

ISSN 0187-5779

TERRA

ENERO - MARZO DE 2003 • VOLUMEN 21 • NUMERO 1



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

TERRA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 2003-2005

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

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

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 registro en trámite.
Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Enero - Marzo de 2003 Volumen 21 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 a:
Editor de la Revista TERRA. 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

EDITOR
EDITOR ADJUNTO
EDITORES TECNICOS

Dr. Antonio Vázquez Alarcón
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dr. Xavier X. Uvalle Bueno
Dra. Edna Alvarez Sánchez
Dr. Mateo Vargas Hernández
Dra. Carmen Gutiérrez Castorena
Dr. David Espinosa Victoria
M.C. Jorge Alvarado López
M.C. Langen Corlay Chee
Ina Aalmers de Aguilar
Diane Fumiko Miyoshi Udo

EDITORES DE ESTILO

EDITORA DE ESTILO
EN INGLES

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

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

Diseño de portada

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Jesús Caballero Mellado
Dr. Lenom J. Cajuste
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

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

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

TERRA

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. Cristina Siebe Grabach
M.C. Jesús P. Amado Alvarez
Dr. Juan Pedro Flores Marges
Dra. Claudia Hidalgo Moreno
Dr. David Cristobal Acevedo

EDITOR
ASSOCIATE EDITOR
TECHNICAL EDITORS

Dr. Antonio Vázquez Alarcón
Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dr. Xavier X. Uvalle Bueno
Dra. Edna Alvarez Sánchez
Dr. Mateo Vargas Hernández
Dra. Carmen Gutiérrez Castorena
Dr. David Espinosa Victoria
M.C. Jorge Alvarado López
M.C. Langen Corlay Chee
Ina Aalmers de Agullar
Diane Fumiko Miyoshi Udo

STYLE EDITORS

ENGLISH EDITOR

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

- Soil Genesis, Morphology and Classification
- Soil Physics
- Soil Chemistry
- Pollution

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

- Plant Nutrition
- Water - Soil - Plant - Atmosphere Relationship
- Soil Biology
- Technology and Fertilizer Use
- Water Management and Use

Division III: Use of the Soil Resource

- Soil Conservation
- Drainage and Restoration
- Soil Fertility
- Agrosystem Productivity

Division IV: Education and Technical Assistance

- Education
- Credit and Technical Assistance

TERRA Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
January - March, 2003 Volume 21 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, 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

EDITORIAL STAFF

Cover design

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

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Jesús Caballero Mellado
Dr. Lenom J. Cajuste
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

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Eduardo Besoain M.	Chile
Dr. Winfried E. H. Blum	Austria
Dr. Elmer 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. Paul Quantin	France
Dr. José Rodríguez	Chile
Dr. Karl Stahr	Germany
Dr. Bernardo Van Raij	Brazil
Dr. Rafael Villegas	Cuba
Dr. José Agullar Ruiz	España
Dr. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. Ramón A. Rossell	Argentina

TERRA

ENERO - MARZO DE 2003 • VOLUMEN 21 • NUMERO 1
JANUARY - MARCH, 2003 • VOLUME 21 • NUMBER 1

DIVISION I

- 1 Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos.
Micro-relief and soil color as diagnostic properties in carstic Leptosols.
Francisco Bautista-Zúñiga, Juan Jiménez-Osornio, Jorge Navarro-Alberto, Andrew Manu y Rufino Lozano
- 13 Determinación del estado de humedad para una mínima aplicación de energía en laboreo con tracción motriz.
Determination of the status of moisture content for a minimum energy application for tillage with mechanical traction.
Martín Cadena Zapata, Santos Campos Magaña, Eduardo Narro Farías y Tomás Gaytán Muñiz
- 21 Estudios de optimización de la oxidación crómica del carbono orgánico de los suelos.
Optimization studies of the chromic oxidation of soil organic carbon.
Arturo Aguirre Gómez, Frida María León Rodríguez y Armando Aguilar Márquez
- 31 Interacción Zn-Cd en el suelo y maíz.
Cd-Zn interaction in soil and corn plants.
R. Carrillo-González, J. Cruz-Díaz y L. J. Cajuste

DIVISION II

- 41 Crecimiento radical de nopal con diferentes dosis de nitrógeno en hidroponía.
Pickly pear root growth in response to nitrogen in hydroponics.
Rafael Zúñiga Tarango, José A. Cueto Wong, Emilio Olivares Sáenz y Enrique Salazar Sosa

- 47 Selección de portainjertos para naranja "Valencia" en suelos calcimórficos.
Rootstock selection for "Valencia" orange in calcimorphic soils.
Octavio Pérez Zamora, Salvador Becerra Rodríguez y Victor Medina Urrutia
- 57 Soluciones nutritivas diluidas para la producción de jitomate a un racimo.
Diluted nutrient solutions for single-truss tomato production.
Teodoro Gómez-Hernández y Felipe Sánchez-del Castillo
- 65 Comparación de métodos para estimar la fijación de N_2 en frijol en condiciones de campo.
Use of different indicators for measuring N_2 fixation in common bean under field conditions.
O.A. Grageda-Cabrera, J. A. Vera-Núñez, J. Z. Castellanos y J. J. Peña-Cabriales
- 73 Enzimas que participan en el proceso de vermicompostaje.
Enzymes participating in the vermicomposting process.
Roberto Quintero Lizaola, Ronald Ferrera-Cerrato, Jorge D. Etchevers Barra, Norma Eugenia García Calderón, Rodrigo Rodríguez Kabana, Gabriel Alcántar González y Andrés Aguilar Santelises †
- 81 Bacterias de vida libre fijadoras de nitrógeno atmosférico en rizósfera de frijol contaminada con queroseno.
Nitrogen-fixing free-living bacteria in bean rizosphere polluted with kerosene.
E. Hernández A., R. Ferrera-Cerrato y R. Rodríguez V.
- 91 Aplicación de fósforo e inoculación de hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento y estado nutricional de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq.
Phosphorus application and arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on growth and nutritional status of *Citrus volkameriana* Tan & Pasq.
Alejandro Alarcón y Ronald Ferrera-Cerrato

- 101** Fertilización nitrogenada y patrón de absorción nutrimental del apio en fertirriego.
Nitrogen fertilization and nutrient-uptake pattern of celery under fertirrigation.
P. Ramírez-Moreles, J. Z. Castellanos, P. Sánchez G., A. Galvis S., A. Martínez G. y L. Tijerina Ch.

DIVISION III

- 109** Impacto de la roturación y del manejo agronómico de un tepetate sobre su estructura.
Impact of mechanical fragmentation and agronomical management on the structure of tepetate.
Ch. Prat, V. Ordaz Ch. y J. A. Rugama U.
- 117** Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca "El Josefino", Jesús María, Jalisco.
Evaluation of soil degradation in El Josefino watershed, Jesús María, Jalisco.
Elibeth Torres Benites, José Cortés Becerra, Enrique Mejía Sáenz, Adolfo Exebio García, Ana Laura Santos Hernández y Ma. Eugenia Delgadillo Piñón
- 127** Optimización tecnológica simultánea para tres híbridos de maíz con precisión definida *a priori*.
Joint optimization of the response of three maize hybrids to several management practices under predefined precision.
A. Barrios-Ayala, A. Turrent-Fernández, A. Martínez-Garza, J. I. Cortés-Flores y C. A. Ortiz-Solorio

DIVISION IV

- 137** Situación socioeconómica de los productores de frijol de temporal en Zacatecas.
Socioeconomic situation of the seasonal bean producers in Zacatecas.
Héctor Pérez Trujillo y Guillermo Galindo González

MICRORELIEVE Y COLOR DEL SUELO COMO PROPIEDADES DE DIAGNÓSTICO EN LEPTOSOLES CÁRSTICOS

Micro-Relief and Soil Color as Diagnostic Properties in Carstic Leptosols

Francisco Bautista-Zúñiga¹, Juan Jiménez-Osornio¹, Jorge Navarro-Alberto¹,
Andrew Manu² y Rufino Lozano³

RESUMEN

Se describe el patrón altitudinal de los suelos de acuerdo con el microrelieve y se evalúa la importancia del color del suelo como propiedad distintiva y su relación con las propiedades químicas en Leptosoles de la zona henequenera de Yucatán, México. Se realizaron dos transectos a lo largo del microrelieve, las muestras se tomaron a intervalos de 1.5 m a dos profundidades: de 0 a 5 cm y de 5 a 10 cm. Se encontraron tres suelos de acuerdo con la nomenclatura maya: rojo (R), tipo *Haylu'um*; café rojizo (CR), *Chaclu'um*; y negro (NE), *Boxlu'um*. La materia orgánica (MO), Ca y P fueron las propiedades químicas relacionadas con el gradiente altitudinal y con el color del suelo. Los suelos R presentaron los valores menores de MO, Ca y P, seguidos de los CR y los NE que presentaron los valores más altos. Los suelos R contienen una mayor cantidad de minerales de tamaño menor que 2 μ , como cuarzo, hematita y halloysita que los NE, siendo los CR un intergrado. El contenido de óxidos totales también sigue la secuencia R > CR > NE. La posición microtopográfica y el color de suelo pueden utilizarse como propiedades distintivas relacionadas con las propiedades químicas y mineralógicas.

Palabras clave: *Propiedades distintivas, karst, levantamientos de suelo, nomenclatura maya.*

¹ FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán. km 15.5 Carretera Mérida-Xmatkuil, Mérida, Yucatán, México.

(bzuniga@tunku.uady.mx)

² Soil and Crop Sciences Department, Texas A & M University. College Station, TX.

³ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Recibido: Noviembre de 2000. Aceptado: Mayo de 2002.
Publicado en Terra 21: 1-11.

SUMMARY

In this study, the altitudinal distribution pattern is described and the importance of soil color as a distinctive property and its relationship to chemical properties were evaluated in Leptosols in the henequen zone in Yucatan, Mexico. Two altitudinal transects across the micro-topographic gradient were carried out, with samples taken at 1.5 m intervals. Soils were sampled at a depth of 0 to 5 cm and 5 to 10 cm. Three soil types were found covering three Mayan classes: red (R), *Haylu'um*; reddish brown (CR), *Chaclu'um*; and black (NE), *Boxlu'um*. Organic matter, Ca, and P were the chemical properties related to soil color and the altitudinal gradient pattern. The R soil had low organic matter, Ca, and P, intermediate values in CR, and NE showed higher values. The R soil contained more particles 2 μ or less in diameter of minerals such as hematite and halloysite than NE, and CR is an intermediate grade. The content of total oxides also follows the sequence R > CR > NE. Microtopographic position and soil color can be used as distinguishing properties related to the chemical and mineralogical properties.

Index words: *Distinctive properties, karst, soil survey, Mayan nomenclature.*

INTRODUCCIÓN

Los Leptosoles se encuentran distribuidos ampliamente a escala mundial y ocupan una superficie de 1655 millones de hectáreas (Spaargaren, 1994). En México, ocupan alrededor de 467 978 km², equivalentes a 23.96% de la superficie (INEGI, 1997). En el estado de Yucatán más de 80% de los suelos corresponden a la unidad Leptosol (Peniche, 1994).

Un rasgo distintivo de la fisiografía de la península de Yucatán es su extrema variación microtopográfica. Por la fisiografía, la zona de estudio se encuentra dentro de la planicie cárstica de Mérida, caracterizada

por la presencia de un relieve plano a ligeramente ondulado. Se presentan dolinas, valles ciegos y secos, y montículos de 1 a 2 m de altura y afloramientos rocosos. El material parental es una capa de roca calcárea muy dura de 1.5 m de espesor denominada localmente "Laja", sobre un banco de caliza no litificado de 15 m de espesor.

