74-79.
- Dasberg, S. 1987. Nitrogen fertilization in citrus orchards. Plant Soil 100: 1-9.
- FAO. Food and Agricultural Organization. 1991. Soil resources. An explanatory note on the FAO World Soil Resources. Map at 25 000 scale. World Soil Resources Report 66. Rome, Italy.
- Ferguson, L., N. Sakovich y M.L. Roose. 1990. California citrus rootstocks. Publication 21477. University of California. Davis, CA.
- Higazi, A., M.H. El-Hagah, S.Z. El-Naggar, S.A. Ahmed y H. Hassan. 1987. A comparative study of the effectiveness of NPK soil fertilization and macro and micro element foliar fertilization on yield and fruit quality of some citrus varieties. Minufiya J. Agric. Res. (Egypt) 9: 393-408.
- Horwitz, W. 1975. Official methods of analysis of the Association of Analytical Chemist. 12th ed. Association of Analytical Chemist. Washington, DC.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1999. Cuaderno Estadístico Municipal Tecomán, Estado de Colima. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Maatouk, M.A., E.E. Ahmed y M.A. El-Sayed. 1990. Effect of nitrogen, potassium and phosphorus fertilization on yield and quality of Egyptian Balady lime trees (*Citrus aurantifolia*). 1. Vegetative growth and chemical composition of leaves. Ann. Agric. Sci., Ain-Shams Univ. (Egypt) 33(2): 1233-1247.
- Medina U., V., M.M. Robles F., S. Becerra R., J. Orozco R., M. Orozco S., J.G. Garza L., M.E. Ovando C., X Chávez C y F.A. Félix C. 2001. El cultivo del limón mexicano. Libro Técnico 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Tecomán, Colima, México.
- Orozco R., J. 1996. La fertilización de los frutales más importantes en Colima. Folleto para Productores 3. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Tecomán, Colima, México.
- Pérez Z., O. 1999. Distribución y tipos de acumulación de carbonato de calcio en suelos de la llanura costera de Tecomán, Colima. Agrociencia 33: 11-20.
- Platt, R.G. 1965. Leaf analysis on citrus fertilization. The California Citrograph 50. Riverside, CA.
- Pomares, F., F. Tarazona., M. Estela y R. Faus. 1995. Respuesta de cuatro variedades de cítricos a la fertilización potásica. Viticultura Enología Profesional (España) 41: 45-55.
- Pomares, F., F. Tarazona., M. Estela y R. Faus. 1996. Respuesta de cuatro variedades de cítricos a la fertilización fosforada. Viticultura Profesional (España) 77: 4-15.
- Quaggio, T.A., H. Cantarella y B. van Raij. 1998. Phosphorus and potassium soil test and nitrogen leaf analysis as a base for citrus fertilization. Nutr. Cycling Agroecosystems (Netherlands) 52(1): 67-74.
- Righetti, T.L., K.L. Wilder y G.A. Cummings. 1990. Plant analysis as an aid in fertilizing orchards. pp. 563-601. In: R.E. Westerman (ed.). Soil testing and plant analysis. Book Series 3. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Rojas M., B.A. 1981. Planeación y análisis de los experimentos de fertilizantes. Folleto Misceláneo 40. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F.
- Sepúlveda T., J.L., S. Alcalde B. y G. Alcántar G. 1983. Empleo del análisis de nitrógeno en el fruto de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) como estimador de la producción. Terra 1: 52-56.
- Walls, L.L. y C.W. Gehrke. 1974. The automatic method for the determination of directly-available P₂O₅ in fertilizer. J. Assoc. Off. Anal. Chem. 57: 787-790.
- Zekri, M. 1995. Nutritional deficiencies in citrus trees: Iron, zinc and manganese. Citrus Industry 76: 16-17.

RENDIMIENTO, EFICIENCIA AGRONÓMICA DEL NITRÓGENO Y EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA EN AMARANTO EN FUNCIÓN DEL MANEJO DEL CULTIVO

Yield, Agronomic Efficiency of Nitrogen and Water Use in Amaranth as affected by Crop Management

Araceli C. Díaz-Ortega^{1†}, J. Alberto Escalante-Estrada¹, Antonio Trinidad-Santos¹, Prometeo Sánchez-García¹, Cristina Mapes-Sánchez² y David Martínez-Moreno³

RESUMEN

El amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.), considerado una alternativa como fuente de proteína de origen vegetal, es cultivado particularmente en temporal, por lo que es importante la búsqueda de mejores prácticas de manejo que conduzcan a un uso más eficiente de recursos, como agua y nutrimentos esenciales para un mayor rendimiento. El objetivo de este trabajo fue determinar la influencia del nitrógeno y la densidad de población sobre la fenología, eficiencia en el uso de agua y de nitrógeno, la producción de biomasa y rendimiento de semilla del amaranto, sembrado el 11 de junio de 1999, con 0, 10 y 20 g m⁻² de N y 12.5, 25.0 y 33.3 plantas m⁻². Con la aplicación de N y el aumento de la densidad de población (DP) se elevó la eficiencia en el uso del agua y N y, en consecuencia, se incrementó la producción de biomasa y el rendimiento. Dichos incrementos fueron más altos con la dosis de N y la DP más altos. Así, con 20 g m⁻² de N y 33.3 plantas m⁻² se obtuvo una producción de biomasa de 2827 g m⁻² y un rendimiento de semilla de 346 g m⁻². La fenología no fue afectada por los tratamientos. El requerimiento de calor de siembra a madurez fenológica fue de 1629 UC y 385 mm de agua utilizada en evapotranspiración.

Palabras clave: *Amaranthus hypochondriacus* L., densidad de población, fertilización, evapotranspiración, unidades calor, biomasa, componentes de rendimiento.

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

[†] Autor responsable (chelydiaort@yahoo.com)

² Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

³ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 72570 Puebla.

Recibido: Enero de 2002. Aceptado: Febrero de 2003.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 22: 109-116.

SUMMARY

Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.), which is considered an alternative source of vegetable protein, is grown particularly under rainfed conditions. Therefore, it is important to look for better management practices that lead to a more efficient use of resources, such as water and essential nutrients, to obtain higher yields. The aim of this work was to determine the influence of nitrogen and plant density on phenology, nitrogen and water use efficiency (WUE), biomass production, and seed yield of amaranth planted on June 11, 1999, with 0, 10, and 20 g m⁻² N and 12.5, 25.0, and 33.3 plants m⁻². With the application of N and with a higher plant density (PD), the efficiency in water use and in N was greater, and in consequence, biomass production and yield increased as well. These increments were higher with higher N level and higher DP. In this way, with 20 g N m⁻² and 33.3 plant m⁻² a biomass production of 2827 g m⁻² and seed yield of 346 g m⁻² were obtained. Phenology was not affected by the treatments. The requirement of sowing heat units to physiological maturity was 1629 UC and 385 mm of water used in evapotranspiration.

Index words: *Amaranthus hypochondriacus* L., plant density, fertilization, evapotranspiration, heat units, biomass, yield components.

INTRODUCCIÓN

El amaranto (*Amaranthus* spp.) es un cultivo cuya semilla y cuyas estructuras vegetativas contienen proteína de valor nutritivo alto para el consumo humano, además del contenido de almidón y aceite para uso industrial (Bressani *et al.*, 1992; Williams y Brenner, 1995). En la actualidad, la semilla se utiliza para elaborar "alegría", granola y cereal; de esta semilla se obtiene la harina para preparar galletas, pastas, pan y tamales, a un costo bajo para la

población. El amaranto se cultiva en varios países del mundo y, en México, los principales estados productores son Morelos, Tlaxcala, Distrito Federal y Puebla (SAGAR, 1995), donde se tiene una superficie total cultivada de 1200 ha con un rendimiento promedio por estado de 1.2 t ha⁻¹.

El amaranto es un cultivo propicio para la agricultura de temporal difícil y para zonas semiáridas si se emplean sistemas de cultivo adecuados (Espitia, 1992). Se ha demostrado que un manejo óptimo de la fertilización nitrogenada y de la densidad de población, principalmente en la etapa inicial de crecimiento, permite alcanzar una mejor cobertura del dosel y mayor eficiencia de recursos básicos para el crecimiento y rendimiento del cultivo (Sinclair *et al.*, 1984; Escalante, 1995). Estudios realizados con amaranto en diferentes condiciones ambientales demuestran que el fertilizante nitrogenado incrementa el rendimiento de semilla por unidad de superficie (Espitia, 1992), la producción de biomasa total y el número de semillas por planta, mientras que el peso de mil semillas no es afectado por los cambios en la dosis de nitrógeno (Elbehri *et al.*, 1993; Myers, 1998). En investigaciones realizadas en la Mesa Central de México en condiciones de temporal, Espitia (1992) reportó un rendimiento entre 1600 kg ha⁻¹ y 3275 kg ha⁻¹ al aplicar la dosis de N recomendado para esta zona (80 kg ha⁻¹). En la misma región y para la misma condición de temporal, Arellano (2000) encontró un rendimiento hasta de 1868 kg ha⁻¹ al aplicar 160 kg ha⁻¹. En otro ambiente de temporal, Myers (1998) logró un rendimiento de 1750 kg ha⁻¹ con 180 kg ha⁻¹ de N. Un indicador importante respecto al uso del nitrógeno (N) es su eficiencia agronómica, la cual indica un incremento en el rendimiento de grano por unidad de N aplicado. Se ha investigado la eficiencia agronómica en cultivos como girasol (*Helianthus annuus* L.) (Harmsen, 1984; Escalante, 1992, 1995; Olalde *et al.*, 2000), maíz (*Zea mays*) y sorgo (*Sorghum bicolor* M.) (Muchow, 1998), trigo (*Triticum aestivum* L.) (McDonald, 1989; Limon-Ortega *et al.*, 2000), la cual tiende a aumentar con la dosis de N; sin embargo, para amaranto los estudios son escasos. Al respecto, Elbehri *et al.* (1993) encontraron resultados distintos para amaranto, ya que la eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN) en condiciones de temporal, se redujo al incrementar la dosis de N, en diferentes cultivares y localidades en condiciones de temporal de Minnesota, Estados Unidos, lo cual se relacionó con cambios en la eficiencia de obtener el N; además, los

autores antes citados encontraron que los valores bajos de EUN en amaranto, comparados con los de trigo y maíz, se relacionan con un índice de cosecha bajo. Con respecto a la densidad de población, se han generado estudios que demuestran el incremento del rendimiento cuando aumenta el número de plantas por unidad de superficie. En este sentido, Henderson *et al.* (1998) reportaron en *A. hypochondriacus* L. cv. Plainman en condiciones de temporal, en la Gran Planicie del Noreste de Estados Unidos, un rendimiento promedio de 954 kg ha⁻¹ y una densidad de 173 mil plantas ha⁻¹, lo cual es bajo comparado con el encontrado por Henderson *et al.* (1993) en Dakota, EE.UU para condiciones de temporal, que fue de 1186 kg ha⁻¹ con una densidad menor (74 mil plantas ha⁻¹); ello se explica por la mejor distribución entre plantas (pl) en una DP menor. Por su parte, Arellano (2000) reportó que con densidad alta (345 mil pl ha⁻¹) se obtiene un rendimiento hasta de 1684 kg ha⁻¹ y se reducen el número de ramas y el tamaño de la planta (Hauptli y Jain, 1978; Espitia, 1992). En relación con el efecto combinado de dosis de N con densidades de plantas de amaranto, hay reportes similares de rendimiento en Valles Altos de México.

Liang *et al.* (1991) mencionaron que el rendimiento, la densidad de población y la dosis de fertilización altos, están correlacionados con el requerimiento térmico o las unidades calor (UC) y la precipitación estacional. Existen estudios de las UC en cultivos como maíz y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) (Flores *et al.*, 1985; Liang *et al.*, 1991) y girasol (Salera y Baldini 1998; Olalde *et al.*, 2000); sin embargo, la información sobre el requerimiento térmico en el amaranto es limitada. Por otro lado, el agua es un factor primordial que limita el rendimiento del cultivo en varias regiones del mundo; Fischer (1981) y Gregory *et al.* (2000) señalaron que, para incrementar la eficiencia en el uso de agua (EUA) durante el crecimiento del cultivo, el genotipo y las prácticas de manejo son determinantes. Se han realizado estudios sobre la evapotranspiración en cultivos como girasol (Escalante, 1995; Olalde *et al.*, 2000) y maíz (Howell *et al.*, 1998); sin embargo, la información al respecto es escasa para amaranto. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar la influencia de la fertilización nitrogenada y densidad de población, sobre la eficiencia en el uso del agua y nitrógeno y la producción de biomasa y rendimiento del amaranto.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en el verano de 1999, en condiciones de temporal en el campo experimental del Colegio de Postgraduados, en Montecillo, estado de México (19°29' N y 98°54' O, a una altitud de 2250 m, clima BS₁, el menos seco de los áridos), (García, 1988). El amaranto tipo "Azteca" se sembró el 11 de junio de 1999, en un suelo con las siguientes características físicas y químicas: textura arcillosa; pH de 8; 2.9% de materia orgánica; conductividad eléctrica de 0.69 dS m⁻¹; densidad aparente de 1.23 g cm⁻³; humedad a capacidad de campo 49.8% a 0.03 MPa; humedad a punto de marchitez permanente de 31.5% a 0.15 MPa y con dosis inicial de N de 51.5 kg ha⁻¹ a una profundidad de 0 a 60 cm. Los tratamientos consistieron en la aplicación de 0, 100 y 200 kg ha⁻¹ de N (0, 10 y 20 g N m⁻², respectivamente) y tres densidades de población: 125 000 (80*40 cm), 250 000 (80*20 cm) y 333 000 (40*30 cm) plantas ha⁻¹ (12.5, 25.0 y 33.3 plantas m⁻², respectivamente) con cuatro plantas por mata. El nitrógeno se aplicó en el momento de la siembra como sulfato de amonio (20.5% de N). Además, se aplicaron a todo el experimento 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, como superfosfato de calcio triple (46% P₂O₅). El diseño experimental fue bloques al azar con arreglo en parcelas divididas y cuatro repeticiones. La unidad experimental fue de cuatro surcos de 0.80 m de ancho y 4.0 m de longitud. Durante el desarrollo del experimento, se registró la temperatura (°C) máxima (T_{máx}) y mínima (T_{mín}), evaporación (Ev, mm) y precipitación diaria (PP, mm). Las etapas fenológicas registradas fueron: emergencia (E) considerada cuando más de 50% de las plantas asomaron los cotiledones del suelo, inicio de floración (IF) cuando más de 50% de las plantas presentaban de 1 a 3 cm de inflorescencia y a madurez fisiológica (MF) cuando más de 50% de las plantas presentaban follaje y panoja color paja (Espitia, 1992).

VARIABLES EN ESTUDIO

Para cada etapa fenológica, se determinó el requerimiento térmico del cultivo (UC, °C) utilizando el método residual (Snyder, 1985), el cual se determina con la siguiente relación:

$$UC = (T_{máx} + T_{mín}/2) - TB$$

Donde: T_{máx} = temperatura máxima diurna (°C), T_{mín} = temperatura mínima diurna (°C) y TB = temperatura base, considerada como 6 °C (Merrien, 1986). La evapotranspiración del cultivo (ETc) se estimó utilizando los datos de la evaporación del tanque tipo "A", utilizando el coeficiente 0.8 del evaporímetro (K_e) y el coeficiente 0.8 del cultivo (K_c) para diferentes etapas de su desarrollo, a partir de la siguiente relación:

$$ETc = Ev * K_e * K_c \text{ (Doorembos y Pruitt, 1986).}$$

A la cosecha, se evaluó la biomasa total (BT, g m⁻²), índice de cosecha (IC = (RS/BT)*100, %), rendimiento de semilla (RS, peso de semilla a 10% de humedad, g m⁻²), peso de 1000 semillas (PMS, g), número de semillas m⁻² (NSM), número de panículas m⁻² (NP). La eficiencia en el uso del agua (EUA) para biomasa total y rendimiento de semilla (g m⁻² mm⁻¹) se calculó considerando las relaciones EUA = BT o RS/ETc (Sinclair *et al.*, 1984; Escalante, 1995). La eficiencia agronómica del N aplicado, considerada como el incremento en el rendimiento económico de un cultivo por unidad de fertilizante aplicado, se estimó de acuerdo con la siguiente relación:

$$EA = (RS_f - RS_t) / F$$

Donde: RS_f = rendimiento de semilla del cultivo fertilizado; RS_t = rendimiento de semilla del cultivo testigo y F = cantidad del fertilizante aplicado (McDonald, 1989; Escalante y Rodríguez, 1994). A las variables respuesta se les aplicó un análisis de varianza, y aquellas con significancia estadística, una prueba de comparación de medias de Tukey a 5% de probabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones Ambientales

Los datos de T_{máx} y T_{mín} promedio semanal, así como la evaporación y la precipitación (suma semanal) presentados en la Figura 1, muestran que de la siembra a inicio de floración (IF) la T_{máx} fluctuó entre 25 y 32 °C y la T_{mín} entre 3 y 10 °C. De IF a la madurez fisiológica (MF), la T_{máx} y T_{mín} fluctuaron entre 20 y 28 °C y entre 2 y 11 °C, respectivamente. La evaporación mostró una tendencia a disminuir conforme el cultivo se acercó al IF; de 49 hasta

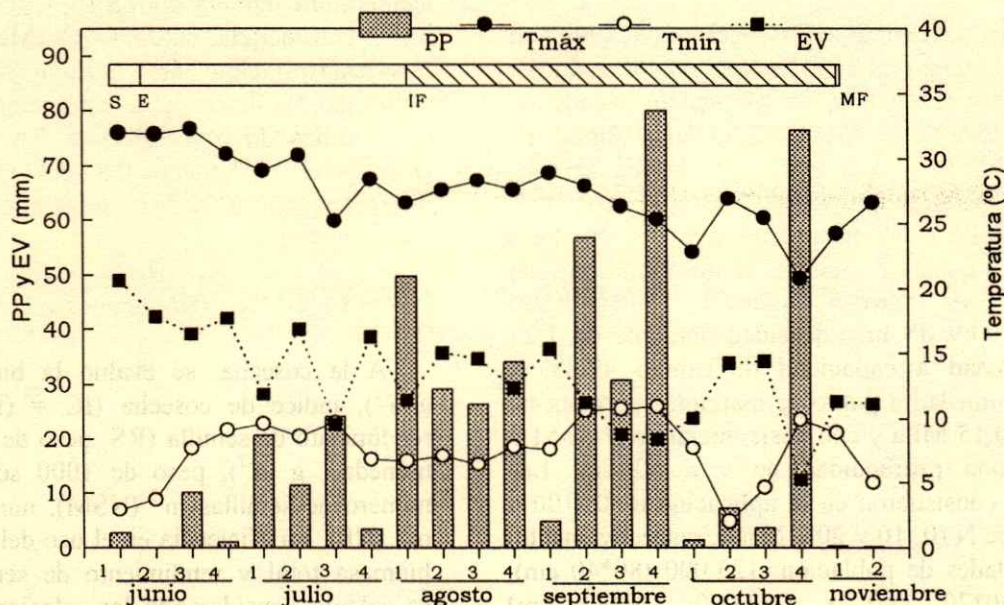


Figura 1. Temperatura (°C) máxima (Tmáx) y mínima (Tmín) promedio semanal, precipitación (PP, mm) y evaporación total (EV, mm) suma semanal. Montecillo, México. Verano 1999. S = siembra; E = emergencia; IF = inicio de floración y MF = madurez fisiológica).

23 mm, y de IF a MF fue de 37 a 13 mm. La precipitación estacional acumulada durante el desarrollo del cultivo fue 474 mm; de ésta 150 mm (32%) se presentó de la siembra hasta la época de floración y 322 mm (68%) de la floración hasta madurez fisiológica.

Etapas Fenológicas

En general en todos los tratamientos, la emergencia de plántulas de amaranto ocurrió a los tres días después de la siembra (dds), el inicio de floración a 61 dds y la madurez fisiológica a 141 dds (Figura 1), por lo cual puede afirmarse que la fenología del cultivo no mostró cambios asociados al N y a la densidad de población (DP).

Unidades Calor

La acumulación de unidades calor (UC) en relación con la fenología del cultivo se presenta en la Figura 2a. El requerimiento térmico del cultivo en condiciones de clima templado semiárido fue similar entre tratamientos. Las UC fueron de 35 °C de

siembra a emergencia, de 704 °C de emergencia a inicio de floración, de 889 °C de inicio de floración a madurez fisiológica, y 1629 °C de requerimiento térmico acumulado de siembra a madurez fisiológica. Este resultado constituye la primera referencia con relación a UC para amaranto en Valles Altos.

Evapotranspiración del Cultivo (ETc)

En la Figura 2b, que relaciona la evapotranspiración acumulada del cultivo (ETc) y su fenología, se observa que la ETc en el período de siembra a emergencia fue de 8 mm, de emergencia a inicio de floración de 167 mm y de inicio de floración a madurez fisiológica de 210 mm. La ETc estacional acumulada fue de 385 mm. En estudios realizados en girasol y en ambientes diferentes, Olalde *et al.* (2000) reportaron una ETc acumulada durante el ciclo del cultivo de 353 mm en un clima cálido subhúmedo (Aw_0), mientras que Escalante (1995) obtuvo una ETc estacional similar (371 mm) en condiciones de secano en clima Cw. Esta variación puede explicarse principalmente por diferencias en la especie y el ambiente (Salera y Baldini, 1998).

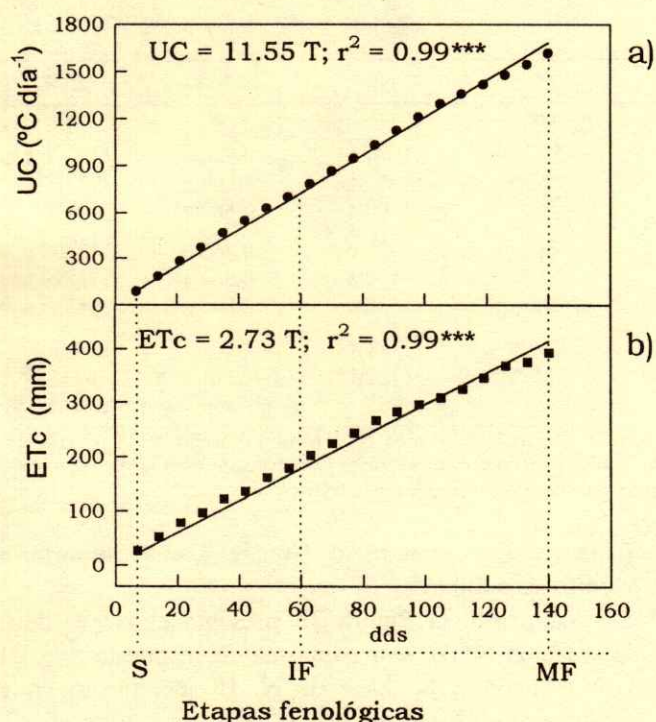


Figura 2. Unidades calor (UC, a) y evapotranspiración del cultivo (ETc, b) acumuladas de amaranto. Montecillo, México. Verano, 1999. dds = días después de la siembra.

Biomasa Total (BT) e Índice de Cosecha (IC)

La producción de biomasa (g m^{-2}) mostró cambios significativos por N, DP y la interacción N*DP (Cuadro 1, Figura 3a). Con respecto al efecto de N, la aplicación de 10 y 20 g m^{-2} de N incrementó la biomasa total en 503 y 1168 g m^{-2} , respectivamente (Cuadro 1). Tendencias similares se han encontrado en girasol (Escalante, 1995). Dicho incremento puede atribuirse a una mayor radiación solar interceptada, producto de un mayor tamaño del dosel vegetal debido al N (Escalante *et al.*, 2000). El IC aumentó conforme la dosis de N fue mayor (de 8 a 11%); sin embargo, estas diferencias no fueron significativas.

En el Cuadro 1, que presenta el efecto de la DP sobre la biomasa total, se observa un incremento de 403 y 668 g m^{-2} cuando a partir de 12.5 pl m^{-2} se eleva la DP a 25 y 33.3 pl m^{-2} , respectivamente. En contraste, el IC promedio fue de 10% y no presentó cambios significativos por efecto de la densidad, el cual coincide con el reportado por Hauptli y Jain

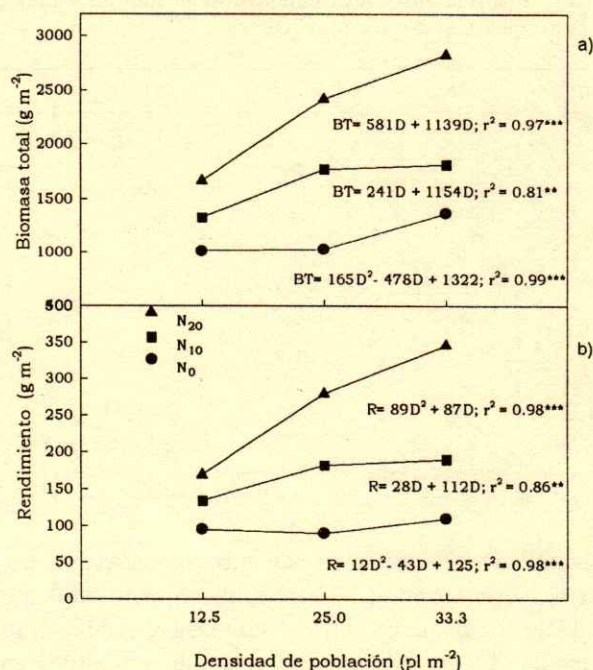


Figura 3. Acumulación de biomasa total (a) y rendimiento de semilla (b) de amaranto en función del nitrógeno y densidad de población. Montecillo, México. Verano 1999. N_0 , N_{10} y N_{20} (0, 10 y 20 g m^{-2} de N)

(1978), quienes mencionaron que el valor de IC para especies de amaranto domesticadas es de 10 a 15%.

Dichos incrementos son de esperarse, ya que cuando se eleva la DP, en particular acortando la distancia de siembra, se logra una mayor cobertura del suelo por el dosel y, en consecuencia, una mayor intercepción de la radiación, lo que se traduce en mayor producción de materia seca en el cultivo (Escalante, 1992). Sin embargo, Henderson *et al.* (2000), al comparar el efecto de la DP en diferentes ambientes, señalaron que en un clima árido los resultados son contrarios a los anteriores, ya que al inicio del crecimiento existe gran demanda por agua por la alta DP, lo que ocasiona una pérdida significativa de plantas que no alcanzan la madurez fisiológica y, por lo tanto, se reduce el rendimiento por unidad de superficie. En cuanto a la interacción nitrógeno*densidad, la mayor producción de biomasa se logró con DP alta (33.3 pl m^{-2}) y el valor más alto de N (20 g N m^{-2}) la cual fue de 2827 g m^{-2} (Figura 3a). Asimismo, el rendimiento más alto (346 g m^{-2}) se logró con este tratamiento.

La biomasa y el rendimiento más bajos (1234 g m^{-2} y 115 g m^{-2} , respectivamente), se encontraron

Cuadro 1. Rendimiento y sus componentes de amaranto en función del nitrógeno y densidad de población. Montecillo, México. 1999. Valores promedio de cuatro repeticiones.

Factor†	Nivel	BT†	REN	IC	LP	NP	PMS	NSM
		----- g m ⁻² -----		%	cm	m ⁻²	g	m ⁻²
N	0	1134 c [§]	98 a	8.8 a	54 b	1076 b	0.826 a	119370 c
	10	1637 b	168 b	10.5 a	66 ba	1336 ba	0.869 a	207771 b
	20	2302 a	265 a	11.4 a	74 a	1500 a	0.882 a	320776 a
D	12.5	1334 c	132 c	10.0 a	78 a	927 b	0.865 a	163268 b
	25.0	1737 b	183 b	10.3 a	61 b	1437 a	0.864 a	222820 ba
	33.3	2002 a	215 a	10.5 a	56 b	1550 a	0.847 a	261829 a
N		(319)***	(42)***	NS	(12)*	(393)*	NS	(80728)***
D		(255)***	(26)***	NS	(12)***	(325)**	NS	(76835)**
N*D		(699)*	(73)***	NS	NS	NS	NS	(211177)**

† N = nitrógeno, D = densidad de población; †BT = biomasa total, REN = peso de semilla, IC = índice de cosecha, NP = número de panículas, LP = longitud de panoja, PMS = peso de mil semillas, NSM = número de semillas m⁻²; § Valores con la misma letra dentro de columnas son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey. NS = no significativo, significativo a P ≤ 0.05 (*); 0.01 (**); y 0.001 (***). El número dentro del paréntesis es la DSH_{0.05}.

con la DP de 12.5 pl m⁻² y sin nitrógeno. Asimismo, como se observaron en la Figura 3, en el tratamiento sin nitrógeno, el incremento en biomasa y rendimiento de semilla fue más bajo, con relación al cultivo en donde se aplicó N, lo que demuestra que este nutrimento es determinante para el incremento en la producción de amaranto cuando se quiere elevar la densidad de población.