El escaso entendimiento de la heterogeneidad espacial en los Leptosoles en Yucatán, producto del microrelieve de las zonas cársticas, dificulta el establecimiento exitoso de prácticas agrícolas, forestales y pecuarias.

En la práctica cotidiana, la nomenclatura maya es la más utilizada por campesinos y técnicos, debido a que se aplica a pequeñas áreas, por lo que sirve para entender y manejar la heterogeneidad espacial; sin embargo, son escasos los reportes que describan con detalle las propiedades distintivas de los suelos, así como sus propiedades químicas relacionadas con su fertilidad. Al respecto, Duch (1992) mencionó que: "A pesar del uso generalizado de la nomenclatura maya, no existe suficiente evidencia respecto al conjunto de términos mayas que son utilizados para identificar distintos tipos de suelo, se encuentran organizados en un sistema de clasificación o si solo conforman un sistema de nomenclatura de carácter no jerárquico". Es posible que la falta de información escrita sobre los suelos se deba, precisamente, a la gran heterogeneidad que se presenta, como lo mencionaron Pool y Hernández (1987).

Los objetivos del presente trabajo fueron describir el patrón de distribución de los suelos someros en el microrelieve, identificar a las propiedades químicas distintivas de los suelos y explorar la importancia del color del suelo como propiedad distintiva, ya que es utilizada en la nomenclatura maya.

El entendimiento de la heterogeneidad del suelo (HES) ayudará a comprender muchos de los procesos ecológicos (Dutilleul, 1993; Casper y Cahill, 1996) y, en consecuencia, se podrían diseñar, con mayores probabilidades de éxito, opciones de manejo agrícola, forestal y pecuario.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se encuentra en la localidad denominada Xmatkuil, que pertenece al municipio de Mérida, en el estado de Yucatán, México. Se localiza a

20° 52' 3.86" N y 89° 37' 20.05" O, a una altitud de 10 m. El clima de la zona de estudio corresponde al tipo AW0(i)g, el más seco de los cálidos subhúmedos con lluvias en verano según Koeppen. La vegetación es de selva baja caducifolia.

El estudio se dividió en dos partes: la primera para estudiar las propiedades químicas del suelo a lo largo de dos transectos y la segunda para la caracterización química y mineral de los suelos agrupados por el color.

Transectos

Se realizaron diversos recorridos de campo en el municipio de Mérida en los que se observó la llanura ondulada y el patrón de cambio de los suelos en el microrelieve. Se seleccionó un sitio en el que se realizaron dos transectos de 27 m de largo cubriendo la parte superior del microrelieve, el piedemonte y la parte baja. El montículo presentaba una altura de 1.5 m con respecto a la parte baja (Figura 1). Cada 1.5 m, se tomaron las muestras de suelo a una profundidad de 0 a 5 cm y de 5 a 10 cm. Antes de la toma de muestra, la vegetación fue quemada para cultivar maíz. Los parámetros medidos fueron: pH (Lean, 1982), materia orgánica con dicromato de potasio (Nelson y Sommers, 1982), cationes intercambiables Ca, Mg, Na y K con acetato de amonio (Okalebo *et al.*, 1993); fósforo extractable, método Olsen y Tamu (Okalebo *et al.*, 1993); azufre (Tabatabai, 1982); nitratos (Keeney y Nelson, 1982); micronutrientes como Fe, Mn, Cu y Zn extraíbles con DPTA (Lindsay y Norvelly, 1978). Los análisis se realizaron en el Departamento de Suelos y Ciencias Agrícolas de la Universidad de Texas A & M, College Station, en EUA.

En cada transecto, con las propiedades químicas de los suelos, se realizó un análisis discriminante lineal con base en el conocimiento previo del color del suelo. El propósito de estos análisis fue conocer el porcentaje de suelos que se asignaron correctamente por color. Para ello, se utilizó el método de validación cruzada (Johnson y Wichern, 1991).

También se realizó un análisis discriminante canónico para identificar las propiedades químicas distintivas, es decir, las que permiten la formación de grupos de suelos por color. El análisis discriminante lineal del Transecto 2 de 5 a 10 cm de profundidad no se realizó, debido a que el número de unidades

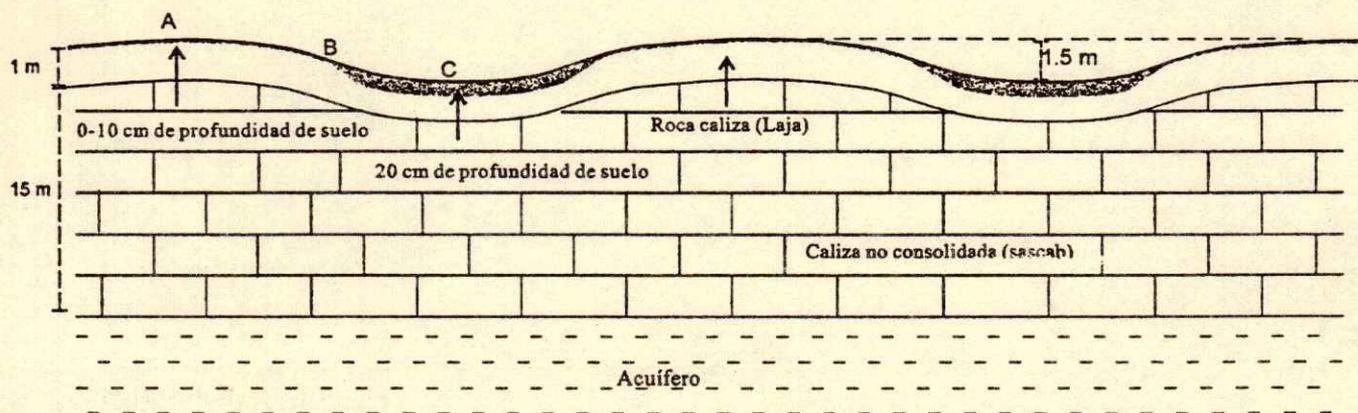


Figura 1. Localización de los suelos en el microrelieve. A = *Boxlu'um* (Negro); B = *Chaclu'um* (Café-rojizo); C = *Haylu'um* (Rojo).

muestrales en ese transecto era igual al número de propiedades medidas, lo cual no permitía la estimación correcta de la función discriminante.

Contenido Total de Elementos y Minerales por Color de Suelo

En muestras seleccionadas por color de suelo, se midió el contenido total de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO , K_2O , Na_2O y P_2O_5 por espectroscopía de fluorescencia de rayos X (FRX) con un espectrómetro secuencial Siemens SRS 3000 automatizado, con el fin de determinar e identificar los elementos que pudieran considerarse como distintivos de cada suelo, así como para mostrar las diferencias entre los suelos minerales y orgánicos.

Se identificaron los minerales de las partículas menores que 2μ mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) con un difractómetro Philips PW-1050, con el objeto de comparar los suelos de diferente color e identificar a los minerales predominantes. La variación en la medición de la posición angular fue de 0.005 nm. Se aplicó una modificación del método desarrollado por Biscaye (1965), se midió el área bajo la curva para el pico más intenso de la señal de cada mineral, con el fin de obtener una estimación de la cantidad relativa por muestra. Los análisis de FRX y de DRX se realizaron en el Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Los suelos se clasificaron según la base de referencia mundial del recurso suelo (BRMRS) (Spaargaren, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Elementos y su Relación con el Microrelieve

Los suelos de los montículos tienen los valores mayores de pH, MO, NO_3^- , K, S, Ca, Mg y Fe.

La MO presenta un patrón regular de distribución, los valores mayores se encuentran en las partes altas que corresponden con los suelos negros, disminuyen en el piedemonte en los suelos cafés y alcanzan las concentraciones menores en las partes correspondientes a suelos rojos (Figura 2).

En el suelo superficial, el contenido de S muestra un patrón de distribución parecido al de la MO ($r^2 = 0.52$) que mejora considerablemente a mayor profundidad ($r^2 = 0.84$). El Ca disminuye con la altitud microtopográfica, pero las muestras de mayor profundidad no presentan dicho patrón de distribución (Figura 3). En la superficie del suelo, la concentración de Ca sigue el patrón de distribución de la MO ($r^2 = 0.79$), pero disminuye considerablemente a una profundidad de 5 a 10 cm ($r^2 = 0.43$).

El Mg no presenta cambios aparentes a lo largo del transecto, pero las muestras de mayor profundidad se mantienen por debajo de las concentraciones superficiales (Cuadro 1).

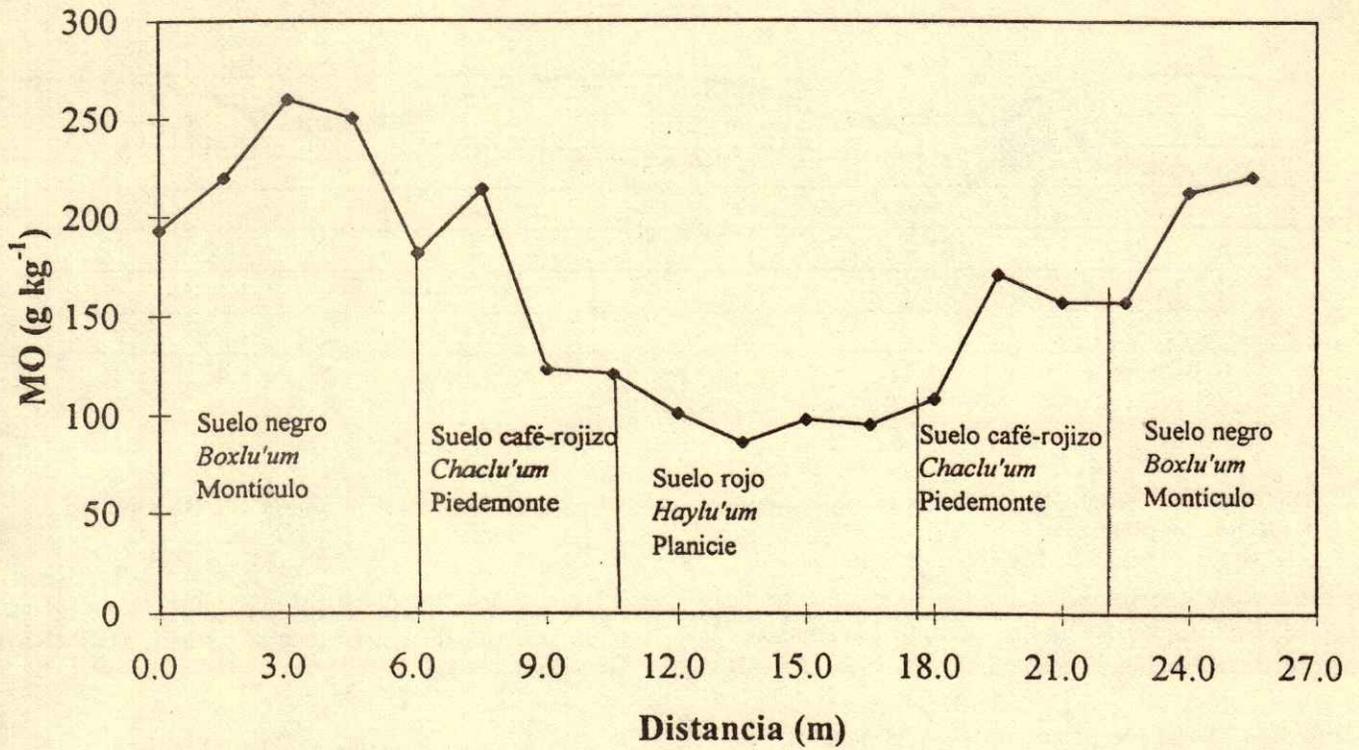


Figura 2. Materia orgánica en la superficie de Leptosoles a lo largo del transecto.