Rendimiento y Sus Componentes

El amaranto con N mostró mayor longitud de la panoja (LP), mayor número de panículas (NP) y de semillas por m² (NSM) y, en consecuencia, un rendimiento más alto. Así, con 10 g m⁻² de N el rendimiento se incrementó en 71 g m⁻², la LP en 12 cm, el NP en 260 y el NSM en 88401 por unidad de superficie (Cuadro 1). Sin embargo, el N no afectó el peso de mil semillas (PMS). Con 20 g N m⁻² el rendimiento se incrementó en 167 g m⁻², la LP en 20 cm, el NP en 424 m⁻² y el NSM en 201406 semillas m⁻² (Cuadro 1). El aumento en la densidad de población redujo la LP, no obstante, el NP y el NSM aumentaron y mostraron una relación alta con el rendimiento de semilla. Los valores más altos en NP y NSM se lograron con la DP de 33.3 plantas m⁻² (1550 panículas m⁻²), 33.3 plantas m⁻² (261829 semillas) y 12.5 plantas m⁻² (78 cm). El rendimiento de semilla aumentó en 32 g m⁻² al incrementar la densidad de 25 a 33.3 pl m⁻² (Cuadro 1, Figura 3b). Para 20 g m⁻² de N, se alcanzó un rendimiento promedio de 264.8 g m⁻², mientras que para cualquier dosis de N, la mayor densidad de población (33.3 pl m⁻²) condujo al mayor rendimiento agronómico: 215.1 g m⁻²

(Cuadro 1). Alejandré y Gómez (1999) reportaron resultados similares.

Asimismo, la Figura 3b presenta el efecto de la interacción N*DP sobre una mayor respuesta a la DP con relación a la dosis de N. El incremento en el rendimiento al elevar la DP fue más alto con la aplicación de 20 g m⁻² de N. Dicho incremento se relacionó con un mayor número de semillas por m², mayor número de panículas y mayor tamaño del dosel vegetal manifestado aquí por la producción de biomasa (Escalante, 1995) y el índice de cosecha (Cuadro 2).

Eficiencia en el Uso del Agua y Eficiencia Agronómica del Nitrógeno

La eficiencia del uso del agua (EUA) en la producción de biomasa y de rendimiento de semilla, mostró cambios significativos por efecto de la

Cuadro 2. Correlación entre el rendimiento agronómico de amaranto y sus componentes.

Componentes del rendimiento	Coefficiente de determinación r ²	Probabilidad mayor que F
Peso de 1000 semillas (PMS, g)	0.21	NS
Número de semillas m ⁻² (NSM)	0.85	**
No. panículas (NP m ⁻²)	0.67	*
Longitud panoja (LP, cm planta ⁻¹)	0.22	NS
Índice de cosecha (IC, %)	0.68	*
Biomasa total (BT, g m ⁻²)	0.89	**

NS = no significativo, significativo a P ≤ 0.05 (*); 0.01 (**).

fertilización nitrogenada, la DP y la interacción N*DP (Cuadro 3). La aplicación de N elevó la EUA, tanto para la producción de biomasa, como para el rendimiento de semilla. Dichos incrementos fueron más altos con 20 g m⁻² de N (Cuadro 3). En clima cálido y en condiciones de temporal en girasol con N, Olalde *et al.* (2000) reportaron valores más altos de EUA que en amaranto, tanto para biomasa total (1.44 g m⁻² mm⁻¹) como para rendimiento (0.53 g m⁻² mm⁻¹).

El aumento en la DP, con cualquier dosis de N, elevó la EUA (Cuadro 3). Con la densidad de 33.3 pl m⁻² se obtuvo la mayor EUA para la producción de biomasa total con 5.20 g m⁻² mm⁻¹, y de 0.56 g m⁻² mm⁻¹ para producción de semilla. La mayor EUA está relacionada con una temprana y mayor cobertura del dosel vegetal, causada por la aplicación de nitrógeno y el aumento de la densidad de población, generando disminución en la evaporación del agua del suelo. Al respecto, Escalante (1995) encontró en girasol, que la producción de biomasa, el rendimiento de semilla, de aceite y la eficiencia en el uso del agua se incrementaron por elevar la densidad, aplicar fertilizante nitrogenado y dichos incrementos se favorecieron con la combinación de ambas prácticas. Por otra parte, con la combinación de 20 g m⁻² de N y la densidad de 33.3 pl m⁻² se logró la mayor EUA en la producción de biomasa y rendimiento. La EUA correspondió al cultivo sin fertilización nitrogenada y la DP más baja (Figura 4).

Cuadro 3. Valores promedio de uso eficiente del agua y de nitrógeno de amaranto en función del nitrógeno y densidad de población. Montecillo, México. 1999.

Nitrógeno	Densidad planta m ⁻²	EUA	EUA	EUN kg kg ⁻¹
		biomasa g m ⁻² mm ⁻¹	rendimiento	
N ₀	12.5		0.245	
	25.0	2.62	0.232	----
	33.3	2.66	0.282	----
N ₁₀		3.56		----
	12.5	3.45	0.350	3.9
	25.0	4.59	0.470	8.1
N ₂₀	33.3	4.70	0.492	9.2
	12.5	4.32	0.440	3.7
	25.0	6.27	0.728	9.4
	33.3	7.34	0.898	11.8
	N	(0.83)***	(0.11)***	NS
Prob. > F	D	(0.66)***	(0.07)***	(2.49)***
	N*D	(1.82)*	(0.19)***	NS

EUA = eficiencia en el uso de agua; EUN = eficiencia en el uso de nitrógeno; NS = no significativo, significativo a P ≤ 0.05 (*); 0.01 (**); 0.001 (***). El número dentro del paréntesis es la DSH_{0.05}.

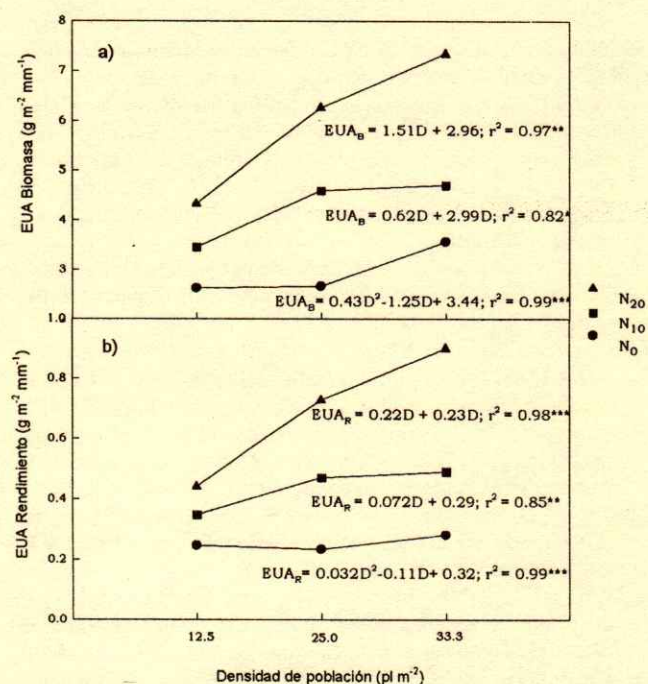


Figura 4. Eficiencia en el uso del agua (EUA) en la acumulación de biomasa (a) y rendimiento de semilla (b) de amaranto en función del nitrógeno y densidad de población. Montecillo, México. Verano 1999. N₀, N₁₀ y N₂₀ (0, 10 y 20 g m⁻² de N).

La eficiencia agronómica del nitrógeno (EA) sólo mostró cambios significativos por efecto de la DP (Cuadro 3). Con las dosis de N aplicadas, la EA del N fue más alta al elevar la densidad (Cuadro 3).

CONCLUSIONES

- En condiciones de clima templado, con la aplicación de N y el incremento en la densidad de población alta en amaranto, se eleva la eficiencia en el uso del agua y del N y, en consecuencia, la producción de biomasa y el rendimiento de semilla. Dichos incrementos son mayores cuando se combina una densidad de población y fertilización alta. El incremento en el rendimiento se relaciona con un mayor número de panículas por m², mayor número de semillas por m² y mayor producción de biomasa. El requerimiento de calor del aumento de siembra a madurez fisiológica fue de 1629° unidades calor y 385 mm de agua utilizada en la evapotranspiración.

LITERATURA CITADA

- Alejandro, G. y F. Gómez. 1999. Cultivo del amaranto en México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Arellano, J.L. 2000. El amaranto: Un cultivo alternativo de calidad nutritiva. Investigación de vanguardia para los Valles Altos de México. Memoria Técnica 1. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, estado de México.
- Barbieri, P.A., H.R. Sainz, F.H. Andrade y H.E. Echeverría. 2000. Row spacing effects at different levels of nitrogen availability in maize. *Agron. J.* 92: 283-288.
- Bressani, R., A. Sánchez-Marroquín y E. Morales. 1992. Chemical composition of grain amaranth cultivars and effects of processing their nutritional quality. *Food Rev. Int.* 8: 23-49.
- Doorenbos, J. y W.O. Pruitt. 1986. Las necesidades de agua por los cultivos. Riego y Drenaje. Manual 24. Food and Agricultural Organization. Rome, Italy.
- Elbehri, A., D.A. Putnam y M. Schmitt. 1993. Nitrogen fertilizer and cultivar effects on yield and nitrogen-use efficiency of grain amaranth. *Agron. J.* 85: 120-128.
- Escalante, J.A. 1992. Interacciones entre el nitrógeno y la densidad de siembra en el cultivo del girasol (*Helianthus annuus* L.) bajo suministro limitado de agua. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, E.T.S. Ingenieros Agrónomos. Córdoba, España.
- Escalante, J.A. 1995. Aprovechamiento del recurso agua en cultivos de secano. Alternativas tecnológicas. Agroproductividad. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Escalante, J.A. y M.T. Rodríguez. 1994. Mayor eficiencia en el uso del nitrógeno en girasol mediante el manejo del cultivo. pp. 345-347. In: Pérez-Moreno, J. y R. Ferrera-Cerrato (eds.). Agroecología y Desarrollo Sostenible. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Escalante, J.A., L.E. Escalante y L. Aguilar. 2000. La producción de okra (*Abelmoschus esculentus*, L.) en función del arreglo topológico. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 6: 39-48.
- Espitia, E. 1992. Informe de avances en la investigación en amaranto. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, México.
- Fischer, R.A. 1981. Optimizing the use of water and nitrogen through breeding of crops. *Plant Soil* 58: 249-278.
- Flores, J.M., J.L. Chan y L. Bravo. 1985. Fenología del maíz y frijol en el Altiplano de Zacatecas. II. Unidades calor (UC) y desarrollo fenológico. *Fitotecnia. Sociedad Mexicana de Fitogenética A.C.* 7: 66-81.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema climático de Köppen (adaptado para las condiciones de la República Mexicana). 4ª edición. Ed. Laros. México, D.F.
- Gregory, P.J., L.P. Simmonds y C.J. Pilbeam. 2000. Soil type, climatic regime, and the response of water use efficiency to crop management. *Agron. J.* 92: 814-820.
- Howell, T., J. Tolck, A. Schneider y S. Evett. 1998. Agroclimatology. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity. *Agron. J.* 90: 3-9.
- Harmsen, K. 1984. Nitrogen fertilizer use in rainfed agriculture. *Fert. Res.* 5: 371-382.
- Hauptli, H. y S.K. Jain. 1978. Biosystematics and agronomic potential of some weedy and cultivated amaranths. *Theor. Appl. Genet.* 52: 177-185.
- Henderson, T.L., A.A. Schneiter y N. Riveland. 1993. Row spacing and population effects on yield of grain amaranth in North Dakota. pp. 219-221. In: Janick, J. y J.E. Simon (eds.). *New crops*. Wiley. New York.
- Henderson, T.L., B.L. Johnson y A.A. Schneiter. 1998. Grain amaranth seeding date in the Northern Great Plains. *Agron. J.* 90: 339-344.
- Henderson, T.L., B.L. Johnson y A.A. Schneiter. 2000. Row spacing, plant population, and cultivar effects on grain amaranth in the Northern Great Plains. *Agron. J.* 92: 329-336.
- Kauffman, S.C. y P.W. Hass. 1984. Grain amaranth: An overview of research and production methods. Rodale Press Inc. Emmaus, PA.
- Liang, B.C., A.F. Mackenzie, P.C. Kirby y M. Remillard. 1991. Corn production in relation to water inputs and heat units. *Agron. J.* 83: 794-799.
- Limon-Ortega, A., K.D. Sayre y C.A. Francis. 2000. Wheat nitrogen use efficiency in a bed planting system in Northwest Mexico. *Agron. J.* 92: 303-308.
- McDonald, G.K. 1989. The contribution of nitrogen fertilizer to the nitrogen nutrition of rainfed wheat crops in Australia: A review. *Austr. J. Exp. Agric.* 29: 455-481.
- Merrien, A. 1986. Cahier technique turnesol. *Physiologie. Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains*. Paris, France.
- Moll, R.H., E.J. Kamprath y W.A. Jackson. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.* 74: 562-565.
- Muchow, R.C. 1998. Nitrogen utilization efficiency in maize and grain sorghum. *Field Crops Res.* 56: 209-216.
- Myers, R.L. 1998. Nitrogen fertilizer effect on grain amaranth. *Agron. J.* 90: 597-602.
- Olalde, V.M., J.A. Escalante, P. Sánchez, L. Tijerina, E.M. Engleman y A.A. Mastache. 2000. Eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno, y rendimiento del girasol, en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido. *Terra* 18: 51-59.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1995. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. México, D.F.
- Salera, E. y M. Baldini. 1998. Performance of high and low oleic acid hybrids of sunflower under different environmental conditions. *Note 1, Helia* 21(28): 41-54.
- Sinclair, T.R., C.B. Tanner y J.M. Bennett. 1984. Water use efficiency in crop production. *Bio Sci.* 34: 36-40.
- Snyder, R.L. 1985. Hand calculating degree-days. *J. Agric. Forest. Meteorol.* 35: 353-358.
- Williams, J.T. y D. Brenner. 1995. Grain amaranth (*Amaranthus* sp.). pp. 129-186. In: Williams, J. (ed.). *Cereals and pseudocereals*. Chapman & Hall. London, UK.

AGRICULTURA NHAÑHU-OTOMÍ DEL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO

Nhañhu-otomi Agriculture in the Mezquital Valley, State of Hidalgo, Mexico

Diódoro Granados-Sánchez^{1‡}, Georgina F. López-Ríos¹ y Juan Hernández-Hernández¹

RESUMEN

Se estudió la agricultura de escurrimiento (secano), la cual es practicada por la cultura *nhañhu-otomí*, en el Valle del Mezquital, Hidalgo, destacando el manejo de la parcela como unidad de producción. Se describen los agrohábitats, para lo cual se utiliza una clasificación local de los tipos de suelos, considerando la topografía en que se desarrollan, su estructura, su fertilidad. Además, las tecnologías tradicionales que, mediante la cosecha de lluvia, a través de procesos de adaptación y sistematización, han dado lugar a originales prácticas de cultivo. Se ponen de relieve los razonamientos y conocimientos ancestrales con los que esta cultura indígena enfrenta los factores limitativos de una región semiárida como ésta.

Palabras clave: Zonas semiáridas, agricultura de secano, agricultura tradicional, etnobotánica.

SUMMARY

"Secano" agriculture (a system for dry lands), which is practiced by the *nhañhu-otomi* people in the Mezquital Valley, state of Hidalgo, Mexico, was studied. A key point of this system is the management of the plot as a production unit. Several agrohabitats are described, including a local soil-type classification that involves topography, structure and fertility. Traditional technologies, such as "rain water harvest", are described as well, and a systematization of culture practices is included. The approach followed was to try to understand the ancestral knowledge of the indigenous people that has allowed them to overcome the limiting factors of this arid region.

Index words: Semi-arid zones, agriculture of dry lands, traditional agriculture, ethnobotany.

¹ División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, México.

[‡] Autor responsable (didorog@latinmail.com)

Recibido: Septiembre de 2001. Aceptado: Marzo de 2003.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 22: 117-126.

INTRODUCCIÓN

En Mesoamérica, la naturaleza no permitió una vida fácil a los hombres. Debido a la conformación montañosa de su territorio, las poblaciones hubieron de asirse precariamente a pequeñas parcelas de suelo cultivable expuestas al deslave, a la erosión, a las inundaciones, al frío, a las heladas repentinas y a la irregularidad de las lluvias. Estas condiciones, de por sí ya precarias para el desarrollo de la agricultura, se acentúan al extremo en aquella vasta superficie que, configurada sobre su flanco interior (a sotavento), delimita la gran región seca que se prolonga casi de forma ininterrumpida hasta la costa del Pacífico, donde la lluvia no cae sino en el verano, por lo que el campesino sólo logra una cosecha anual y para quien el agua se ha convertido en una necesidad primordial (Wolf, 1972).

La creciente aridez y la poca pluviosidad definen claramente la región de Árido América, como una inmensa tierra árida y seca en el estado de Hidalgo, ocupada por pequeños grupos llamados chichimecas o "descendientes del perro", quienes vivían combinando las actividades de cacería y recolección.

Esta frontera que conjugaba una barrera natural y un límite socio-cultural, no conformaba una simple e invariable línea que separaba de un lado los campos cultivados y del otro los secos matorrales; más bien, daba lugar a una extensa y cambiante zona que, al ser dominada algunas veces por los recolectores y otras por los cultivadores (Wolf, 1972), hacía posible el intercambio cultural y la transmisión de conocimientos en todos los órdenes de la vida material y espiritual de las comunidades que ahí confluían.

Así, antes de la llegada de los conquistadores españoles, la población otomí, llamada así por los Aztecas para designar a varios grupos étnicos considerados como inferiores y bárbaros (Martín y Gómez, 1991), fue sometida por los grupos nahuas que constituyeron el llamado "Imperio Azteca". De esa interacción de la población recolectora-cazadora con aquella población dedicada en forma primordial a la práctica de una agricultura diversa y tecnificada, depositaria de un largo proceso histórico y cultural,

sin duda se propició la transmisión de un conjunto de conocimientos sobre la relación entre las condiciones del medio y las formas de obtener los productos necesarios para la subsistencia.

A pesar de que el grupo otomí se asentó en la región árida del Valle del Mezquital, éste, por su ubicación y condiciones ecológicas, encerraba una variedad de hábitats y nichos. Su riqueza se hacía manifiesta en la diversidad de cactáceas, bosques de pino piñonero, agaves, yucas, mezquites, además de la nutrida fauna que frecuentaba sus chaparrales. Todo ello, combinado con el conocimiento ancestral adquirido por su contacto con los grupos nahuas, les abría la posibilidad de utilizarlo de manera variada, intensiva y acorde con los ciclos naturales.

Sin embargo, esta biodiversidad, que bajo las condiciones de manejo de los grupos indígenas constituía una gran riqueza, pronto se vio sujeta a fuertes presiones producto de la desmedida explotación a que fue sometida. Los grupos otomíes, al igual que todos los pueblos indígenas de México, fueron víctimas, desde la época de la conquista (primero por parte del español, posteriormente del criollo y luego del mestizo) del despojo de sus mejores tierras.

De esta forma, con el establecimiento de los nuevos señoríos y poblados, así como la introducción de actividades agrícolas y ganaderas, se alteraron y homogeneizaron en pocos años enormes extensiones de paisaje natural. A los indígenas se les sometió a un creciente proceso de discriminación social y política que perduró hasta nuestros días (Medina y Quezada, 1975).

Todo esto originó que, con el paso del tiempo, el grupo otomí (*nhanñhu*) guardara una actitud de retraimiento hacia el mestizo, al que consideraron como abusivo y falso, aunque paradójicamente le hayan concedido un *status* de superioridad, debido a sus conocimientos, muchos de los cuales se adoptaron y asimilaron como parte de su cultura (Collins y Qualset, 1999).

Con este bagaje —que era una amalgama de saber ancestral y conocimientos nuevos— y ante el interminable despojo de sus tierras, los otomíes se refugiaron en las serranías, en los lugares menos deseados, más alejados e inaccesibles, en los que aquellos antiguos cazadores-recolectores nómadas otomíes (“*otho*”: no poseer nada y “*mi*”: pueblo sin residencia) volvían a depender de la vegetación y de la fauna silvestre para su subsistencia (Bernal, 1996). Equipados con un conocimiento que les permitió

adaptarse y sobrevivir ante las severas condiciones del desierto, comenzaron con la práctica de una agricultura adaptada a esas condiciones y que transmitida de generación en generación, en la actualidad se conoce como agricultura de temporal (Nazarea, 1998; Collins y Qualset, 1999).

Pero además, el conjunto de actividades productivas contempla, de acuerdo con el conocimiento íntimo de los procesos naturales y las necesidades mismas de la subsistencia, toda una serie de prácticas complementarias que, como antaño, se apoyan en el pastoreo y la recolección de una variedad de plantas comestibles que comprende: frutos de temporada como el garambullo (*Myrtillocactus geometrizans*), el capulín (*Prunus capulli*), la tuna (*Opuntia* spp.), el mezquite (*Prosopis laevigata*), así como flores de garambullo, de palma (*Yucca filifera*) y de maguey (*Agave* spp.).

De las tres vertientes del proceso de producción —agricultura, ganadería extensiva de especies menores y recolección— la primera es la actividad que muestra que aquellas ancestrales técnicas hacían de cada sitio una isla con una vocación productiva específica. De esta manera, al mismo tiempo que el hombre se sirve de los recursos naturales para asegurar su subsistencia, contribuye a su preservación; en una época en la que la agricultura intensiva y monoespecífica, practicada sobre enormes superficies, ha terminado por homogeneizar el paisaje con el empobrecimiento de la diversidad de especies vegetales y animales, con la contaminación de suelos y aguas, con la erosión, con la desertificación, etc.

La agricultura otomí (*nhanñhu*) del Valle del Mezquital, Hidalgo, es un ejemplo vivo de la conjugación del conocimiento y de la tecnología tradicionales que han hecho posible la sobrevivencia, a lo largo del tiempo, de gran número de comunidades, en un medio que para la moderna agricultura intensiva presenta particularidades que lo vuelven “adverso”. No obstante, esta agricultura es también una demostración de la armonía que rige las relaciones entre los ciclos de las sociedades campesinas y los ciclos de la naturaleza.

Por las razones anteriores, en una época en que se reconoce abiertamente el inconmensurable deterioro del planeta, es necesario rescatar el conocimiento de la tecnología tradicional y de la dinámica de las formas de aprovechamiento de los recursos naturales. Específicamente actividades productivas que permitan encontrar caminos que conduzcan a replantar los actuales procesos productivos y sustituirlos por

aquellos que hagan posible revertir la catástrofe a la que se encamina la más compleja de las sociedades hasta ahora desarrolladas.

Dentro de este marco, el presente trabajo tiene como finalidad abordar una parte de esa compleja red de relaciones que, sintetizada en la agricultura como medio para asegurar la subsistencia, se entreteje entre la cultura otomí (*nhanñhu*) y los recursos que la naturaleza les proporciona y que comprende un profundo conocimiento de las características del relieve, de la topografía, de los recursos hidrológicos, del clima, del suelo, de la vegetación natural y de los ciclos reguladores de ellos. Para esto, tomando como núcleo representativo de esta extensa zona del Valle del Mezquital a la comunidad de Huitexcalco, municipio de Chilcuatla, Hidalgo, primero se delimitan las condiciones ecológicas de la región y luego se describen las formas mediante las cuales los campesinos interrelacionan las condiciones específicas de las áreas apropiadas para la práctica de la agricultura, con las tecnologías tradicionales que les permiten manejar los recursos y reproducir sus condiciones de vida.

MATERIALES Y MÉTODOS

La caracterización de la zona de estudio, así como la descripción de la tecnología tradicional, que es la base del sistema de producción agrícola practicado por los campesinos otomíes (*nhanñhu*), se aborda, con el fin de lograr una objetividad descriptiva y una claridad analítica, desglosando la unidad que representa el esquema de producción, en sus tres componentes principales: i) las áreas de producción o microhábitats, ii) los diferentes tipos de suelo, y iii) el proceso de producción.

De esta forma, el proceso de obtención y procesamiento de información comprende una serie de fases que combinan el trabajo de campo con el de gabinete:

- a) Caracterización geográfico-ecológica, por cartografía (cartas geológicas, topográficas, edafológicas, de vegetación, de uso del suelo, escala 1:50 000, así como mediante revisión bibliográfica) de la zona y delimitación de los agrohábitats que los campesinos reconocen, utilizando la información cartográfica ya procesada, recorridos de campo, entrevistas y una revisión de material bibliográfico.
- b) Análisis de los conceptos, categorías y sistemas de clasificación empleados por los campesinos, para la definición de los límites de los diferentes

microhábitats y de las relaciones internas y externas existentes entre ellos.

c) Observación directa y participación en actividades agrícolas.

d) Entrevistas abiertas con informantes clave para obtener y confirmar conocimientos e información relevante.

e) Colecta de muestras de especies vegetales de importancia económica y cultural para su identificación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características Ecológicas de la Región

El Valle del Mezquital es en realidad una cuenca de origen lacustre que ocupa las depresiones que se han formado entre el relieve montañoso de la llamada Meseta Central y que pertenece a la provincia fisiográfica denominada Neovolcánica, en su porción cercana a la vertiente occidental de la Sierra Madre Oriental. El valle constituye una de las partes elevadas de la cuenca del río Moctezuma que se encuentra drenada por el caudal permanente del río Tula, tributario de las aguas que provienen de la Cuenca de México a través del Tajo de Nochistengo y del túnel perforado cerca de Tequixquiac, el cual entra y atraviesa el valle con una trayectoria de sur a norte en la parte oriental del mismo y recibe, además, en su margen suroeste los escurrimientos de la sierra del Xinthé (Seegerstrom, 1962; González, 1968).

El clima es de tipo seco BS1kw(w) (i') (García, 1981); la precipitación es variable de un año a otro, tanto en los valores mensuales como en los anuales. La mayor precipitación suele presentarse de mayo a septiembre, coincidiendo con la época calurosa; la temporada de menor precipitación ocurre durante enero y febrero. Además, los campesinos de la región conciben un periodo de canícula que comprende en general del 16 de julio al 24 de agosto, con riesgos para los cultivos, ya que suele no haber lluvias.

La comunidad de Huitexcalco se ubica entre 20° 15' y 20° 18' N y entre 99° 16' y 99° 20' O, en las laderas de las elevaciones conocidas como cerro (*toho*) de la Cruz y cerro Colorado, cuyas partes alcanzan una altitud de 2400 a 2640 m, respectivamente; estos cerros muestran un frente rocoso de fuerte declive surcado por cauces (*nñe*) que descienden de sus partes altas. En sus desembocaduras (*muinñe*) hay pequeños abanicos aluviales de

pendiente moderada y suelo pedregoso; en la base de las elevaciones se presentan pequeñas laderas (*ngats'i*) con pendientes regulares y suelo pedregoso rocoso; a pie de monte existen pequeñas zonas planas con poca inclinación y ondulaciones (*ngat'i-ndants'i*), con suelo somero pedregoso.

En la parte baja del pie de monte se tienen planicies o bajadas con ligero declive y algunas ondulaciones (*batha-ndants'i*) que se hallan delimitadas por los escasos arroyos (*nñe*) que las cruzan, con suelos profundos de origen lacustre, de color pardo o negro y afloramiento de tepetate (*xido*) pobremente cementado. Además, entre las partes altas de los cerros hay lomeríos, abanicos aluviales y terrazas estructurales (*maye*) con fuertes declives y suelo somero pedregoso/rocoso (Figura 1).

Como puede apreciarse, esta clasificación fisiográfica interrelaciona tanto la topografía y la pendiente del terreno, como las condiciones de humedad y suelo, puesto que éstos son factores esenciales para definir unidades potenciales para el desarrollo de una agricultura que considere, por un lado, el abastecimiento de cierta humedad a lo largo

del ciclo y, por el otro, la necesidad de que el cultivo cuente con un sustrato que le asegure nutrientes mínimos para los cultivos. Así, una vez definidos los microhábitats, el paso siguiente es el acondicionamiento de las parcelas mediante la construcción de diversas obras con el fin de captar, conducir y aprovechar el agua de los escurrimientos, pero también para propiciar la acumulación y el mantenimiento de los suelos.