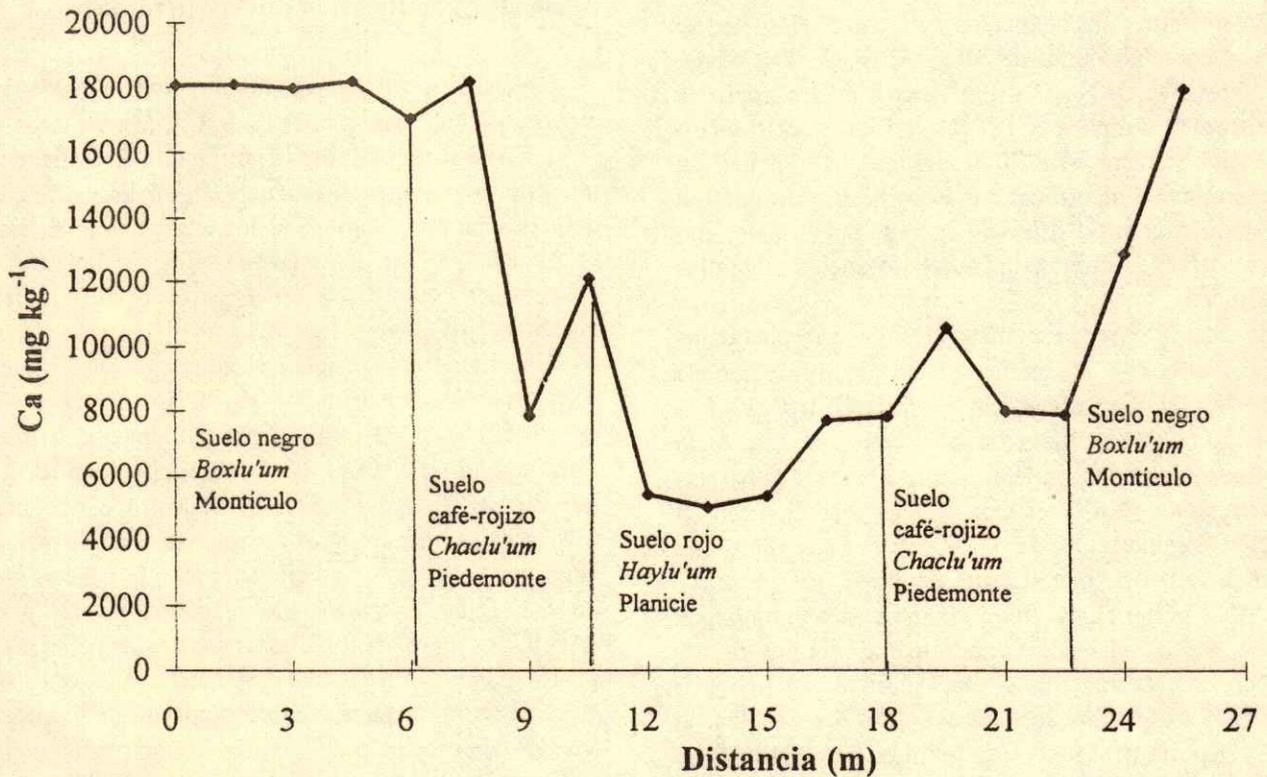


Figura 3. Calcio intercambiable en la superficie de Leptosoles a lo largo del transecto.

Cuadro 1. Propiedades químicas por color de suelo con quema reciente.

		pH	MO [†]	NO ₃ ⁻	P [‡]	P [§]	S	K	Na	Ca	Mg	Zn	Fe	Mn	Cu	
		g kg ⁻¹					Cationes intercambiables					Extraíbles con DPTA				
		g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					mg kg ⁻¹				
a) Transecto 1, profundidad de 0 a 5 cm																
Negro	X	7.8	226.0	57.5	45.8	99.5	271.2	497.7	33.0	17196.0	623.0	4.0	32.0	8.8	0.6	
<i>Boxlu'um</i>	s	0.2	25.0	18.9	48.3	84.2	121.9	153.6	9.1	2122.2	253.9	2.0	35.6	2.3	0.3	
Café-rojizo	X	7.4	159.0	61.3	21.9	36.3	106.8	619.9	28.3	11035.1	521.0	3.3	26.1	11.9	0.5	
<i>Chaclu'um</i>	s	0.4	36.0	15.1	29.6	49.4	58.3	145.6	11.0	4598.4	51.8	3.0	36.9	3.5	0.3	
Rojo	X	7.6	100.0	37.0	2.8	4.2	58.1	424.2	29.8	7106.6	438.8	1.6	3.9	11.5	0.3	
<i>Haylu'um</i>	s	0.2	13.0	6.6	0.6	1.8	26.7	43.7	10.3	2974.6	166.0	1.0	0.4	1.6	0.0	
b) Transecto 1, profundidad de 5 a 10 cm																
Negro	X	7.5	169.0	48.7	22.4	23.7	157.4	474.0	33.0	12156.0	459.0	1.6	51.2	12.0	0.8	
<i>Boxlu'um</i>	s	0.4	49.0	9.5	15.0	19.1	116.9	77.3	9.5	5366.0	93.6	1.1	38.2	5.1	0.3	
Café-rojizo	X	7.8	111.0	30.2	4.5	9.0	82.1	406.3	41.0	8011.2	384.7	1.0	12.5	8.9	0.4	
<i>Chaclu'um</i>	s	0.1	26.0	7.4	5.7	12.3	30.5	143.0	10.1	4665.5	169.6	1.0	19.7	1.7	0.1	
Rojo	X	7.6	80.0	25.4	1.5	2.2	43.7	226.6	39.8	5627.2	379.2	0.3	3.6	10.0	0.3	
<i>Haylu'um</i>	s	0.2	6.0	5.0	0.3	0.4	7.9	20.0	7.0	947.6	48.3	0.3	0.4	2.2	0.03	
c) Transecto 2, profundidad de 0 a 5 cm																
Negro	X	7.82	242.0	62.6	9.1	35.0	243.6	535.6	46.8	17701.4	627.8	1.9	9.3	12.6	0.5	
<i>Boxlu'um</i>	s	0.08	32.0	38.9	7.6	21.3	123.7	242.6	12.8	960.9	60.7	0.7	3.0	3.9	0.1	
Café-rojizo	X	7.73	129.0	43.6	5.2	10.6	83.3	583.0	43.6	9011.7	636.6	2.9	5.1	13.2	0.4	
<i>Chaclu'um</i>	s	0.22	13.0	10.8	2.2	6.2	21.4	165.2	15.6	2153.5	70.0	0.9	0.7	1.8	0.1	
Rojo	X	7.78	99.0	28.6	2.4	4.6	69.5	497.4	81.0	7825.2	651.2	7.3	4.0	10.9	0.4	
<i>Haylu'um</i>	s	0.13	16.0	4.4	0.9	1.9	14.1	100.4	24.7	1198.9	104.1	10.0	0.4	2.3	0.1	
d) Transecto 2 profundidad de 5 a 10 cm																
Negro	X	7.7	127.0	43.0	4.8	6.0	99.7	612.0	51.0	10632	536.0	1.0	5.0	9.9	0.4	
<i>Boxlu'um</i>																
Café-rojizo	X	7.8	100.0	29.8	2.4	3.3	73.0	320.8	103.7	8014	488.2	0.7	4.2	9.6	0.4	
<i>Chaclu'um</i>	s	0.1	15.0	6.7	0.6	1.6	13.4	145.1	49.2	1567	74.6	0.6	0.3	1.4	0.0	
Rojo	X	7.7	76.0	16.0	1.6	1.6	51.0	243.8	73.2	6306	543.6	1.1	3.7	10.3	0.4	
<i>Haylu'um</i>	s	0.2	15.0	2.7	0.9	0.9	15.3	100.8	26.8	1207	95.4	0.8	0.4	2.0	0.1	

[†] MO = materia orgánica. [‡] Olsen, [§] Tamu. X = promedio; s = desviación estándar.

Las diferencias entre el contenido de P a diferentes profundidades sólo son relevantes en los extremos del transecto; en las partes bajas del microrelieve la diferencia es mínima. El contenido de Fe muestra un patrón de distribución parecido al del P ($r^2 = 0.84$).

El K presenta mayores diferencias entre profundidad en las partes bajas. En la profundidad de 5 a 10 cm se presenta el patrón de distribución esperado, disminución de la concentración en las partes bajas y aumento en las altas (Cuadro 1).

El Zn presenta concentraciones menores en las muestras de mayor profundidad (Cuadro 1).

La MO y el Fe tienen relación entre sus dos profundidades y presentan valores de r^2 de 0.72 y 0.68, respectivamente. Los elementos constituyentes de la MO presentan un claro patrón de distribución y alcanzan los máximos valores en las partes altas del microrelieve y los menores valores en las partes bajas.

Al igual que en este trabajo, pero para otra región, Pool y Hernández (1987) identificaron que en las partes altas se encuentran contenidos mayores de MO.

Roglic, citado por Trudgill (1985), mencionó que el microrelieve de planicie ondulada se genera por la erosión fluvial del karst en primer término, seguida por la corrosión o carstificación, y que las diferencias en el microrelieve se deben a la composición química, mineral y de la textura de la roca. En este estudio, se confirma la existencia de las diferencias en los contenidos químicos a nivel de suelo; sin embargo, no se encuentran evidencias de la erosión fluvial y es poco probable que, por el intemperismo del karst, se formen las grandes cantidades de suelo rojo.

También existe la teoría de la depositación de sedimentos no consolidados sobre la roca calcárea antes de la emersión, debido a la actividad volcánica de las zonas cercanas [Guatemala, centro de México y

Cuba (FAO, 1970)]. Esta teoría explica las diferencias mineralógicas entre la roca calcárea y los suelos rojos (Leptosol mólico), sin embargo, no explica la formación del microrelieve.

En la zona de estudio existen lugares donde se ha extraído el suelo y la roca caliza (laja), quedando expuesto el banco de calizas no consolidado; allí, se observan pequeñas elevaciones "a manera de surcos" en las cuales se ha realizado una separación mineral de manera natural debido a la solubilidad y movilidad del carbonato de calcio, quedando el carbonato de calcio en el montículo pequeño y las impurezas de la roca en la parte baja. El fenómeno es muy evidente debido al color blanco de la caliza y al rojo de los óxidos de hierro. Este fenómeno explica la formación del microrelieve y las diferencias en las propiedades químicas y mineralógicas de los suelos; sin embargo, no explica la formación de la roca.

El Color como Propiedad Distintiva

El resultado del análisis discriminante indica que a nivel superficial los suelos negros se asignaron correctamente de 80 a 83.3% con base en sus propiedades químicas. Los suelos café-rojizos lograron un nivel de asignación de 71.4 a 85.7% y los rojos de 80 a 100% (Cuadro 2a y 2c).

A nivel subsuperficial (5 a 10 cm), los suelos rojos y café-rojizos lograron 100% de asignación; los negros no estuvieron bien representados a esta profundidad, ya que sólo se contó con tres muestras (Cuadros 2b y 2d).

Estos resultados aportan evidencias que fortalecen la hipótesis de la validez de la utilización campesina (nomenclatura maya) del color como propiedad distintiva en los Leptosoles de la zona henequenera de Yucatán, siendo de mayor validez en el caso de los suelos rojos.

Los suelos rojos presentan menor variabilidad espacial, los negros son intermedios y los café-rojizo presentan más variación. Esto refleja su carácter de intergrado.

Los suelos negros contienen cantidades mayores de todos los nutrientes medidos en comparación con los suelos rojos; sin embargo, presentan menor cantidad de tierra fina. Los suelos café-rojizo se encuentran en una posición intermedia.