Clasificación de Microhábitats

En el medio rural de países como México, en los que subsisten comunidades con raíces ancestrales, a las que el "desarrollo" marginó y aisló en aquellas áreas de poco interés para la vida moderna y el "progreso", es evidente que la cotidianidad de la vida, el soporte de la identidad y proyección de la cultura, están íntimamente relacionados con el medio que les rodea. Por ello, el hábitat de las poblaciones humanas está integrado por agregados característicos de recursos o microhábitats que, a la vez de designar pequeños espacios o áreas naturales correspondientes

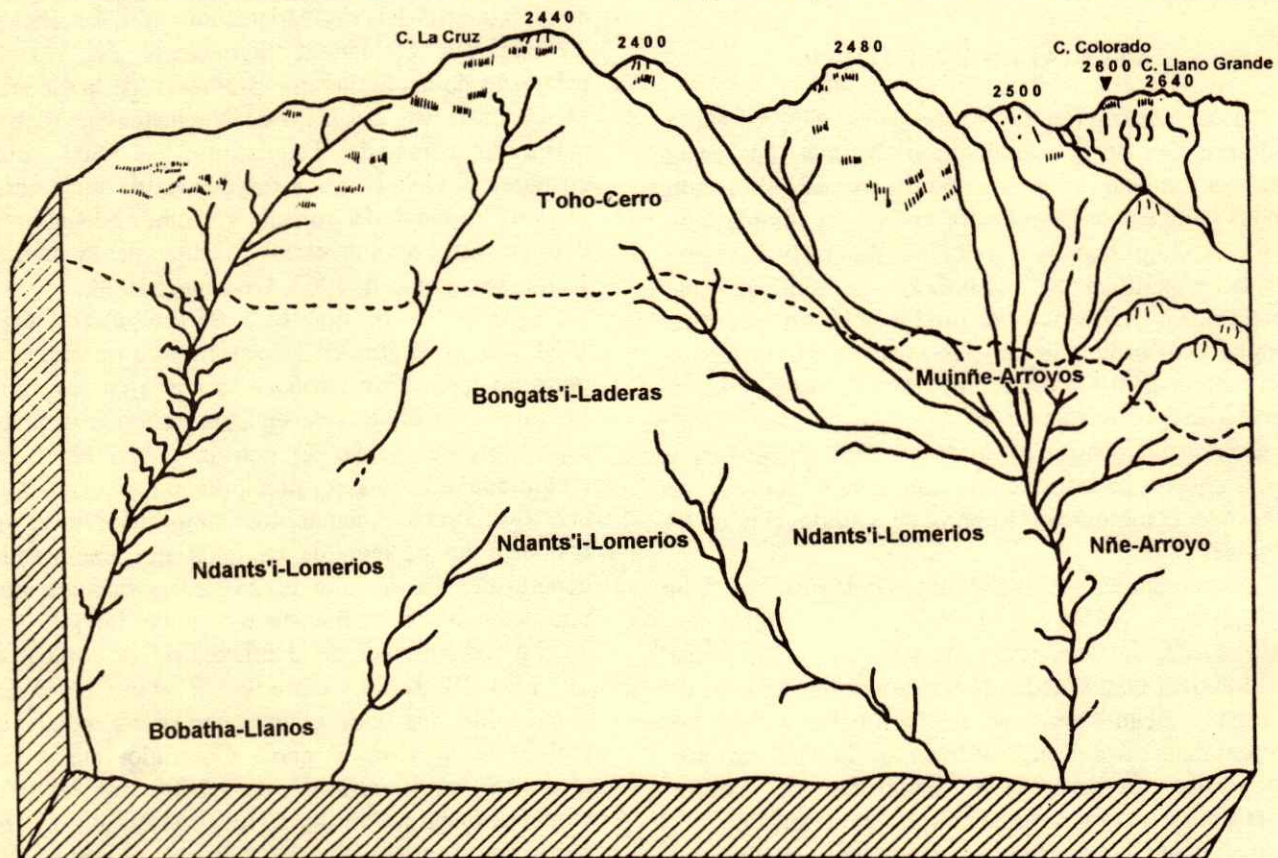


Figura 1. Diagrama que muestra la fisiografía de la localidad de estudio.

a condiciones ecológicas específicas (fisiográficas, topográficas, hidrográficas, climáticas y edáficas), son los elementos que dan cohesión y sentido a las múltiples manifestaciones de la vida en la comunidad.

En esta localidad otomí (*nhanñhu*), la compleja estructura de los factores ecológicos y el conocimiento que de ellos tienen los campesinos, se entrelazan para hacer posible la preservación de una relación armónica entre la disponibilidad de recursos naturales, su adaptación o modificación y su aprovechamiento, dentro de áreas específicas o microhábitats que son la síntesis del saber ancestral. Estos microhábitats que son delimitados por su potencial productivo, ubicación y condiciones, comprenden llanos (*bobatha*), lomeríos (*bondants'i*) y laderas (*bongats'i*) (Figura 2), dentro de los cuales se acondicionan áreas de cultivo o parcelas (*huahi*) de extensión variable, de acuerdo con la topografía y el suministro de agua que reciben durante la época de lluvia.

Aunado a esto, como resultado de la combinación de las características de los microhábitats, se deriva una variedad de parcelas que, de acuerdo con sus condiciones de fisiografía, pendiente, retención de humedad, suelo y fertilidad, dan origen a una cantidad indeterminada de variantes que enriquecen casi de manera ilimitada las posibilidades de aprovechar las diferentes áreas y sus particulares potenciales para la agricultura de temporal. Dentro de este marco, como producto de esta multitud de combinaciones ambientales, es posible encontrar:

- Llanos (*Bobatha*). Son pequeñas planicies que se localizan en la parte baja de los lomeríos y laderas con pendiente poco pronunciada, cuyas parcelas (*mothe*)

pueden presentar como variantes: *muinñe*, *ngadñe*, *nut'athee* y *mothee*, que son terrenos con una susceptibilidad diferente para su utilización en la agricultura; además, es posible hallar otro tipo de parcelas denominadas *ndants'i*, *ngats'i* y *ngadi*.

- Lomeríos (*bondants'i*). Constituyen pequeñas áreas con terrenos ondulados que se localizan entre las planicies y el pie de monte, con pendientes regulares; sus parcelas se conocen como *mothe* (con la modalidad *mothee*), así como parcelas de los tipos *ndants'i*, *ngats'i* y *ngadi*.

- Laderas (*bongats'i*). Comprenden terrenos que se localizan en áreas ubicadas a pie de monte, con pendientes muy pronunciadas, cuyas parcelas *mothe* pueden presentar las variantes conocidas como *nut'athee* y *mothee*; además, pueden presentarse parcelas de los tipos *ndants'i*, *ngats'i* y *ngadi*.

De acuerdo con esta clasificación, las características de las parcelas y sus variantes son:

Mothe. Son parcelas que poseen un potencial diferencial para el cultivo dependiendo de su superficie, disponibilidad de humedad y suelos, por lo que, de acuerdo con su topografía original, se acondicionan con una serie de obras cuya finalidad es coleccionar, desviar, conducir, regular y aprovechar el agua de lluvia y los escurrimientos que drenan desde las partes altas. De esta forma, se aseguran las mínimas cosechas de los cultivos básicos; sus variantes son: *muinñe*, *ngadñe*, *nut'athee* y *mothee*.

Muinñe. Son terrenos de cultivo con suelos producto de los acarreos o asolves (*masthe*), arenosos (*bomuhai*), de perfil grueso (*picahai*) y fértiles; están ubicados y acondicionados a la vera de lechos (*mui*) de los arroyos (*nñe*), cuyos escurrimientos

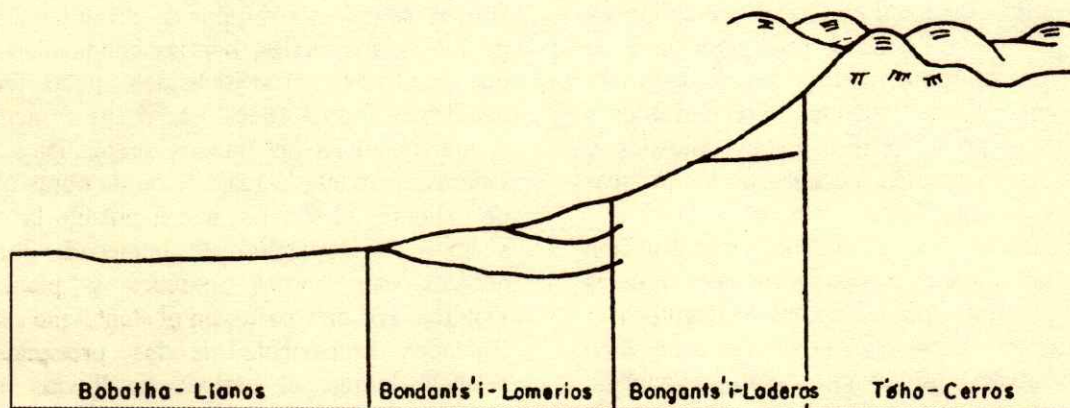


Figura 2. Hábitat de los agricultores *nhanñhu-otomí* y sus microambientes.

intermitentes delimitan los lomeríos (*bondants'i*) y atraviesan las pequeñas planicies (*bobatha*). Mediante la construcción de represas transversales (*jodo*) y bordos acondicionados con piedras dispuestas unas sobre otras, se regulan las avenidas, reforzándose con la plantación (*ñet'i*) de maguey y, en ocasiones, con algunos frutales como durazno (*ixi*) o aguacate (*t'zani*), en aquellos terrenos en los que viven y siembran los campesinos o los que se encuentran cerca del área urbana, con la finalidad de darles cuidados y vigilancia. Estas parcelas aseguran las cosechas del ciclo primavera-verano, pues en los años de buenas lluvias suministran la humedad suficiente para el cultivo de maíz, el cual se siembra solo, asociado con haba o frijol o alternándolo con haba. Hace años, durante el ciclo de invierno, solía sembrarse garbanzo en algunas de estas parcelas aprovechando la humedad residual; para esto, se acostumbraba realizar previamente una circulación de las parcelas con ramas de mezquite y huizache, con el fin de brindarle protección contra los animales.

Ngadñe. Son terrenos de cultivo caracterizados por presentar suelos arenosos (*bomuhai*), profundos (*picahai*) y fértiles; se hallan ubicados y acondicionados en las riberas (*ngadi*) de los arroyos temporales que delimitan los lomeríos y cruzan las planicies. De la misma forma, mediante la construcción de paredes de piedras y bordos reforzados con plantación de maguey, se logran desviar las crecientes de los arroyos que inundan las parcelas. Estas parcelas aseguran buenas cosechas durante el ciclo primavera-verano, ya que en los años lluviosos suministran la humedad suficiente para el cultivo de asociación maíz-girasol-calabaza, alternado con frijol-haba.

Nut'athee. Son terrenos en los que se siembran cultivos contiguos, en general en terrazas, delimitados por bordos, paredes reforzadas con plantación de maguey y compuertas para permitir los desagües; se caracterizan por sus suelos areno-arcillosos (*bomuhai*), profundos y fértiles. Están ubicados y acondicionados en las partes aledañas de los arroyos temporales, provenientes de las pequeñas laderas y planicies; mediante represas de piedras y construcción de acequias, se desvían y conducen las avenidas ocasionales, ya que éstas permiten suministrar humedad suficiente para el cultivo de asociación maíz-girasol-calabaza, alternado con asociación frijol-arvejón-haba. Por las características de la precipitación en la región, sólo durante los años de

lluvias más abundantes se logran cosechas durante el ciclo primavera-verano.

Mothee. Son terrenos de cultivo cuyos suelos son variables, de perfil grueso y fértiles, los cuales se pueden encontrar y acondicionar tanto en llanos, como en lomeríos e inclusive en las laderas. Se diseñan de tal forma que permitan captar y recolectar el agua de los pequeños escurrimientos, mediante la construcción de bordos y paredes de piedras con compuertas de desagüe, reforzadas con plantaciones de maguey. Estos terrenos de cultivo, en los años de buena precipitación, captan humedad suficiente para el cultivo de asociación maíz-girasol-calabaza, alternado con frijol-arvejón-haba, por lo que hacen posible la obtención de buenas cosechas durante el ciclo primavera-verano.

Ndants'i. Esta clasificación corresponde a un grupo de parcelas aptas para el cultivo, aunque las condiciones de sus suelos, respecto a la textura, profundidad (en general son someros) y fertilidad son variables, puesto que se hallan en terrenos con pendientes pronunciadas, en las partes altas de los llanos, lomeríos y laderas. Para su uso con fines agrícolas se delimitan y dividen con bordos, paredes de piedra y se refuerzan con plantaciones de maguey, pero considerando que dependen únicamente del agua de las precipitaciones que se presentan durante la época de lluvias y, por lo tanto, la humedad es muy limitada en ellas, se siembran monocultivos de maíz alternándolos con frijol de un ciclo a otro. Por otra parte, a pesar de que en estos terrenos su siembra es parte de una tradición, durante el ciclo agrícola primavera-verano, en general el rendimiento es muy bajo o nulo.

Ngats'i. Este término designa a un conjunto de parcelas que, aunque pueden ser apropiadas para el cultivo, se caracterizan por la variabilidad de sus tipos de suelos, los cuales, por las condiciones y sitios en que se forman, son delgados, poco fértiles y de pendientes fuertes, que, pese a sus características, se acondicionan en los flancos de planicies, lomeríos y laderas, mediante la realización de obras que, a la par de delimitar el terreno, hacen posible la retención de suelo y la captación de humedad; para esto, se acondicionan bordos, paredes y plantaciones de maguey. Por otra parte, no obstante que estos terrenos dependen únicamente de las precipitaciones que reciben durante el período de lluvias, en ellos se siembra maíz alternado con frijol, pero su rendimiento es sumamente bajo.

Ngadi. Con este concepto se identifica un tipo de terrenos que pueden encontrarse tanto en las partes bajas de los flancos de planicies, como en lomeríos y laderas; los suelos de estos terrenos, a pesar de que son variables, gruesos y de fertilidad regular, presentan cierto potencial para la práctica de la agricultura, pues, mediante su delimitación y acondicionamiento con bordos, paredes y la plantación de maguey, logran captar pequeños escurrimientos de las precipitaciones que reciben durante el periodo de lluvias; en ellos es común efectuar, año tras año, la siembra de maíz, aunque en ocasiones se alterna con la asociación frijol-arvejo. El rendimiento en este tipo de parcelas es completamente aleatorio.

Clasificación de los Suelos (*Hai*)

La anterior caracterización de unidades y subunidades, cuyo potencial las convierte en áreas susceptibles a la práctica de la agricultura de temporal, sólo es un reflejo de la variada combinación de los elementos que configuran el paisaje de esta zona y el conocimiento que los campesinos tienen de ellos. La fisiografía, la topografía, la precipitación, la vegetación y el suelo conforman islas en las que estos elementos pueden dar lugar a un número indeterminado de combinaciones e interrelaciones. Por lo que al considerar sólo al sustrato que hace posible el desarrollo de los cultivos, sea un tanto arduo esquematizar el suelo que corresponde a cada una de las variantes de las unidades de producción definida en el apartado anterior. Por esta razón, se describen, por separado, los tipos de suelo que, de acuerdo con la clasificación otomí (*nhanñhu*), conforman el mosaico de las diferentes áreas que los campesinos dedican a la agricultura.

Los suelos que conforman el Valle del Mezquital son inmaduros y, en la mayoría de los casos, muy someros, salvo en los lugares donde la topografía y los factores permiten el desarrollo. El esquema de clasificación de los suelos que marca las diferencias entre las parcelas o áreas de producción agrícola, incluye a los suelos que a continuación se detallan:

Xinahi. Son suelos tepetatosos que presentan un perfil superficial delgado, no mayor que 30 cm; se localizan en las partes altas de los lomeríos (*ndants'i*) y en laderas (*ngats'i*), por lo que limitan el desarrollo de los cultivos ahí establecidos.

Picaha. Son suelos que presentan un perfil superficial mayor que 30 cm (gruesos), se encuentran ubicados

principalmente en las planicies (*batha*), pero también se localizan en superficies de abanicos aluviales (*muinñe*), en la parte baja de las laderas (*ngats'i*) y en los pies de monte; por su profundidad, es posible que los cultivos se desarrollen de manera adecuada.

Xidohai. Estos suelos presentan un alto porcentaje de tepetate (*xido*), lo que los hace poco aptos para la agricultura. No obstante, con la realización de ciertas obras y después de cierto tiempo, es posible, dependiendo de las condiciones de humedad, incorporarlos al cultivo.

Pehai. Con este término se define un grupo de suelos arcillosos que se desarrollan en sitios favorecidos por la topografía, la cual permite su acumulación por la concentración de los acarreos que se presentan con los escurrimientos de la temporada de lluvias.

Bomuha. Son suelos con alto contenido de arena (*bomu*) localizados en las inmediaciones de las represas, arroyos, riberas y en abanicos aluviales.

Mahadaha. Este término define a los suelos ricos en materia orgánica.

T'sihai. Son aquellos suelos salitrosos que, ubicados en los abanicos aluviales, son poco propicios para la agricultura y, aunque en algunas áreas se utilizan para el cultivo, por lo general se destinan al pastoreo de ganado ovino y bovino.

T'axhai. Son aquellos suelos que presentan una capa superficial de color blanquizco o pardo (*t'axi*); se caracterizan por su bajo contenido de materia orgánica.

'Bohai. Son suelos arcillosos de color negro (*bot'i*), muy apreciados por la fertilidad que le confiere su alto contenido de materia orgánica.

Bospihai. Son suelos cenizos (*bospi*), pobres en materia orgánica, de bajo contenido nutritivo para los cultivos.

Proceso de Producción en las Parcelas de Cultivo (*hanja ra befi ya bot'i huah*)

De acuerdo con la ubicación y las condiciones de los terrenos, se realizan prácticas específicas de acondicionamiento, hasta que la parcela se considera en condiciones de incorporarse a la producción. Las actividades que realizan los campesinos son:

Arreglo de parcelas (*ho'ca huahi*). Ésta es una actividad que requiere de diversas labores y años de perseverante trabajo. Durante el transcurso de este tiempo, el terreno se acondiciona en forma paulatina siguiendo una secuencia que contempla las siguientes actividades: a) desmonte (*xont'a huahi*), el cual se

realiza en forma manual, con herramientas tradicionales y animales de carga para sacar piedras y troncos; b) delimitación (*njuxa*); esta actividad se realiza a la par del desmonte, mediante la construcción de obras perimetrales y de captación (bordos, paredes, compuertas de desagüe y acequias), reforzadas con plantaciones de maguey (*Agave mapisaga*).

Labores de preparación (*futs'i*). Estas actividades, cuyo fin es el de acondicionar el terreno para la siembra, se realizan de enero a abril, una vez en que el ganado trashumante ha aprovechado los residuos de la cosecha anterior y las especies arvenses; estas labores, que consisten en dar un paso con el arado de ala sobre el lomo de los surcos del ciclo anterior, a una profundidad de 25 cm, con el fin de aflojar el suelo, captar humedad y facilitar la cruza, varían de acuerdo con el tipo de parcela e incluyen: a) desborde (*xot'athe*), que es la única labor realizada en las parcelas denominadas *ndants'i* y *ngats'i*, las cuales están sujetas a la poca cantidad de agua que reciben de las precipitaciones durante el período de lluvias. También se realiza, antes de la labor de cruza, en las parcelas conocidas como *mothee* y *ngadi*, que, además, captan y reciben escurrimientos; b) cruza (*ts'utfuts'i*), es la segunda labor para aquellas parcelas que captan los escurrimientos; se hace en sentido perpendicular de los surcos deslomados, en melgas de 11 a 15 pasos, con arado de ala, a una profundidad de 20 a 25 cm y puede ser la labor final en el proceso de preparación o previa a una última labor que se practica a las parcelas de tipo *mothe*; c) trazo de surcos (*yeante*), se realiza con arado de ala a una profundidad de 30 cm, con la finalidad de exponer el suelo a una mejor captación de humedad durante las primeras precipitaciones.

Para la realización de las labores de preparación se emplea la tracción animal, en general con yuntas de toros (*nt'ei nomfri*), uncidos con barzón corto para el desborde y la cruza, así como barzón largo para el trazo de surcos; el empleo de yuntas de mulas (*nt'ei burrufani*) le sigue en importancia y es poco común el empleo de yuntas de asnos (*nt'ei ronth*). En la actualidad, es frecuente observar que los productores de mayores recursos alquilan algunos tractores en los pueblos circunvecinos para realizar el barbecho.

Selección de semillas (*ndani*). Esta actividad es importante, pues de ella depende la obtención de cultivos sanos y vigorosos, que son la base de la dieta y de la perpetuación del germoplasma. Por su relevancia cultural, esta labor es de especial relevancia

en el caso del maíz (*Zea mays*) y el frijol (*Phaseolus vulgaris*), aunque también se cultivan y se someten a ciertos procesos de selección algunas otras especies que son de importancia económica para la comunidad (Cuadro 1). En el caso del maíz, como es un cultivo que muestra variabilidad, los criterios para seleccionar las mazorcas son: tamaño, número de granos, grosor del olote, color, precocidad y características forrajeras; para seleccionar los mejores ejemplares, se apartan las mazorcas antes de revolver y almacenar las cosechas en las trojes, se desgrana la semilla en luna madura (luna llena) —para asegurar una buena germinación y desarrollo— y se almacena en cántaros y ollas averiadas, previo tratamiento con una mezcla de cal y ceniza, cuyo fin es el de minimizar la incidencia de plagas. En lo que respecta a otros cultivos, como frijol, haba y arvejón, la selección de semillas se realiza con menos rigurosidad, pues sólo se escogen granos de buen tamaño y color uniforme; una vez que aparece la luna llena se almacenan en recipientes averiados. Los frutos de calabaza se seleccionan por el tamaño, la forma y el color de la pulpa, para luego ser despepitados unos cuantos días antes de la siembra. En el caso del girasol, se toma en consideración el tamaño de la inflorescencia y el color de las semillas, las cuales se escogen durante la cosecha y se desgranán inmediatamente para evitar la incidencia de roedores.

Siembra (*pot'i*). Esta labor comprende un período que abarca desde los primeros días de abril hasta el 24 de junio, aunque, en ocasiones, cuando las lluvias se atrasan, es común que la siembra de frijol se recorra hasta los últimos días de julio; la siembra se realiza de acuerdo con las condiciones del suelo: a) con humedad (*pot'axaha*). Si, además de las condiciones de humedad en el suelo, se dispone de yunta y mano de obra, dependiendo de la forma en que se hayan

Cuadro 1. Cultivos básicos sembrados por los campesinos nhanñhu.

Nombre nhanñhu	Nombre español	Nombre científico	Familia
<i>Detha</i>	Maíz	<i>Zea mays</i> L.	Graminae
<i>Ju</i>	Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Leguminosae
<i>Mu</i>	Calabaza	<i>Cucurbita maxima</i>	Cucurbitaceae
	Girasol	<i>Helianthus annuus</i>	Compositae
	Haba	<i>Vicia faba</i>	Leguminosae
	Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>	Graminae
<i>Guruja</i>	Arvejón	<i>Pisum sativum</i>	Leguminosae
<i>Uada</i>	Maguey	<i>Agave</i> spp.	Agavaceae
<i>Xat'a</i>	Nopal	<i>Opuntia</i> spp.	Cactaceae

preparado los suelos, la siembra puede adoptar las siguientes modalidades: i) siembra a tapa pie (*pot'ua*), que consiste en ir rayando los surcos con la yunta y detrás de ésta realizar la siembra depositando la semilla a golpe y tapándola con el pie; ii) siembra a tapa rabo (*pot'boi*), la cual consiste en sembrar surco por surco, en una maniobra en la que la yunta abre el caño de ida seguido de un sembrador que va depositando la semilla, para, al regreso, taparlo con la misma yunta. Este método se adopta cuando se dispone de yunta y poca mano de obra o cuando las lluvias se presentan con regularidad y las tierras aun no están preparadas; iii) siembra a ocoote (*mifi*), se realiza colocando un ocoote cortado en forma de embudo entre el ala y talón del arado de vertedera y de ahí un sembrador, que va junto con el yuntero, deposita la semilla en cada surco que se va abriendo; conforme avanza el corte, la tierra que regresa de los laterales cubre la semilla; iv) siembra al voleo (*xaniye*), consiste en la dispersión de la semilla en forma manual, para luego efectuar una cruz con la yunta para cubrir la semilla; este método es muy adecuado para unicultivos de cebada y arvejón; b) en suelo seco (*pot'yoní*). La siembra en estas condiciones es una práctica que se realiza sólo cuando la temporada de lluvias se atrasa; sus desventajas se manifiestan en un bajo porcentaje de germinación y en una fuerte competencia con las malezas; las formas de siembra adoptadas son tapa pie y tapa rabo.

Labores de cultivo: a) escarda (*xots'i*). Esta actividad consiste en rayar los lomos de los surcos con arado de vertedera, 15 a 20 días después de la emergencia, dependiendo de la incidencia de malezas y de la disponibilidad de humedad; cuando se realiza de manera manual, es una actividad que requiere de mucha mano de obra para el deshierbe, el destape y el aporque de tierra, así como para despuntar el maíz; b) origera (*yont'bi*). Es una práctica que se realiza alrededor de 15 días después de la escarda; consiste en rayar el caño de los surcos conformados con la escarda; se realiza con arado de vertedera acoplándole una origera (*guza*) de madera, con la finalidad de levantar el suelo en los lados de los surcos, pues en cultivos asociados y alternados se requiere descubrir las plántulas para evitar pudriciones y, a la vez, eliminar las malezas; c) deshierbe (*xamo*). Esta es una labor que se realiza después de la escarda, tanto para los unicultivos, como para los cultivos asociados alternados; d) fertilización (*ut'a mahada*). Es una práctica consistente en la aplicación, durante los meses de enero a marzo y principalmente en las

parcelas conocidas como *mothee*, de abonos orgánicos de origen avícola (*'fonni*), porcícola (*fochudi*), vacuno (*fondomfri*), ovino-caprino (*foyo*), equino (*fombru*) y pudriciones de rastrojos (*yasfani*).

Plagas y enfermedades. Entre las plagas de mayor incidencia en la región se encuentran: la conchuela del frijol (*ximo*), el chapulín (*c'oto*), la mosquita blanca del frijol (*taxpat'a ga ju*) y el gusano elotero (*zuue manza*). De estas plagas se recolecta el chapulín (*c'oto*) para alimento de los guajolotes y el gusano elotero (*zuue manza*) para alimento humano. Las enfermedades que se presentan en forma recurrente son: el chahuistle del frijol y el cuitlacoche (*dontha*), el cual se consume también como alimento humano. Dependiendo de la magnitud de las infestaciones, en ocasiones, el *ximo*, *c'oto* y *taxpat'a* se combaten con aplicaciones de insecticidas.

Cosecha (*xofo*). En el caso del maíz, ésta se realiza cuando gran parte de mazorcas están colgadas de las matas; las mazorcas se deshojan en forma manual durante la luna llena; para la recolección se usan ayates (*ronjua*), deshojadores (*ndodtha*), costales (*roza*) y asnos (*rondo*) para el acarreo; ya en casa, se seleccionan las mazorcas y se asolean antes de almacenarlas; el acarreo y arcinado del rastrojo se efectúa una vez que se terminan las labores de cosecha. Las vainas de frijol, arvejón y haba se cosechan cuando las plantas están casi secas y se termina de secarlas al sol; una vez que las vainas se encuentran bien secas, se apalean con garrotes para desprender el grano, el cual es ventilado para limpiarlo. La calabaza y el girasol se colectan y se seleccionan a la par del maíz.

Almacenamiento. El maíz se almacena en trojes (*c'usdetha*) rústicas, acondicionadas en árboles, en tapancos tipo cabañas o en rincones aislados dentro de las habitaciones, donde acomodan, además, los recipientes para almacenar el frijol, el haba y el arvejón; las calabazas se colocan en los techos de las casas.

Destino de la producción. La mayor parte de los productos cosechados se destinan al autoconsumo familiar, aunque en los años de buena cosecha, los excedentes —que también incluyen algunos artículos procesados como ayates (*ronjua*), lazos de lechuguilla (*ndohi* de lechuguilla), pulque (*sei, xithea*) y escobetas (*'esjuni*)— se comercializan o intercambian por otros productos como chile y jitomate, en los mercados de Mixquiahuala, Tlahuelilpan, Ixmiquilpan y Actopan, donde son muy apreciados por los agricultores de la

zona de riego. También se acostumbra obsequiar con estos productos a familias unidas por algún lazo de amistad o compadrazgo.

CONCLUSIONES

- La caracterización fisiográfica, topográfica y edáfica, que es el punto de partida para definir un conjunto de áreas con potencial para la agricultura, es un reflejo fiel de esa compleja red de relaciones que los campesinos establecen con su entorno, no sólo para obtener los recursos necesarios para su subsistencia, sino para coexistir en armonía con la naturaleza.

- Esta delimitación de áreas, de acuerdo con su potencial para la producción, es la demostración de que entre los campesinos otomí (*nhanñhu*) existe un profundo conocimiento de los factores ecológicos, a partir del cual sintetizan su posición ante la naturaleza. Ellos conciben su medio como aquellos factores que condicionan la variación climática y sus periodos, la formación de los suelos, los pequeños y grandes escurrimientos que, gracias a la lluvia, hacen posible el milagro de la siembra, la diversidad de especies vegetales y animales, su distribución, pero también la preservación de su cultura, de su vida.

- La persistencia de un idioma, cuya palabra se vuelve concepto y acción, es la evidencia de la diversidad etnográfica mexicana de esas regiones a las que la marginación no pudo arrancarles sus raíces, de esos hombres que, conjugando la tradición con el conocimiento que llegó de occidente, hacen de la vida una lucha cotidiana por la existencia, pero conservando la condición de su entorno.

- Los eriales, esos páramos llamados ejidos o propiedades pequeñas, los instrumentos de trabajo que

son de propiedad de los núcleos familiares, la tecnología que la tradición y la necesidad volvieron parte de los ciclos naturales, los procesos de trabajo, la organización que se fortalece en la ayuda mutua. La vida de la comunidad *nhanñhu* es parte de la lección que debemos aprender para tener un mundo en el que el desarrollo sea patrimonio de todos, para acabar con el mundo de explotación de la naturaleza y la opresión del hombre, y así construir una sociedad que se reconozca como parte inseparable de la naturaleza.