Considerando la importancia relativa para la formación de los grupos de suelo por color, de las seis

Cuadro 2. Clasificación de suelos por color con base en sus características químicas.

	Negro	Café-rojizo	Rojo	Total
a) Transecto 1 profundidad 0 a 5 cm				
Negro	5 (83.3%)	1 (16.7%)	0 (0%)	6 (100%)
Café-rojizo	0 (0%)	6 (85.7%)	1 (14.3%)	7 (100%)
Rojo	0 (0%)	0 (0%)	5 (100%)	5 (100%)
b) Transecto 1 profundidad 5 a 10 cm				
Negro	2 (66.67%)	0 (0%)	1 (33.33%)	3 (100%)
Café-rojizo	0 (0%)	6 (100%)	0 (0%)	6 (100%)
Rojo	0 (0%)	0 (0%)	5 (100%)	5 (100%)
c) Transecto 2 profundidad 0 a 5 cm				
Negro	4 (80%)	1 (20%)	0 (0%)	5 (100%)
Café-rojizo	1 (14.3%)	5 (71.4%)	1 (14.3%)	7 (100%)
Rojo	0 (0%)	1 (20%)	4 (80%)	5 (100%)
d) Transecto 2 profundidad 5 a 10 cm				
Café-rojizo		6 (100%)	0	6 (100%)
Rojo		0	5 (100%)	5 (100%)

variables más importantes analizadas por transecto y profundidad se obtienen las siete propiedades distintivas más importantes: P (Tamu y Olsen) y MO en primer término, seguidas de Cu, Ca, S y K. La longitud de los vectores (o la distancia del origen al punto) indica la importancia relativa de cada variable en la formación de los grupos por color, como se muestra en las Figuras 4, 5 y 6.

Aún agrupados los suelos por color, el coeficiente de variación de la MO es mayor que 10% a nivel superficial y arriba de 7.6% a nivel de 5 a 10 cm de profundidad (Cuadro 1).

Estos resultados sugieren una fuerte influencia de la vegetación en las propiedades del suelo. Las plantas arbóreas crecen más en los suelos pedregosos de las partes altas del microrelieve, mantienen su follaje por mayor tiempo durante la época de sequía y producen una mayor cantidad de hojarasca en comparación con las plantas que crecen en suelos rojos (Ilsley y Hernández, 1980). Además, es posible que en los suelos rojos, la descomposición de la hojarasca y de la materia orgánica sea más rápida debido a la actividad catalítica de los óxidos de Fe, Mn (Larson y Hufnal, 1980; McBride, 1989; Oades, 1989) y Al (McBride, 1979). Por el contrario, en los suelos calcáreos se encuentra ampliamente reportado el fenómeno de acumulación de MO, que puede estar ocurriendo en las partes altas de los montículos.

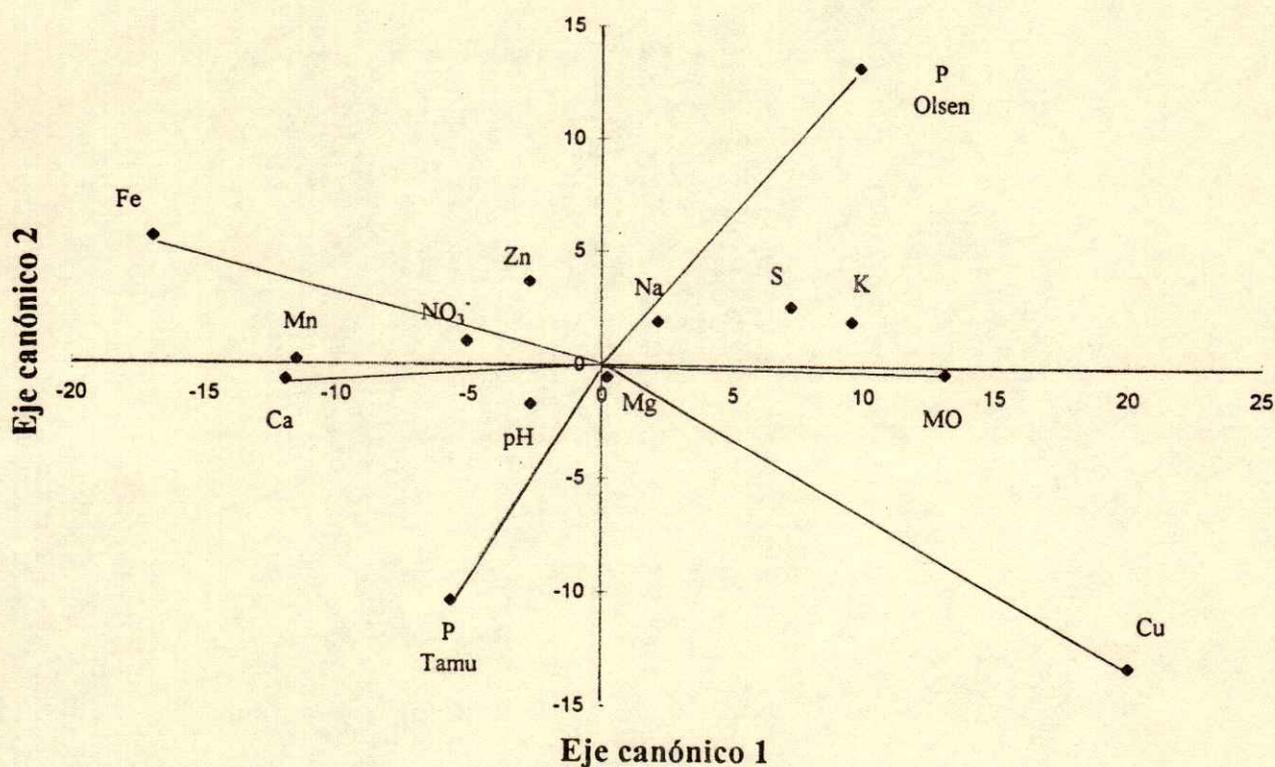


Figura 4. Coeficientes estandarizados de las propiedades químicas del suelo (Transecto 1: 0 a 5 cm).

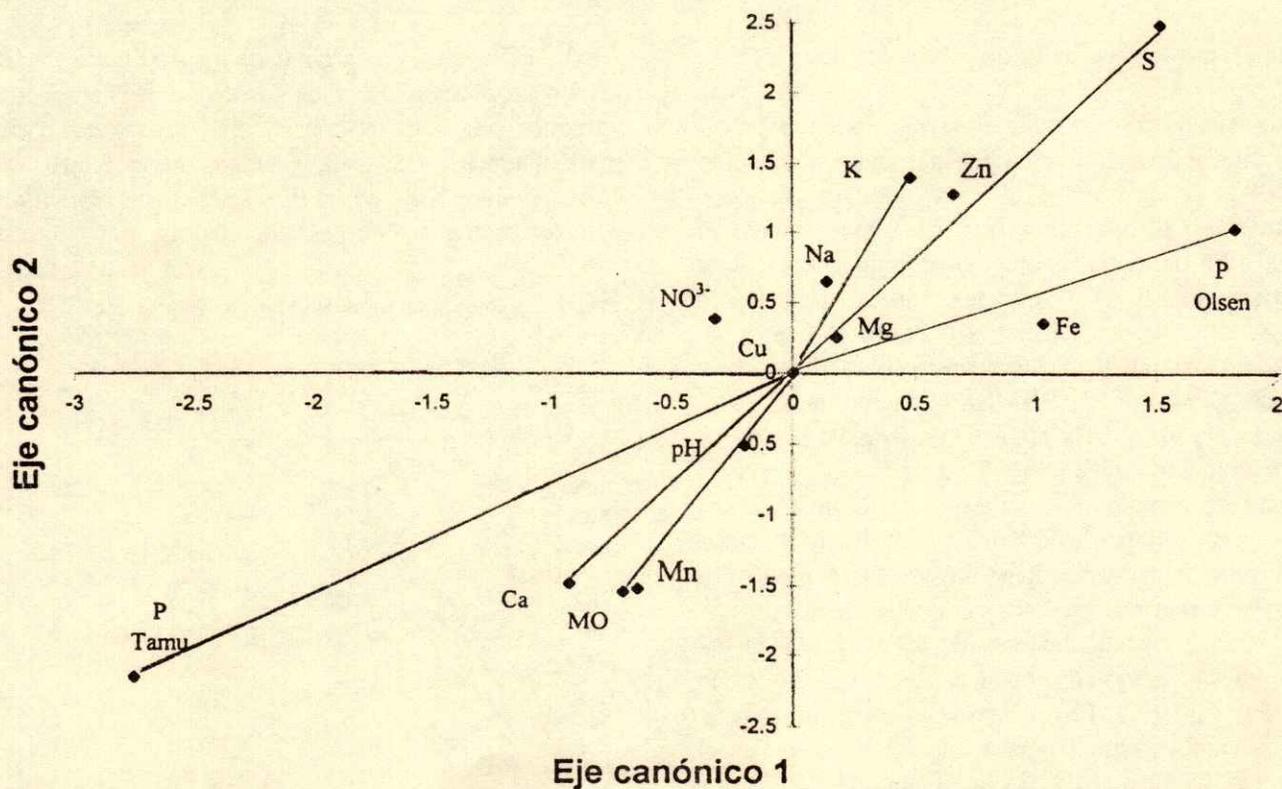


Figura 5. Coeficientes estandarizados de las propiedades químicas del suelo (Transecto 1: 5 a 10 cm).

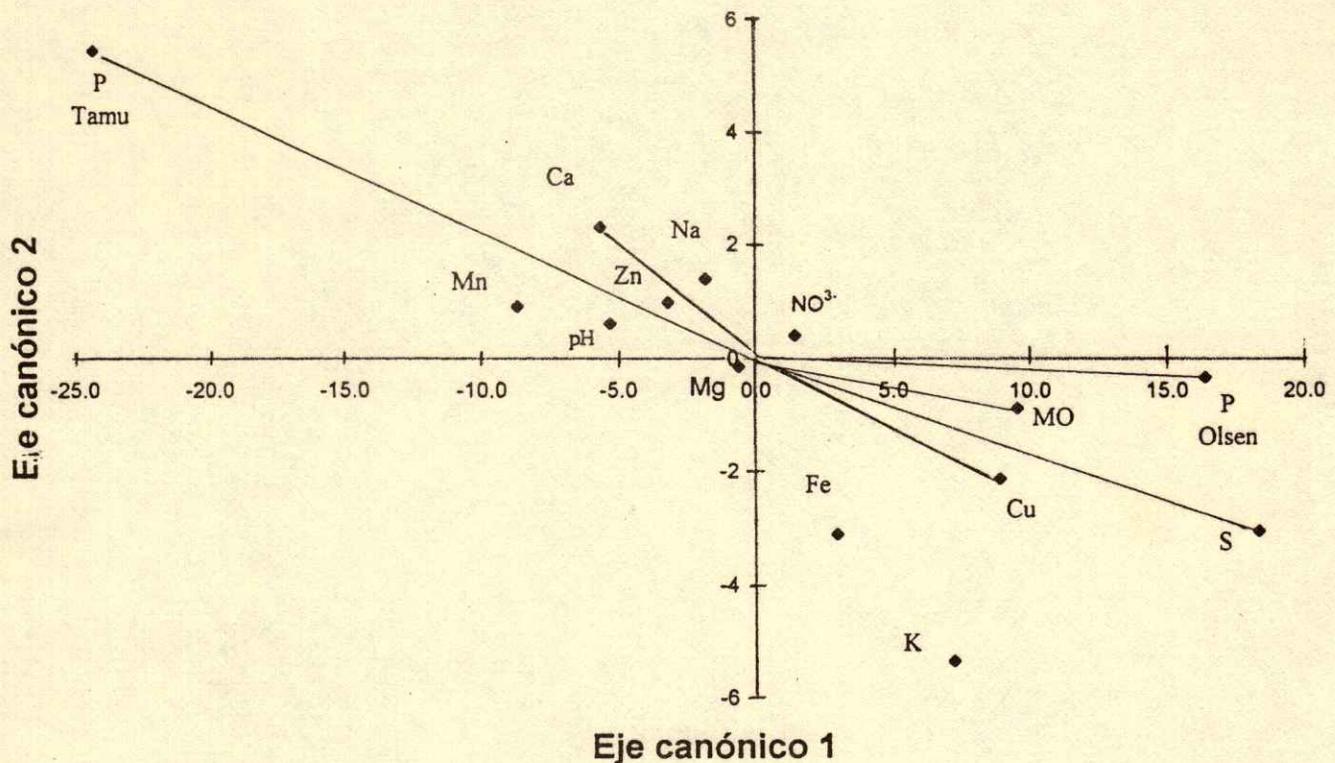


Figura 6. Coeficientes estandarizados de las propiedades químicas del suelo (Transecto 2: 0 a 5 cm).