LITERATURA CITADA

- Bernal, P.F. 1996. Diccionario Español-Hñahñu, Hñahñu-Español. Instituto Nacional Indigenista. México.
- Brush, S.B. 1993. Indigenous knowledge of biological resources and intellectual property rights: The role of anthropology. *Am. Anthropol.* 95: 653-686.
- Collins, W.W. y C.O. Qualset. 1999. Biodiversity in agroecosystems. CRC Press. Boca Raton, FL.
- García M., E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Tercera edición. Editorial Larios. México, D.F.
- González Q., L. 1968. Tipos de vegetación del Valle de Mezquital, Hgo., México. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D.F.
- Martín C., D. y B. Gómez V. 1991. Breve historia del grupo Hñahñu. Academia de la Cultura Hñahñu. Gobierno del Estado de Hidalgo. Internado de los Remedios. Ixmiquilpan, Hidalgo, México.
- Medina A. y Quezada, N. 1975. Panorama de las artesanías otomíes del valle del Mezquital. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Nazarea, V. 1998. Ethnoecology: Situated knowledge/located lives. University of Arizona Press. Tucson, AZ.
- Segerstrom, K. 1962. Geology of the south central Hidalgo and northeastern Mexico, Mexico. *US Geol. Survey Bull.* 1104-C: 87-162.
- Wolf, E. 1972. Pueblos y culturas de Mesoamérica. Segunda edición en español. Ediciones Era. México, D.F.

RADIODIFUSIÓN: UN MEDIO PARA IMPULSAR EL DESARROLLO RURAL EN MÉXICO

The Radio: A Means to Promote Rural Development in Mexico

Guillermo Galindo-González¹

RESUMEN

La radio es uno de los medios de comunicación masiva más empleados entre los habitantes, ya que existe en la mayoría de los hogares en México, y la hay de corriente eléctrica y de baterías; además, existen 1142 estaciones radiofónicas que cubren el territorio nacional. En el proceso de adopción de innovaciones, la radio juega un papel importante en las etapas de conocimiento e interés, y favorece una adopción más rápida de las innovaciones que otros medios. Entre las principales ventajas que presenta la radio destacan: no requiere que los receptores sepan leer, se recibe el mensaje en el momento en que se difunde, presenta amplia cobertura, el costo del aparato es bajo, los hay portátiles, la transmisión de mensajes es sencilla y la producción radiofónica requiere de bajo costo. Por ello, es conveniente impulsar el uso de la radio como medio para difundir información que impulse el desarrollo rural.

Palabras clave: Medio rural, transferencia de tecnología.

SUMMARY

Radio is one of the most widely used media of mass communication among rural inhabitants. There is at least one receptor (electric or battery) operating in most rural homes, and there are 1142 radio stations covering the national territory. Within the process of innovation, radio programs play a very important role in disseminating knowledge and interest, and promote faster adoption of new technology than other means. Among the outstanding advantages of radio are the following: listeners are not required to read, the

¹ Campo Experimental Calera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 18, 98500 Calera de Victor Rosales, Zacatecas, México. (galindogg_mx@yahoo.com.mx)

Recibido: Septiembre de 2002. Aceptado: Septiembre de 2003.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 22: 127-132.

message is received as it is broadcasted, there is broad coverage, the cost of a radio is low, many are portable, transmission is simple, and radio production has low costs. Thus, it is convenient to encourage radio broadcasting as a means of providing information for promoting rural development.

Index words: Broadcasting, rural area, transference of technology.

INTRODUCCIÓN

En México, se cuenta con una población activa de 32.3 millones de personas, de las cuales 24.6% se emplean en actividades agropecuarias y 5.85% corresponden a personas y jornaleros en extrema pobreza en el campo, ya que la mayoría de ellos no cuenta con tierras propias (Casco, 1999).

En la actualidad, México es un importador de productos agrícolas, apícolas, pecuarios y silvícolas; como ejemplo, durante el primer semestre de 2001 se importaron 2350 millones de dólares de estos productos, con el consecuente déficit en la balanza comercial alimentaria (Banco Nacional de Comercio Exterior-Sociedad Nacional de Crédito, 2001). Para lograr un desarrollo sustentable en el campo, es urgente superar la crisis de las desigualdades sociales, la marginación, la extrema pobreza, así como difundir nuevas tecnologías que permitan incrementar la productividad y preservar el medio ambiente.

En México, la radio es uno de los medios de comunicación más importantes, ya que existen 1142 estaciones radiofónicas y aproximadamente 21.5 millones de aparatos receptores en uso. A pesar de la importancia que representa este medio para transmitir información enfocada al desarrollo rural, es poco utilizado.

En este artículo, se presenta un marco de referencia sobre la radio como medio de difusión y se plantea una propuesta para su uso como estrategia para el desarrollo rural.

ANTECEDENTES

Comunicación

Según Wright (1978), la comunicación es el proceso por medio del cual se transmiten significados de una persona a otra; según Iglesias (1981), es la relación interpersonal con intercambio dialogado de mensajes, y no sólo la emisión o transmisión, sino el conjunto de condiciones que hacen posible el fenómeno comunicativo. Por su parte, Galindo *et al.* (2001) consideraron que un cambio de lo tradicional a lo moderno implica la comunicación y la adopción de innovaciones.

La comunicación rural consiste en la relación que, por intereses comunes, cohesiona a poblaciones que tienen como hábitat el campo (Borras, 1982); en el caso de la difusión de innovaciones agrícolas, la comunicación tiene como propósito hacer que los productores conozcan alternativas para realizar sus operaciones agrícolas (Mendoza, 1992).

Los medios masivos de comunicación requieren de una organización formal, se dirigen a un público amplio, sus contenidos son abiertos a todos, sus receptores son heterogéneos, tienen alcance simultáneo, la relación entre emisor y público es impersonal, y el público es un conglomerado de individuos a los que une un foco común de intereses, pero no se conocen entre sí (Romo, 1987). En el proceso de adopción de innovaciones, los medios masivos juegan un papel importante, al enterar a los productores de la existencia de nuevas tecnologías (Slocum, 1964; Rogers y Shoemaker, 1974).

Gutiérrez (1989) afirmó que los medios que prefieren los agricultores del estado de Durango, para que se les haga llegar información agrícola, son: publicaciones (22.6%), radio (20.1%), carta (19.2%) y personalmente (9.3%). González (1985) también mencionó que entre los medios preferidos por los productores agropecuarios para recibir información destaca la radio, y que su uso se asocia con la baja escolaridad de los receptores.

Entre los factores que influyen en el uso de medios masivos de comunicación, Galindo (1995, 1996a, 2001) determinó: uso de innovaciones, relación con agentes de cambio, contacto con dependencias del sector agropecuario, cosmopolitismo, edad (en forma negativa) y empatía.

Radiodifusión

La radiodifusión se define como un medio de comunicación a distancia que, por vía hertziana emite mensajes a una audiencia numerosa, disgregada y heterogénea (Cebrián, 1981).

En 1919, se instaló en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, la primera estación experimental y en 1921 se inauguró la emisora XEH (UAM, 1989). En 1923, surgieron emisoras como la CYL "El Universal Lustrado" y la CYB, de la Compañía Cigarrera "El Buen Tono"; después, en 1930, se instaló la XEW "La Voz de América Latina" (Horta, 1986), a la cual le siguieron otras emisoras; éstas se integraron a la cadena XEW y a la NBC (National Broadcasting Corporation). En 1952, se instaló la XHFM, primera estación de frecuencia modulada (FM) y dos años después la XEOY, primera radiodifusora que transmitió en sistema radiofónico.

En 1977, en México operaban 729 radiodifusoras, de las cuales 33 eran culturales y 696 comerciales; de éstas, 574 correspondían a la amplitud modulada (AM); en el mismo año, existían ocho millones de radio hogares, dos millones de radios en automóviles, otros dos millones de receptores portátiles, de manera que el auditorio era de más de 50 millones de mexicanos (Llano y Morales, 1984); para 1996, el número de radioescuchas se incrementó a más de 84 millones (Horta, 1986).

La proporción de radiodifusoras comerciales asciende a 88.7%, cifra elevada en comparación con 11.3% que corresponde a las consideradas oficiales, culturales, experimentales, de escuelas radiofónicas o de organismos públicos.

De acuerdo con la Ley Federal de Radio y Televisión en México (actualizada el 29 de junio de 2001), las Secretarías y Departamentos de Estado, los Gobiernos de los Estados, los Ayuntamientos y los organismos públicos promoverán la transmisión de programas de divulgación con fines de orientación social, cultural y cívica.

La Radio como Medio de Difusión

Sin duda, la radio es el medio de comunicación más extraordinario del siglo XX. Arnheim (1980) afirmó que las características técnicas de la radio giran en torno únicamente del sonido.

A partir de la televisión, la radio se ha orientado hacia las necesidades individuales de las personas a distintas horas del día, hecho que va de la mano con la

gran cantidad de aparatos receptores en dormitorios, cuartos de baño, cocinas, automóviles y, en la actualidad, en el bolsillo (McLuham, 1977). Según Cohen (1992), los adultos emplean más tiempo en escuchar radio que en exponerse a cualquier otro medio de comunicación.

Entre las ventajas que presenta la radio como medio de difusión, Wilson y Gallup (1964), SARH (1978), Cohen (1992), Galindo (1993), Galindo *et al.* (1997) y FAO (1998) destacaron: a) llega a muchas personas al mismo tiempo; b) el mensaje lo recibe el oyente en el momento en que se emite; c) ofrece amplia cobertura; d) el costo del aparato receptor es bajo y puede ser portátil; e) el costo de la producción radiofónica es bajo y sencilla su elaboración; f) existen emisoras locales que facilitan la difusión de determinados programas; g) es un excelente medio para motivar hacia nuevas ideas y técnicas; h) pueden introducirse cambios rápidos en los programas y textos de los anuncios; i) se adapta para dar informes de emergencias; j) llega a personas que leen poco o que no leen; k) despierta interés por otros medios y ofrece la mejor complementación en una mezcla de medios; l) forma un auditorio importante de radioescuchas habituales; m) no se requiere destreza especial para su interpretación; n) no requiere de toda la atención; ñ) propicia la captación de conceptos; o) es un medio que entretiene; p) crea un ambiente de participación con el que habla; q) un mensaje puede repetirse varias veces.

Sobre las desventajas de la radio, Gil (1987), Cohen (1992), Galindo (1993) y Galindo *et al.* (1997) indicaron que: a) sólo transmite mensajes auditivos; b) por lo regular, se hace otra cosa mientras se escucha radio; c) los mensajes que se transmiten son de índole fugaz, por lo que se tiene que ser reiterativo; d) llega a un público extenso y hasta cierto punto desconocido; e) es sugestivo, ya que se lanza el mensaje y el radioescucha hecha a volar su imaginación; f) puede producir fatiga, ya que la gente se cansa de sólo escuchar; g) tiende a distraer; h) el emisor envía su mensaje sin dar oportunidad de respuesta al receptor; i) existen variaciones físicas incontrolables, debido, principalmente, a fallas de corriente eléctrica, averías en los equipos de transmisión y aparatos receptores poco eficientes, etc; j) es difícil transmitir por radio una idea complicada; k) el que escucha no puede controlar la velocidad de transmisión, ni pedir que repitan algo; y l) el locutor tiene que imaginar la composición de su auditorio.

La Radio en el Medio Rural

Sobre el uso de la radio en el medio rural con fines educativos, han destacado, por su importancia, los programas del Sistema Educativo Radiofónico de México (SERM, 1964); también sobresalen los programas transmitidos por la Secretaría de la Reforma Agraria, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, el Plan Puebla, el Plan Zacapoaxtla, la Comisión del Río Papaloapan y el Instituto Nacional Indigenista, que en 1980 contaba con nueve estaciones que atendían a 20 grupos étnicos (INI, 1989).

En la Región Central de Veracruz, Sosa (1979) determinó que 97% de los agricultores contaban con radio recepto, y que 83.3% lo escuchaban a diario entre 6:00 y 8:00 h a.m., lo cual coincide con lo que determinaron Naranjo *et al.* (1978) y Gutiérrez (1989), y que los días que más se exponen a la radio son los domingos y lunes, además de que todos los ejidatarios tenían el deseo de escuchar un programa agrícola radiofónico. Posteriormente, en Durango, Gutiérrez (1989) concluyó que 88.4% de los productores se exponen a la radio, lo cual está de acuerdo con lo que encontraron Galindo *et al.* (2000), 74.4% de los ejidatarios se exponen diariamente a este medio y 66.3% de los propietarios; los programas preferidos en radio principalmente son noticias, programas agrícolas y novelas. En 1992, en Oaxaca se determinó que 96.3% de los habitantes escuchaban la radio por las mañanas, tardes y noches, con mayor frecuencia en sus casas y en compañía de sus familias; la radio se integra a diferentes escenarios cotidianos y la mayoría de los radioescuchas poseen radios de baterías o electricidad (CONAPO, 1992).

Al evaluar el uso de los medios de información en Tabasco, Galindo (1995) concluyó que todos los productores escuchaban la radio. Un año después, en Zacatecas, el mismo autor (Galindo, 1996b) encontró que 92.4% de los agricultores tenían radio y deseaban escuchar un programa radiofónico con información agropecuaria. El mayor porcentaje lo escuchaba a diario de 40 a 60 min. El horario preferido para escuchar la radio era entre 6:00 y 10:00 h y entre 14:00 y 18:00 h; 63% lo escuchaban a diario, 32.2% de los productores se habían expuesto al programa agropecuario "Amanecer en el Campo" y 56.6% escuchaban la radio en su hogar. Los días preferidos para escuchar un programa radiofónico con temas

agropecuarios fueron los viernes, sábados y domingos; además, éstos podían transmitirse semanalmente, cada tercer día o a diario, y su duración debía ser entre 30 y 60 min.

En Jalisco, se encontró que los productores agrícolas escuchaban la radio entre las 6:00 y 12:00 h del día y que les gustaría que se transmitiera un programa agropecuario los sábados y domingos de cada semana, a partir de las 7:00 h a.m (Nava *et al.* 1999).

Emisión Radiofónica

La emisión radiofónica es un complejo sonoro que se construye mediante un juego sutil de relaciones, la palabra, la música y el ruido. Éstos pueden encontrarse aislados, pero no existe una emisión específicamente radiofónica, sino que nace de la combinación de estos tres elementos. De acuerdo con el objetivo que persigan, los programas enfocados al medio rural pueden ser informativos, promocionales y didácticos. Otra forma de transmitir mensajes por radio es mediante el denominado "spot", que es un enunciado corto que dura de 10 a 60 segundos.

CONCLUSIONES

- De acuerdo con la amplia cobertura de las radiodifusoras en el territorio nacional y con la amplia exposición que tienen los habitantes del medio rural a la radiodifusión, debe fortalecerse su uso para difundir información que impulse el desarrollo rural.
- El uso de la radio en el medio rural puede implementarse por medio de programas, o bien, por la transmisión de "spots"; el contenido de éstos podrá ser informativo, promocional o didáctico.
- Se debe combinar el uso de la radio con el de otros medios de comunicación.