Caracterización Detallada de los Suelos por Color

Los suelos rojos localizados en la parte baja del microrelieve presentan cantidades mayores de suelo por ser más profundos y cantidades mayores de minerales en comparación con los demás suelos, lo cual se corrobora con el contenido de Fe_2O_3 , K_2O , BaO y SiO_2 (Cuadro 3) y por la cantidad relativa de halloysita, boehmita y hematita (Cuadro 4; Figura 7). Estos suelos pueden clasificarse como Leptosoles mólicos (LPmo) por la BRMSR (Spaargaren, 1994) y como *Haylu'um* por la nomenclatura maya y son los que predominan en las partes bajas del microrelieve en la zona de estudio; sin embargo, en algunas zonas pueden ser más profundos y clasificarse como Cambisoles o inclusive como Luvisoles (*Kancab* por los mayas), según el grado de desarrollo alcanzado.

Los suelos predominantes de las partes altas del microrelieve (negros) pueden clasificarse como Leptosoles líticos (LPli) o *Boxlu'um* según los mayas. Las principales características de estos suelos es el contenido mayor de MO, Ca intercambiable, P, CaO y calcita, así como las concentraciones menores de

Al_2O_3 , halloysita y cuarzo (Cuadro 4; Figura 7). En menor proporción, también pueden presentarse otras variantes en la región, como: *Chochol* (con predominancia de pedregosidad superficial) que correspondería a un LP esquelético; *Puslu'um*, caracterizado por la ausencia de piedras, gran cantidad

Cuadro 3. Contenido total de óxidos en Leptosoles.

Elementos	Rojo	Café-rojizo	Negro
	<i>Haylu'um</i>	<i>Chaclu'um</i>	<i>Boxlu'um</i>
	----- % -----		
SiO_2	32.69	28.80	28.78
TiO_2	1.77	1.48	1.32
Al_2O_3	27.39	21.98	20.45
Fe_2O_3 total	11.88	9.72	10.55
MnO	0.16	0.29	0.10
MgO	1.53	1.63	1.51
CaO	3.76	8.11	12.25
Na_2O	0.52	0.53	0.55
K_2O	1.61	1.87	1.25
P_2O_5	0.32	0.64	2.27
PXC [†]	20.30	26.50	23.10

[†] pérdida de peso por calcinación.

Cuadro 4. Minerales menores que 2 μ en Leptosoles.

Mineral (Posición angular de la familia de planos en nm)	Rojo	Café-rojizo	Negro
	<i>Haylu'um</i>	<i>Chaclu'um</i>	<i>Boxlu'um</i>
	----- mm ² -----		
Halloysita (0.443)	562.5	382.5	315.0
Boehmita (0.610)	75.0	36.0	38.0
Cuarzo (0.333)	117.5	108.0	72.0
Hematita (0.267)	64.0	24.0	25.0
Calcita (0.303)	presencia	102.0	182.0
Illita (1.027)	presencia	presencia	no detectado

de MO, mayor contenido de tierra fina sobre la roca, sin grava y de un color negro más intenso (LPLi o LPre); *Chichu'um*, con predominancia de grava (LPLi); y *Tzekel*, en el que predominan la rocosidad superficial (LPLi).

El suelo café-rojizo es un intergrado entre el rojo y el negro y presenta cantidades intermedias de minerales como cuarzo, calcita y halloysita, así como del contenido total de Al_2O_3 y P_2O_5 (Cuadros 3 y 4).

En estudios de diagnóstico y caracterización, se recomienda poner especial atención al contenido de MO, carbonatos, Ca extraíble con acetato de amonio y P extraíble con bicarbonato.

Es ampliamente conocido que la MO humificada oscurece el color del suelo (Ibarra-F. *et al.*, 1995) como ocurre en este estudio. Asimismo, se ha probado que, en el suelo, el color rojo se debe al contenido alto de hematita (Torrent *et al.*, 1983; Torrent y Cabedo, 1986; Schwertmann, 1993), como también ocurre en este estudio; pero además, en este caso, otros minerales como la halloysita, boehmita y calcita coincidentemente son de utilidad en la caracterización de los suelos por color.

En la región, el color del suelo puede utilizarse como propiedad distintiva y utilizarse con éxito en diagnósticos rápidos, como lo hacen los campesinos de origen maya.

La nomenclatura maya considera otras propiedades de la superficie del suelo como la presencia de piedras, grava, afloramientos rocosos y profundidad del suelo que deben estudiarse para una mejor comprensión de la heterogeneidad espacial.

CONCLUSIONES

- Existe una diferencia clara en MO, Ca y P en los suelos a lo largo del microrelieve, presentándose los

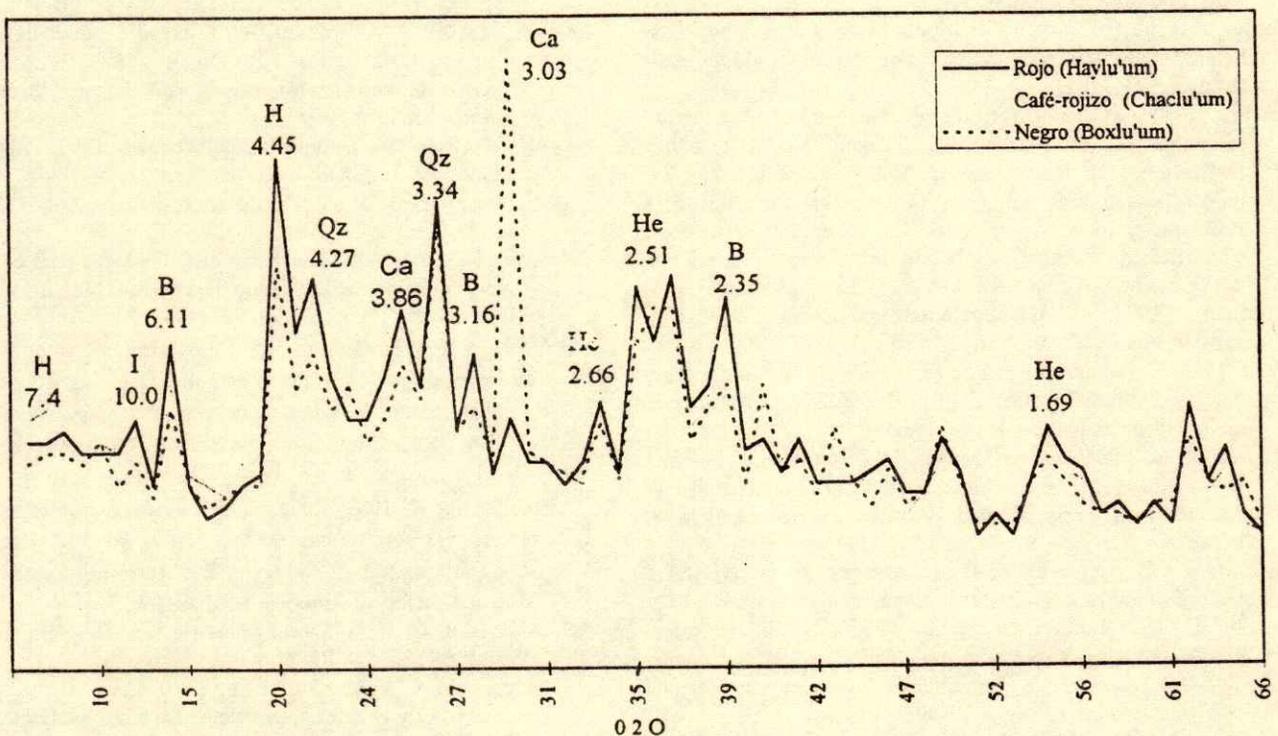


Figura 7. Minerales identificados en Leptosoles de Yucatán, México. H = Halloysita, Ca = Calcita, Qz = Cuarzo, B = Boehmita, He = Hematita, I = Illita.

valores más altos en el montículo en comparación con las planicies.

- Los suelos rojos se localizan en la parte baja del microrelieve, los café-rojizos en el piedemonte y los negros en el montículo. El color del suelo puede utilizarse, en primer instancia, para distinguir entre suelos diferentes, ya que dicha propiedad tiene soporte analítico; sin embargo, para aumentar la precisión es necesario analizar las propiedades químicas, principalmente P y MO, así como Mn, Ca, Cu, S y K. Adicionalmente, el contenido total de óxidos de Si, Al, Fe y los minerales como la hematita, calcita y boehmita varían con el color del suelo, por lo que se constituyen en propiedades distintivas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (proyecto 0308P-B9506 y R31624-B) y a la Fundación Rockefeller por el apoyo económico.

LITERATURA CITADA

- Biscaye, P.I. 1965. Mineralogy and sedimentation on recent deep sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geol. Soc. Am. Bull.* 76: 803-832.
- Casper, B.B. y J.F. Cahill. 1996. Limited effects of soil nutrients heterogeneity on populations of *Abutilon theophrasti* (Malvaceae). *Am. J. Bot.* 83: 333-341.
- Duch, J. 1992. Condicionamiento ambiental y modernización de la milpa en el Estado de Yucatán. pp. 81-99. *In:* D. Zizumbo, Ch. Rasmussen, L. Arias y S. Teran (eds.). *La modernización de la milpa en Yucatán: Utopía o realidad II. Ambiente y recursos genéticos.* Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán, Ministerio de Relaciones Exteriores del Gobierno de Dinamarca. Mérida, Yucatán, México.
- Dutilleul, P. 1993. Spatial heterogeneity and design of ecological experiments. *Ecol.* 74(6):1646-1658.
- FAO. 1970. El reconocimiento de los suelos en la Península de Yucatán. Informe técnico 1. ESR:SF/MEX G. Organización de las Naciones Unidas. Roma, Italia.
- Ibarra-F., F.A., J.R. Cox, M.H. Martín-R., T.A. Crowl, D.F. Post, R.W. Miller y G.A. Rasmussen. 1995. Relationship between Buffelgrass survival, organic carbon and soil color in Mexico. *Soil Sci. Am. J.* 59: 1120-1125.
- Isley, G.C. y E. Hernández X. 1980. La vegetación en relación a la producción en el ejido de Yaxcabá, Yucatán. pp. 343-372. *In:* E. Hernández y R. Padilla (eds.). *Seminario sobre producción agrícola en Yucatán.* Gobierno del Estado de Yucatán, Secretaría de Programación y Presupuesto, Colegio de Postgraduados. Mérida, Yucatán, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1997. Estadísticas del medio ambiente. Aguascalientes, México.
- Johnson, R.A. y D.W. Wichern. 1991. *Applied multivariate statistical analysis*, 3rd ed. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ.
- Keeney, D.R. y D.W. Nelson. 1982. Nitrogen-inorganic forms. pp. 643-698. *In:* A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Larson, R. y J. Hufnal. 1980. Oxidative polymerization of dissolved phenols by soluble and insoluble inorganic species. *Limnology and Oceanography* 25: 505-512.
- Lean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. pp. 199-224. *In:* A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Lindsay, W.L. y W.A. Norvelly. 1978. Development of a DPTA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-428.
- McBride, M.B. 1979. Reactivity of adsorbed and structural iron in hectorita as indicated by oxidation of benzidine. *Clays and Clay Minerals* 27: 224-230.
- McBride, M.B. 1989. Surface chemistry of soil minerals. pp. 35-88. *In:* J.B. Dixon y S.B. Weed (eds.). *Minerals in soil environment.* Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Nelson, D.W. y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 535-577. *In:* A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Oades, M.J. 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. pp. 89-159. *In:* J.B. Dixon y S.B. Weed (eds.). *Minerals in soil environments.* Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Okalebo, J.R., K.W. Gathua y P.L. Woome. 1993. *Laboratory methods of soil and plant analysis: A working manual.* Tropical Soil Biology and Fertility Program (TSBF). Nairobi, Kenya.
- Peniche, N. (ed.). 1994. *Riesgos y oportunidades para el campo yucateco.* Gobierno del Estado de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- Pool, L. y E. Hernández. 1987. Los contenidos de materia orgánica de suelos en áreas bajo el sistema agrícola de roza tumba y quema: Importancia del muestreo. *Terra* 5: 81-92.
- SAS. 1992. *SAS System for Windows 3.95, Release 6.08.* Cary, NC.
- Schwertmann, U. 1993. Relationships between iron oxides, soil color, and soil formation. pp. 51-69. *In:* J.M. Bigham y E.J. Ciolkosz (eds.). *Soil color.* Publicación especial 31. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Spaargaren, O.C. 1994. *World reference base for soil resources.* ISSS-ISSRIC-FAO. Roma, Italia.
- Tabatabai, M.A. 1982. Sulfur. pp. 501-538. *In:* A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Madison, WI.

Torrent, J., U. Schwertman, H. Fechter y F. Alférez. 1983. Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Sci.* 136: 354-358.

Torrent, J. y A. Cabedo. 1986. Sources of iron oxides in reddish brown soil profiles from calcarenites in southern Spain. *Geoderma* 37: 57-66.

Trudgill, S. 1985. Limestone geomorphology. *Geomorphology texts*. Longman, New York.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE HUMEDAD PARA UNA MÍNIMA APLICACIÓN DE ENERGÍA EN LABOREO CON TRACCIÓN MOTRIZ

Determination of the Status of Moisture Content for a Minimum Energy Application for Tillage with Mechanical Traction

Martín Cadena Zapata¹, Santos Campos Magaña², Eduardo Narro Farías¹ y Tomás Gaytan Muñiz¹

RESUMEN

En teoría, para lograr los mejores resultados tecnológicos con la menor aplicación de energía en labores como aradura y rastreo, los suelos deben trabajarse en un rango de humedad entre los límites de contracción (LC) y límites inferiores de plasticidad (LIP), conocido como estado friable del suelo. Sin embargo, en la práctica, la mejor relación entre aplicación de energía y resultado de labor sólo se obtiene en un rango muy limitado que, en la actualidad, es difícil de ubicar en forma cualitativa para fines operativos. Este trabajo tuvo como objetivo cuantificar la energía específica aplicada para laborar un suelo franco y uno arcilloso a contenidos de humedad, tanto dentro como fuera del estado friable, para determinar los puntos de referencia a los cuales estos suelos pueden trabajarse con la menor aplicación de energía. Los puntos de aplicación mínima de energía se encontraron cuando el potencial mátrico del suelo franco estuvo entre -0.062 MPa (pF 2.8) y -0.246 MPa (pF 3.4) para la aradura y -0.123 MPa (pF 3.1) para el rastreo. Para el suelo arcilloso, los puntos mencionados se encontraron cuando el potencial mátrico estuvo entre -0.010 MPa (pF 2) y -0.196 (pF 3.3) para la aradura y -0.246 MPa para el rastreo. Estos resultados pueden utilizarse conociendo las curvas de retención de humedad del suelo, como puntos de referencia (para los suelos de la región de estudio y los suelos similares de otras regiones) para tomar decisiones operativas que tengan como meta el uso racional de energía en las operaciones de laboreo.

Palabras clave: Energía específica, calidad del laboreo, uso racional de combustible

SUMMARY

In theory, the workable range of soils is located between the shrinkage limit and the plastic limit known as the friable soil consistency. However, in practice, the best relationship between energy applied and result of operation is achieved in a narrow range of moisture content, which actually is very difficult to locate qualitatively for operational purposes. In this work, the energy applied to till a loam and a clay soil was quantified; the study was carried out in a range of moisture content inside and outside of the theoretical friable consistency of the soils, looking for the points where tillage can be performed at minimum input of energy. The points of minimum input of specific energy for the loam soil were found when the matric potential was between -0.062 MPa (pF 2.8) and -0.246 MPa (pF 3.4) for ploughing and -0.123 MPa (pF 3.1) for harrowing. For the clay soil, when the matric potential was between -0.010 MPa (pF 2) and -0.196 (pF 3.3) for ploughing and -0.246 MPa for harrowing. The results are relevant, because knowing the moisture retention curve, the range can be used as reference for the soils of the area and similar soils of other areas where operative decisions have to be made aiming at the minimum input of energy and better results for tillage operations.

Index words: Specific energy, tillage quality, rational use of fuel.

¹ División de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, 25315 Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Tel.-fax: (844) 4110224 (martincadena@att.net.mx)

² Unidad de Ingeniería y Mecanización. CECOT-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Apartado Postal 429, 91700 Veracruz, Ver., México. Tel. (2) 9348591.

Recibido: Julio de 2001. Aceptado: Junio de 2002.
Publicado en Terra 21: 13-19.

INTRODUCCIÓN

Las operaciones de labranza demandan grandes cantidades de energía. La labranza primaria dicta las necesidades de potencia en las unidades de producción agrícola (Witney y Eradat-Oskoui, 1982) y el costo de las operaciones lo determinan la energía y el tiempo utilizados por las personas, animales,

máquinas e implementos en la labranza (Perdok y Kouwenhoven, 1994). Los factores más importantes que afectan la cantidad de energía requerida para las operaciones de labranza son el tipo de suelo y su condición de humedad, el tipo de implemento, la profundidad y la velocidad de trabajo. Los resultados de la labranza deben evaluarse en términos de su efecto en el suelo y también por la energía utilizada. Se debe buscar una óptima relación entre los resultados de la labranza y la energía aplicada para lograrlos (Summers *et al.*, 1986; Stout, 1990), ya que el alto costo de las labores primarias eleva el costo total de producción de los cultivos. Un juicio subjetivo de la condición de humedad para trabajar un suelo, con el fin de establecer un cultivo, genera mala calidad de preparación de la cama de siembra y la necesidad de operaciones adicionales para lograr la condición adecuada. Esto significa alto gasto de energía, retraso en el calendario de cultivo y exposición del suelo a erosión y daño de la estructura (Pineda *et al.*, 1996; Cadena *et al.*, 2000). Lo anterior es de modo particular cierto en la zona tropical de México, donde se establecen al año alrededor de tres millones de hectáreas de maíz (Sierra *et al.*, 1994). Aquí, el costo de las labores para preparar la cama de siembra puede alcanzar 40% del costo total de producción en este cultivo y también en otros, como frijol (Cadena *et al.*, 1993). La energía tiene un costo, por lo que debe tratarse de obtener una tasa óptima de aplicación de energía y resultado de labor (Stout, 1990). En algunas circunstancias, es necesario realizar una secuencia de labores y determinar con cuidado la condición de humedad del suelo a la que se va a trabajar, considerando las características del terreno con el fin de planear y realizar las operaciones en forma eficiente, con el mínimo de energía aplicada. Esto es relevante en la región tropical de México, específicamente en aquellas parcelas de suelos francos y arcillosos, relieve plano y drenaje interno malo; aquí la secuencia de operaciones del laboreo convencional es la mejor alternativa comparada con cero o mínima labranza (Uresti y Campos, 1995).

En México, la planeación y el cálculo de necesidades de maquinaria son casi inexistentes. Cuando se realizan, los cálculos se basan en información cualitativa y se subestima en gran medida el número de fuentes de potencia e implementos requeridos. Así, las labores se realizan en condiciones poco favorables, con resultados pobres y con mayor gasto de energía, ya que requieren pasos adicionales de implemento para lograr la condición adecuada de

suelo. Es relevante, entonces, cuantificar a qué humedad del suelo se obtiene la mejor relación entre la energía aplicada y el resultado. Se ha observado que se necesita mayor potencia para operar el mismo implemento en un suelo arcilloso que en un suelo arenoso a densidades y humedades comparables (Buckingham, 1976). De acuerdo con Perdok y Van de Werken (1983), la potencia requerida para trabajar con un arado de vertedera en diferentes condiciones de suelo puede variar desde 20 kW m⁻¹ de ancho en suelos arenosos hasta 90 kW m⁻¹ de ancho en suelos arcillosos. Los estudios de Canarache (1993) indican que el incremento de la resistencia del suelo al paso de implementos, desde una humedad óptima hasta un estado muy seco o muy húmedo, varió desde menos de 5% en suelos arenosos hasta más de 20% en suelos arcillosos. El rango de resistencia específica a la aradura varió de 10 kgf dm⁻² hasta más de 100 kgf dm⁻² para los mismos suelos. Como ya se mencionó antes, las labores de preparación de suelo son las que, por lo general, demandan una mayor aplicación de energía. En la actualidad, en México, para decidir cuándo realizar el laboreo, los agricultores y operadores se basan sólo en conocimientos empíricos del contenido de agua en el perfil del suelo. Es necesario utilizar criterios cuantitativos del estado de humedad para realizar las operaciones y obtener mejores resultados de labor y con la mínima aplicación de energía mecánica.

Los objetivos de este trabajo fueron: (1) cuantificar los requerimientos de energía específica aplicada por el tractor para las operaciones de labranza convencional en suelos francos y arcillosos, con el fin de determinar el estado de humedad en el que se requiere una mínima aplicación de energía para lograr el resultado tecnológico de la labranza en este tipo de suelos, y (2) obtener una cuantificación del estado o rango de humedad donde se requiere la aplicación de un mínimo de energía en el sistema como referencia para decisiones operativas en este tipo de suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en el Campo Experimental Cotaxtla, Veracruz, México, a 19° N y 96° O, con dos tipos de suelo. Uno arcilloso, con 50.3% de arcilla, 31% de limo y 18.6% de arena; 3.9% de materia orgánica y densidad aparente de 1.16 g cm⁻³ en el estrato de 0 a 25 cm. El otro, franco, con 26.3% de arcilla, 38.3% de limo y 35.3% de arena; 2.3% de

materia orgánica y densidad aparente de 1.32 g cm^{-3} en el estrato de 0 a 25 cm. De acuerdo con la carta de suelos E14-6 Orizaba (INEGI, 1984), el sitio se encuentra en una unidad de asociación de Vertisoles y Feozems.