RECOMENDACIONES

- Para transmitir los mensajes radiofónicos, deben usarse principalmente radiodifusoras locales, ya que los radioescuchas se identifican más con éstas.
- Antes de iniciar la transmisión de un programa radiofónico (o de un "spot"), es necesario efectuar un estudio preliminar entre los destinatarios para determinar el día y la hora más oportuna, la estación más escuchada, los temas que resulten de interés, la duración más adecuada, su periodicidad, el tipo de

programa preferido y el vocabulario común empleado en el área de influencia de la radiodifusora.

- Debe evaluarse el programa en forma periódica, para adecuarlo en cuanto a su contenido, horario, duración y otros.
- Para que la transmisión de un programa radiofónico tenga éxito, es necesario darle publicidad por medio de altavoces, carteles, cartas circulares, inserciones en radio, diarios locales, etc.
- Al transmitir los mensajes por radio, debe utilizarse el lenguaje común.
- Para la transmisión de un programa radiofónico dirigido al medio rural, es necesario escribir un guión, tomando en cuenta las siguientes sugerencias: a) se debe escribir por un solo lado, en papel blanco tamaño carta y a doble espacio; b) en el lado izquierdo de la hoja, se colocan con letras mayúsculas los indicadores de entrada y salida de los locutores, así como las acciones que deberá seguir el operador (insertar música o sonido); c) en el lado derecho, se escribe con letras mayúsculas y minúsculas el texto que será transmitido; d) las hojas se deben numerar progresivamente; e) se deben colocar los segundos que dure la rúbrica, así como el nombre de la canción o del sonido; f) no deben separarse las palabras cuando termine un renglón o una oración al final de una hoja; g) se debe escribir para que todos entiendan; h) no se deben escribir abreviaturas ni símbolos; i) no conviene tratar varios temas en un programa (o "spot"); y j) éste se debe desarrollar en forma sencilla y amena.
- Para la producción de un programa radiofónico, es necesario: a) procurar la participación activa de los radioescuchas; b) difundir información variada que responda a las necesidades de los habitantes del medio rural; c) considerar que los mensajes que se difundan deben ser oportunos y concretos; y d) incluir entrevistas con personas innovadoras, autoridades locales, personas o instituciones relacionadas con el desarrollo rural, principalmente, con los mismos radioescuchas.
- Durante la emisión radiofónica es conveniente: a) verificar que el micrófono esté fijo sobre el soporte, colocado sobre un cojín o manta; b) hacer pruebas para colocar el micrófono a la distancia adecuada de la boca del narrador y hablar siempre frente al micrófono a la misma distancia; c) realizar pruebas de tono y volumen para cada voz participante en la transmisión del programa; d) desconectar equipos de aire acondicionado o cualquier otro aparato que

produzca algún ruido; e) que la voz sea articulada, armoniosa, con modulaciones apropiadas, ritmo conveniente, pausas oportunas y con énfasis para destacar ciertas palabras; f) mantener un ritmo normal de respiración, para evitar cortes indebidos de frases o aspiraciones mientras se hable; g) evitar carraspeos, toses y estornudos; y h) colocar el guión sobre un atril o sujetarlo bien con las manos.

- Antes de la transmisión, se sugiere: a) ensayar siempre con voz alta, ya que nunca existe garantía en lo que se improvisa; b) utilizar la grabadora cuando se tengan que incluir partes no preparadas, en especial entrevistas; c) grabar el programa siempre que se pueda y turnarlo oportunamente a la radiodifusora; y d) escuchar y evaluar su propia transmisión.

AGRADECIMIENTO

Este artículo forma parte del proyecto titulado: "Estrategia de difusión de tecnología para incrementar la producción de chile en Zacatecas" (Clave: 20000401015), el cual es financiado por el Sistema Regional de Investigación Francisco Villa, el Patronato para la Investigación Agropecuaria y Forestal del Estado de Zacatecas, A.C. y el Fondo Nacional de Apoyo para las Empresas de Solidaridad, dependiente de la Secretaría de Desarrollo Económico.

LITERATURA CITADA

- Arnheim, R. 1980. *Estética radiofónica*. Trad. al español por M. Figueras Blanch. Gustavo Gili. Barcelona, España.
- Banco Nacional de Comercio Exterior-Sociedad Nacional de Crédito. 2001. *Sumario Estadístico*. Comercio Exterior 51: 1031-1039.
- Borras S., L. 1982. *Comunicación rural: Teoría y práctica* (Cuaderno 1). pp: 11-13. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Casco F., J. 1999. La estrategia de modernización del sector agrícola de México. *Comercio Exterior* 49: 362-372.
- Cebrián, M. 1981. *Diccionario de radio y televisión*. Alambra. Madrid, España.
- Cohen, D. 1992. *Advertising*. John Wiley. New York.
- CONAPO. Consejo Nacional de Población. 1992. *Recepción radiofónica en Oaxaca*. México, D.F.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. 1998. *Directrices sobre la comunicación para el desarrollo rural: Guía para los responsables del desarrollo y la formulación de proyectos*. Roma, Italia.
- Galindo G., G. 1993. El guión radiofónico y su transmisión. Tema Didáctico 3. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Zacatecas, México.
- Galindo G., G. 1995. Uso de medios de comunicación por los productores de cacao. *Terra* 13: 191-202.
- Galindo G., G. 1996a. Exposición de los productores agrícolas de seis municipios de Zacatecas a programas de radio. *Fitotecnia Mexicana* 19: 21-30.
- Galindo G., G. 1996b. Canales de comunicación de los productores agropecuarios del Centro de Zacatecas. *Ciencia* 47: 371-379.
- Galindo G., G. 2001. Uso de innovaciones en el grupo de ganaderos para la validación y transferencia de tecnología "Joachín", Veracruz, México. *Terra* 19: 385-392.
- Galindo G., G., J. Juárez C. y J. García. 1997. *Comunicación rural. Manual 4*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Instituto Nacional de Capacitación del Sector Agropecuario. México, D.F.
- Galindo G., G., W.C. Tabares R. y G. Gómez A. 2000. Caracterización de productores agrícolas de seis distritos de desarrollo rural de Zacatecas. *Terra* 18: 83-92.
- Galindo G., G., H. Pérez T., C. Mendiola L. y A. Robles M. 2001. Estrategia de comunicación en el medio rural zacatecano para transferir innovaciones agrícolas. *Terra* 19: 393-398.
- Gil R., C. 1987. *Introducción al conocimiento y práctica de la radio*. Diana Técnico. México, D.F.
- González R., A. 1985. Alcance del programa de televisión en temas agrícolas "La hora del CIANO", entre ejidatarios del sur de Sonora. pp. 173-177. *In: Experiencias metodológicas de la difusión de tecnología en el INIA*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. México, D.F.
- Gutiérrez G., R. 1989. Los medios de comunicación, su uso y preferencia por agricultores de Durango. Folleto Misceláneo 1. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Durango, México.
- Horta, R. 1986. *Diálogos del hombre: Un análisis histórico y crítico de la comunicación humana*. Comisión Nacional de Derechos Humanos. México, D.F.
- Iglesias, S. 1981. *Crítica de la comunicación social*. Tiempo y Obra. México, D.F.
- INI. Instituto Nacional Indigenista. 1989. *La radio indígena en perfiles del cuadrante*. Trillas. México, D.F.
- Llano P., S. y H. Morales A. 1984. *La radiodifusión en México. Comunicación, Tecnología e Investigación*. México, D.F.
- McLuham, M. 1977. *Understanding media: The extensions of man*. McGraw-Hill. New York.
- Mendoza M., S. 1992. La comunicación de innovaciones tecnológicas a receptores campesinos. p. 129. *In: Transferencia de tecnología pecuaria*. Facultad de Medicina, Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Naranjo C., F., M. Grijalva M. y N. Trufino L. 1978. Los medios de comunicación y la difusión de tecnología en el sector rural ecuatoriano. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Quito, Ecuador.
- Nava V., L., Z. Talavera E., H. Delgado M. y C. Chávez J. 1999. Caracterización de productores de cultivos básicos en Jalisco; ciclo P/V 1997. Folleto Científico 6. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Guadalajara, Jalisco, México.

- Rogers, E. y F. Shoemaker. 1974. *Communication of innovations a cross-cultural approach*. MacMillan. New York. pp: 250-253.
- Romo G., C. 1987. *Introducción al conocimiento y práctica de la radio*. Diana Técnico. México, D.F.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1978. *Haga extensión por radio*. Saltillo, Coahuila, México.
- SERM. Sistema Educativo Radiofónico de México. 1964. *Las escuelas radiofónicas de Huayacocotla, Veracruz*. México, D.F.
- Slocum, L.W. 1964. *Sociología agrícola: Estudio de los aspectos sociológicos de la vida en las granjas de los Estados Unidos*. Hispano América. México, D.F.
- Sosa M., Y. 1979. *La radiodifusión y los ejidatarios de la zona central del estado de Veracruz, México*. Folleto de Investigación 59. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. México, D.F.
- UAM. Universidad Autónoma Metropolitana. 1989. *Las ondas dormidas: Crónica hidalguense de una pasión radiofónica*. México, D.F.
- Wilson, C. y G. Gallup. 1964. *Métodos de enseñanza en extensión y otros factores que influyen en la adopción de prácticas agrícolas y de economía del hogar*. Centro Regional de Ayuda Técnica. México, D.F.
- Wright, C.R. 1978. *Comunicación de masas*. Trad. al español por R. Ferrario. Omega. Buenos Aires, Argentina.

RESEÑA DE LIBROS

CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS TRAS EL VERTIDO TÓXICO DE AZNALCÓLLAR

La explotación de los recursos minerales, en especial cuando se realiza a cielo abierto, origina diversos impactos sobre el medio natural. Las actividades mineras de sulfuros metálicos ejercen gran influencia sobre la contaminación de los suelos, tanto directamente, debido a las excavaciones y a la creación de escombreras y balsas con los residuos de la extracción, como, indirectamente, provocada por lavados laterales superficiales y subsuperficiales de aguas cargadas de sustancias tóxicas que se desplazan por los cauces hidrográficos y áreas colindantes.

El yacimiento de Aznalcóllar (Sevilla, España) forma parte del grupo de mineralizaciones de la Faja Pirítica Ibérica y está constituido por un conjunto de sulfuros, entre los que predomina piritita con más de 80% de la composición mineralógica total. La rotura de la balsa de acumulación de estériles de dicho yacimiento, en la madrugada del día 25 de abril de 1998, produjo una avalancha de lodos residuales y aguas ácidas a lo largo de 60 kilómetros en los lechos de inundación de los ríos Agrio y Guadiamar. La magnitud de este accidente se incrementó porque ocurrió en las proximidades del Parque Nacional de Doñana, declarado por la UNESCO, en 1981, Reserva de la Biosfera, al que afectó levemente de forma directa.

En esta obra se describe detalladamente las características ambientales del área afectada, las actuaciones inmediatas al accidente y las consecuencias del desastre en las aguas, suelos, aire, vegetación y fauna. Se hace especial énfasis en la contaminación producida en los suelos, la retirada de los lodos y las medidas de recuperación. Los autores describen minuciosamente los procesos de movilización/inmovilización de los contaminantes en los suelos y estudian con gran atención los efectos provocados por arsénico, plomo y talio y su remediación, dedicándole también un capítulo a los producidos por el cobre, zinc y cadmio en los suelos afectados por el vertido. Finalmente, se incluyen las medidas adoptadas por la administración pública y que corresponden con una línea de actuación a largo plazo.

Los autores, coordinados por el Prof. Dr. Aguilar Ruiz, pertenecientes al Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada, constituyen un magnífico equipo de investigadores a nivel nacional e internacional en el campo de la ciencia y tecnología de suelos. Con el gran rigor que han efectuado este estudio nos ha dado, una vez más, ejemplo de ello.

La calidad del trabajo realizado y la importancia de los problemas que aborda harán de esta obra un nuevo referente en el estudio de la contaminación y recuperación de suelos para todos aquellos que, de una forma u otra, desarrollan su actividad profesional en el Medio Ambiente.

Roque Ortiz Silla
Catedrático de Edafología

Revisores de este número
Reviewers of this number

Acevedo Sandoval, Otilio Arturo	Pachuca, Hidalgo, México
Alcántar González, Gabriel	Montecillo, estado de México
Buschiazzo, Daniel E.	Santa Rosa, Argentina
Cortés, Héctor	Jiutepec, Morelos, México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
Curti Díaz, Sergio A.	Martínez de la Torre, Veracruz, México
Escalante Estrada, J. Alberto	Montecillo, estado de México
Espinosa Espinosa, Honorio	Chapingo, estado de México
Fernández Ordóñez, Yolanda	Montecillo, estado de México
Flores Román, David	México, D.F.
García Pérez, Rafael	Chapingo, estado de México
Gómez Cruz, Guadalupe	Chapingo, estado de México
González Barrios, José L.	Ciudad Lerdo, Durango, México
González Eguiarte, Diego R.	Zapopan, Jalisco, México
González Hernández, Víctor A.	Montecillo, estado de México
Hidalgo Moreno, Claudia	Montecillo, estado de México
Islas Gutiérrez, Fabián	Chapingo, estado de México
Martínez, Gloria C.	Corrientes, Argentina
Narro Fariás, Eduardo	Saltillo, Coahuila, México
Orona Castillo, Ignacio	Ciudad Lerdo, Durango, México
Ortiz Solorio, Carlos A.	Montecillo, estado de México
Ramírez Ayala, Carlos	Montecillo, estado de México
Rodríguez Mendoza, Ma. Nieves	Montecillo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México
Solleiro Rebolledo, Elizabeth	México, D.F.
Tijerina Chávez, Leonardo	Montecillo, estado de México
Valdéz Torres, Luis Carlos	Almería, España
Zermeño González, Héctor	Gómez Palacio, Durango, México

Editores Técnicos de este número
Technical Editors of this number

Acevedo Sandoval, Otilio Arturo	Pachuca, Hidalgo, México
Almaguer Vargas, Gustavo	Chapingo, estado de México
Alvarado López, Jorge	Montecillo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
Fariás Larios, Javier	Colima, Colima, México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
Narro Fariás, Eduardo	Saltillo, Coahuila, México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México



TERRA *Latinoamericana*

FORMATO PARA LA SUSCRIPCIÓN ELECTRÓNICA A LA REVISTA TERRA *Latinoamericana*

Para el envío de todos los números de un año (a partir de 2003), el costo de suscripción electrónica es de \$200.00 pesos.

Envíe su solicitud con los siguientes datos:

Nombre: _____

Empresa: _____

Dirección: _____

Colonia: _____ Código Postal: _____

Ciudad: _____ Estado: _____

País: _____ e-mail¹: _____

Teléfono: _____ Fax: _____

¹ A esta dirección le enviaremos su pedido.

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