Para cada tipo de suelo, se estableció un experimento utilizando un diseño de parcelas divididas; se tomaron como parcelas grandes los contenidos de humedad, y como parcelas pequeñas las operaciones de labranza. Las unidades experimentales fueron de $5 \times 50 \text{ m}$ con cuatro repeticiones. Los resultados se analizaron con el paquete de diseños experimentales de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Olivares, 1990). Para establecer los contenidos de humedad, se utilizó como referencia el límite de contracción (LC) y el límite inferior de plasticidad (LIP) de cada suelo. Las operaciones de laboreo convencional se efectuaron con contenidos de humedad, dentro y fuera del rango friable teórico de los suelos, delimitados por los LC y LIP respectivos. Antes de realizar las labores en cada nivel de humedad, se caracterizó la resistencia en el perfil del suelo, desde la superficie y hasta 25 cm a intervalos de 5 cm. Para lo anterior, se midió la resistencia a la penetración con un penetrometro de cono (ángulo de cono de 30° y 71 mm^2 de base). Se utilizaron un arado con tres discos de 710 mm de diámetro y un peso total de 570 kg y una rastra tipo excéntrico con 20 discos de 559 mm de diámetro y un peso total de 610 kg. Se utilizó un tractor de tracción sencilla con una potencia nominal de 52 kW al volante, con una velocidad del motor de 1800 rpm. El consumo de combustible se midió en campo con un contador de flujo, tipo pulsos eléctricos, incorporado al sistema de combustible del tractor, que muestra el consumo neto en una pantalla colocada en el tablero del tractor. Para la aradura, se trabajó a una velocidad constante de 1600 rpm al volante del motor y en cuarta velocidad de avance. Para el rastreo, se trabajó a 1500 rpm y en quinta velocidad de avance. Para ambas operaciones, se hicieron corridas con el implemento levantado para determinar la resistencia al rodamiento. En cada unidad experimental, se tomaron los siguientes datos de campo, con el implemento trabajando, con base en la metodología de Smith y Sims (1990):

Velocidad de Operación

Para calcularla, se midió el tiempo para desplazarse 20 m en la parte media de la unidad

experimental, realizando seis repeticiones para la aradura y dos para el rastreo.

Profundidad de Trabajo

Se midió la distancia vertical, desde la superficie al fondo de la labor y se midieron 24 repeticiones de profundidad por unidad experimental para la aradura. Para el rastreo, la profundidad de trabajo se midió a un lado de los discos en posición de trabajo a tractor parado.

Ancho de Trabajo

Tomando como referencia una estaca en una orilla de cada unidad experimental, se midió el ancho de trabajo de cada uno de los pasos sucesivos con el implemento.

Patinaje

Se midió la distancia recorrida de 10 revoluciones de las ruedas traseras, teniendo activada la traba del diferencial, tanto con el implemento levantado como trabajando. El patinaje se calculó con la siguiente fórmula:

$$\%p = \frac{ds - dc}{ds} \times 100$$

Donde: $\%p$ = porcentaje de patinaje; ds = distancia con el implemento levantado; dc = distancia con el implemento trabajando.

Para calcular la energía, primero se estableció una relación entre la potencia total entregada por el tractor y el consumo de combustible, mediante una calibración con las instalaciones e instrumentación para una prueba estándar de entrega de potencia a la toma de fuerza (TDF). El consumo de combustible y la potencia se midieron a una velocidad constante del motor y se varió la aplicación de carga con un dinamómetro.

Para calcular la energía aplicada durante las operaciones, se utilizó la siguiente fórmula:

$$E = \frac{P}{G/s}$$

Donde: E = energía específica ($J\ kg^{-1}$); P = potencia neta utilizada para la operación (kW); G/s = peso del suelo movido por segundo por el implemento ($kg\ s^{-1}$).

La potencia neta (P) utilizada durante la operación es la cantidad que queda después de restar a la potencia total entregada por el tractor, la potencia consumida por la resistencia al rodamiento y el patinaje. Por conveniencia, esta potencia (P) puede expresarse en $J\ s^{-1}$ para luego expresar la energía aplicada a la masa del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración para Determinar Consumo de Combustible con Entrega de Potencia (Energía)

La Figura 1 muestra la relación entre el consumo de combustible y la potencia entregada por el tractor en laboratorio. Una relación polinomial de segundo orden predice la potencia a la toma de fuerza obtenida con el consumo de combustible. La relación está representada por $y = -15.8 + 9.6x - 0.5x^2$ con un coeficiente $r^2 = 0.99$ para una velocidad del motor de 1500 rpm y por $y = -20.3 + 11x - 0.6x^2$ con un coeficiente $r^2 = 0.99$ para una velocidad de 1600 rpm. Estas relaciones se utilizaron para calcular la potencia total entregada por el tractor en campo de acuerdo con el consumo de combustible, como se describió anteriormente. Sumner *et al.* (1986) también encontraron relaciones similares entre consumo de

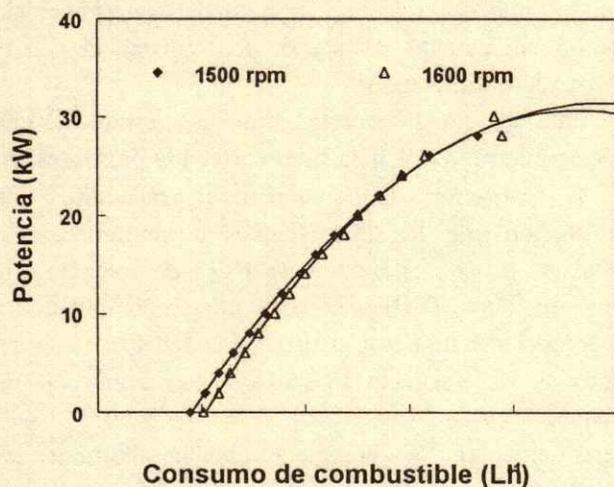


Figura 1. Relación entre el consumo de combustible y la entrega de potencia a la velocidad del motor usada para la aradura (1600 rpm) y el rastreo (1500 rpm).

combustible y potencia entregada, representadas por ecuaciones polinomiales de segundo orden.

Energía Aplicada en Operaciones de Campo

Las operaciones de campo se realizaron en seis contenidos de humedad (29, 24, 22, 19, 16 y 10, expresados en porcentaje de humedad gravimétrica), para el suelo franco, y cuatro contenidos (31, 25, 24 y 21, también en porcentaje de humedad gravimétrica), para el suelo arcilloso. El factor de la condición inicial del suelo más relevante para el gasto de energía es la humedad; por lo tanto, los resultados de la aplicación de la energía se refieren a esta condición. Para tener una mejor visión y comparación de los resultados obtenidos entre los suelos estudiados (diferentes texturas y densidades iniciales diferentes), el correspondiente potencial mátrico del suelo se puso en lugar del valor de contenido de humedad gravimétrico mediante relaciones empíricas entre el potencial mátrico y las cantidades medidas en los factores relacionados con el gasto de energía. El potencial mátrico se presenta en Pascales y en escala pF; en esta última, los valores indican en forma logarítmica negativa la energía o fuerza [potencial de la fuerza (pF)] asociada con la retención del agua entre las partículas del suelo. El valor pF es el logaritmo de la energía expresada inicialmente como columna de agua (en cm) (Narro, 1994). Como se mencionó en la metodología, la energía se calculó con base en la potencia aplicada al peso del suelo movido por el implemento en tiempo. Para calcular todo lo anterior, los datos tomados en campo fueron: profundidad y ancho de trabajo, velocidad de operación, consumo de combustible y patinaje. Estos datos tuvieron coeficientes de variación entre 1 y 15% dentro de cada nivel de humedad, lo anterior los hace confiables aun cuando, en experimentos en campo con suelos, existe una inherente variabilidad.

Profundidad de Trabajo

La Figura 2 muestra la relación entre el potencial mátrico en el suelo y la resistencia a la penetración. La Figura 3 muestra la relación entre el potencial mátrico y la profundidad de trabajo; como es de esperarse, los suelos disminuyen su resistencia conforme aumenta el contenido de humedad y, por lo tanto, la penetración de los discos es mayor. La

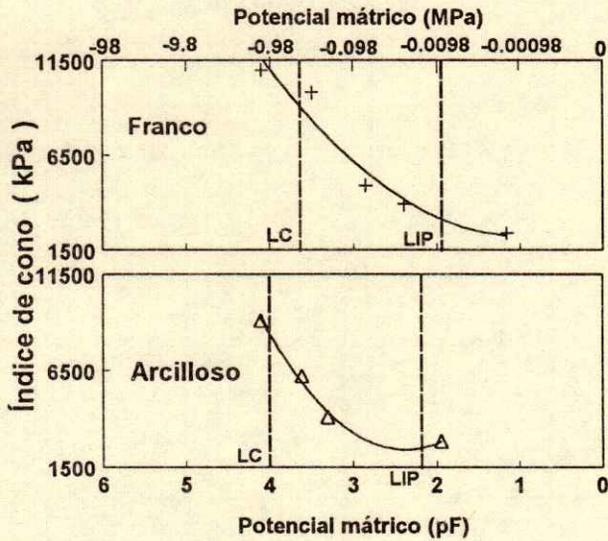


Figura 2. Relación entre el potencial mátrico y la resistencia a la penetración (índice de cono) antes de realizar las labores con los diferentes contenidos de humedad de los suelos.

aplicación de energía para realizar las labores depende mucho de la humedad, pues en suelo seco la profundidad de trabajo es somera, pero la resistencia es muy alta. Conforme el suelo se humedece, baja la resistencia, pero una mayor profundidad implica un mayor volumen de suelo movido. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos por Iqbal *et al.* (1994), quienes trabajaron con diferentes suelos en Pakistán.

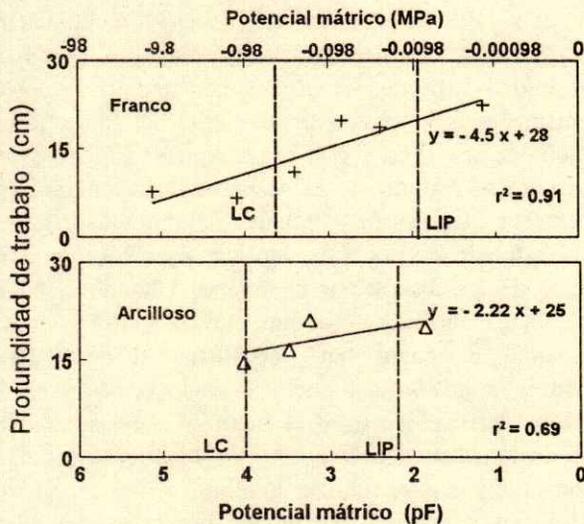


Figura 3. Relación entre la profundidad de trabajo y el potencial mátrico del suelo.

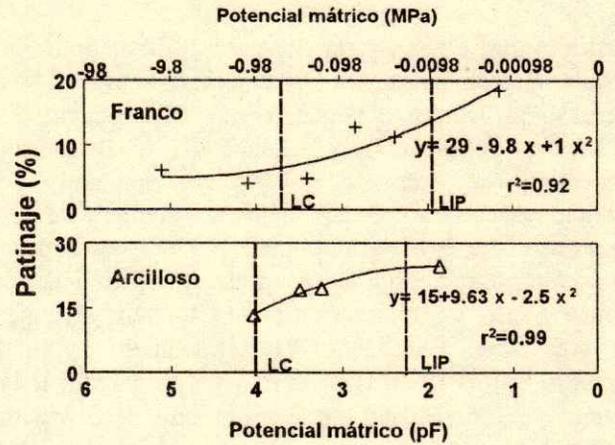


Figura 4. Relación entre el patinaje y el potencial mátrico del suelo al realizar la labor de aradura.

Patinaje

Las Figuras 4 y 5 presentan la relación entre el potencial mátrico y el patinaje; una superficie húmeda implica aumento en el patinaje. En estas situaciones, la aplicación de energía puede ser excesiva. Si se considera que con un patinaje mayor que 15%, la tracción es ineficiente (Buckingham, 1976), los resultados muestran que, para el suelo franco, un patinaje aceptable se obtiene hasta una humedad menor al límite inferior de plasticidad (LIP); para el suelo arcilloso, un patinaje aceptable sólo se obtiene en humedades cercanas al límite de contracción (LC). Lo anterior tiene similitud con los resultados de Perdok y Van de Werken (1983).

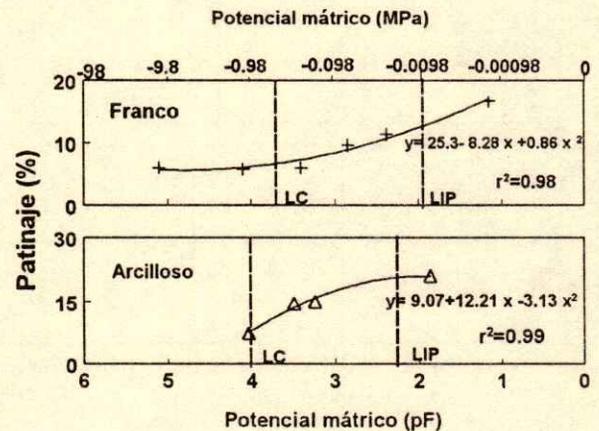


Figura 5. Relación entre el patinaje y el potencial mátrico del suelo al realizar la labor de rastreo.

Energía Específica

La Figura 6 muestra la energía específica aplicada para la labor inicial de aradura con discos para los dos suelos bajo estudio. Aunque, como se mencionó, se alcanzaron diferentes profundidades a diferentes contenidos de humedad, el utilizar unidades de energía específica permite realizar comparaciones, pues se refiere a energía aplicada por unidad de peso de suelo. La energía específica muestra valores mínimos entre las referencias de (LC) y (LIP), lo que coincide con Canarache (1993), quien también encontró que la necesidad de energía para realizar la aradura se incrementa en suelos muy secos, pero también para laborar suelos muy húmedos. La cantidad de energía necesaria para la labor aumenta también de acuerdo con el contenido de arcilla en el suelo. Los valores bajos de aplicación de energía en el suelo franco están entre -0.062 MPa (pF 2.8) y -0.246 MPa (pF 3.4); para el suelo arcilloso, el intervalo está entre -0.010 MPa (pF 2) y -0.196 MPa (pF 3.3). Los valores de potencial mátrico coinciden con aquéllos en donde se obtuvieron las mejores propiedades físicas con la labor de aradura en los mismos suelos (Cadena *et al.*, 2000). Estos valores se ubican en el estado de consistencia friable (entre LC y LIP); otros autores han señalado que teóricamente muchas labores demandarían relativamente menor energía (Krause *et al.*, 1984).

En la Figura 7, se observa la relación entre el potencial mátrico en el suelo y la energía aplicada

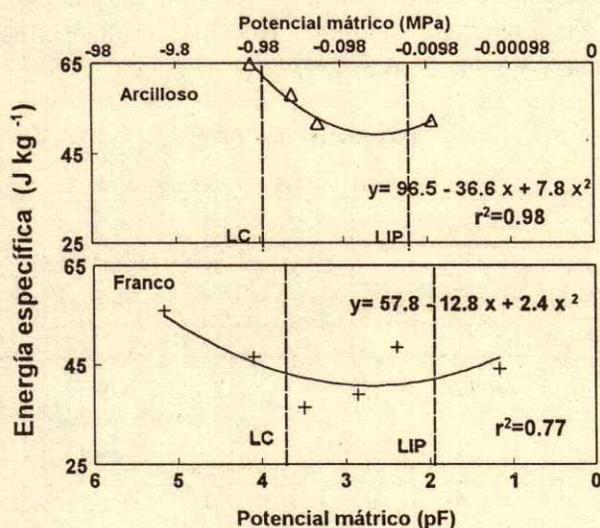


Figura 6 Relación entre la energía específica demandada para la labor de aradura y el potencial mátrico de los diferentes suelos.

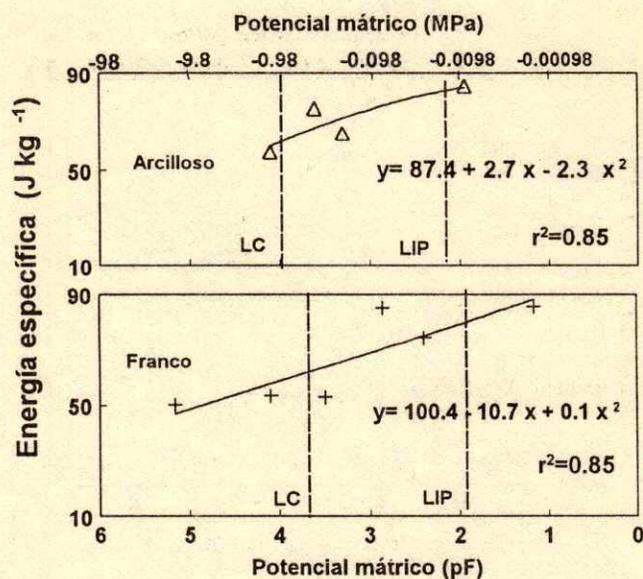


Figura 7. Relación entre la energía específica requerida para realizar la labor de rastreo en los diferentes suelos.

durante la labor subsiguiente de rastreo para la preparación de la cama de siembra. La energía específica aplicada se incrementa, conforme aumenta el contenido de humedad (potencial mátrico menor). Esto se debe a que, cuando se rastrea el suelo seco, tanto la acción de corte de los discos como la profundidad de trabajo son menores, y sólo algunas partículas de polvo se disgregan de los terrones secos y duros; esto resulta en menor energía invertida, pero también en una mala calidad de labor (pobre preparación de la cama de siembra, por ejemplo, terrones demasiado grandes). Conforme aumenta el contenido de humedad, el suelo cambia su consistencia a friable, los discos trabajan a mayor profundidad y también realizan más acción de corte. Asimismo, ocurre mayor disgregación del suelo por el impacto de los discos con los terrones. Entonces, se realiza más trabajo y la demanda de energía se incrementa. Conforme aumenta la humedad en el suelo, también es necesario aplicar más energía para el paso de los discos por el mismo. Cuando el suelo está seco, sólo las fuerzas de fricción oponen resistencia al paso, pero conforme se humedece, ocurre la adhesión del suelo y se incrementa en la interfase entre el suelo y el metal. La resistencia al paso de los discos es mayor, por lo que se requiere mayor potencia para realizar la labor.

La mayor energía demandada por la misma labor de rastreo en el suelo arcilloso, comparada con el suelo franco, se debe a la alta resistencia causada por

las fuerzas de adhesión en la interfase entre el suelo y el metal (Perdok y Kouwenhoven, 1994), debido al alto contenido de arcilla (50% comparado con 26%).

El punto óptimo, desde el punto de vista de menor demanda de energía y mejor calidad de labor (rastreo), es alrededor de -0.123 MPa para el suelo franco. Para el suelo arcilloso, el punto óptimo se localiza alrededor de un potencial mátrico de -0.246 MPa. Los puntos óptimos para la labor de rastreo en ambos suelos se ubican en contenidos de humedad ligeramente mayores que los límites de contracción y caen dentro del contenido de humedad al cual se obtuvo la mejor calidad de labor en los mismos en un estudio previo (Cadena *et al.*, 2000).

CONCLUSIONES

- De acuerdo con los objetivos planteados, fue posible cuantificar la energía aplicada y ubicar puntos óptimos de referencia del estado de humedad en el suelo, a los cuales las labores de aradura y rastreo en un suelo arcilloso y otro franco demandan una menor inversión de energía. Los puntos de aplicación mínima de energía se encontraron cuando el potencial mátrico del suelo franco estuvo entre -0.062 MPa (pF 2.8) y -0.246 MPa (pF 3.4) para la aradura y -0.123 MPa (pF 3.1) para el rastreo. Para el suelo arcilloso, cuando el potencial mátrico estuvo entre -0.010 MPa (pF 2) y -0.196 (pF 3.3) para la aradura y -0.246 MPa para el rastreo.

- Esta información es relevante por que, conociendo la curva de retención de humedad de suelos arcillosos y francos, pueden ubicarse los puntos óptimos de referencia para identificar el contenido de humedad al cual se obtendrá una mejor calidad de labor con una menor aplicación de energía (suponiendo la correcta calibración y ajuste del sistema tractor-implemento). Lo anterior es importante para decisiones operativas en las condiciones (técnicas o financieras) donde sea necesario realizar las labores aquí estudiadas, en particular en las zonas tropicales de México.

LITERATURA CITADA

- Buckingham, F. 1976. Tillage. Fundamentals of machine operations. John Deere Service Publications. Moline, IL.
- Cadena Z., M., S.G. Campos M., S. Jácome M. y E. López S. 1993. Evaluación de sistemas de labranza en el cultivo de soya. Programación 1993-1994. Unidad de Ingeniería y Mecanización Agrícola. Campo Experimental Cotaxtla. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. México. Veracruz, Ver., México.
- Cadena Z., M., W.B. Hoogmoed y U.D. Perdok. 2000. Assessments of the workable range of typical soils in the tropical zone of Veracruz, Mexico and its implication for field management. In: J.E. Morrison (ed.). Proceedings (CD-ROM) of the 15th International Conference of the Soil Tillage Research Organization. Texas Agricultural Experiment Station. Temple, TX.
- Canarache, A. 1993. A preliminary model estimating soil specific resistance to ploughing. Soil Tillage Res. 27: 355-363.
- INEGI. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. 1984. Carta edafológica E14-6 Orizaba. Aguascalientes, Ags., México.
- Iqbal, M., M. Younis, M.S. Sabir y A.H. Azhar. 1994. Draft requirements of selected tillage implements. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America 25: 13-15.
- Krause, R., F. Lorenz y W.B. Hoogmoed. 1994. Soil tillage in the tropics and subtropics. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Eschborn, Germany.
- Narro, F.E. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Primera Edición. Trillas. México, D.F.
- Olivares, S.E. 1990. Paquete de diseños experimentales. Versión 2.0. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, Nuevo León, México.
- Perdok, U.D. y J.K. Kouwenhoven. 1994. Soil-tool interactions and field performance of implements. Soil Tillage Res. 30: 283-326.
- Perdok, U.D. y G. van de Werken. 1983. Power and labour requirements in soil tillage: A theoretical approach. Soil Tillage Res. 3: 3-25.
- Pineda M., T., A.J.M. Ramírez, N.A. Chávez y G.P. Fagundo. 1996. Efecto del contenido de humedad sobre las operaciones de labranza. Revista Chapingo. Serie Ingeniería Agrícola 3: 91-96.
- Sierra M., M., F.A. Rodríguez M., R. Castillo G., J. Ortiz C. y S. Barrón F. 1994. H-513 Híbrido de maíz de cruz simple para el trópico mexicano. Folleto Técnico 9. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional del Golfo Centro. Veracruz, Veracruz, México.
- Smith, D. y B.G. Sims. 1990. Evaluación técnica de equipos para pequeños productores. Programa de Cooperación Técnica México-Gran Bretaña. Agricultural and Food Research Council-Institute of Engineering-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Cotaxtla. Veracruz, México.
- Stout, B.A. 1990. Handbook of energy for world agriculture. Elsevier. Essex, England.
- Summers, J.E., A. Khalilian y D.G. Batchelder. 1986. Draft relationships for primary tillage in Oklahoma soils. Trans. ASAE 29: 37-39.
- Sumner, H.R., R.E. Hellwig y G.E. Monroe. 1986. Measuring implement power requirements from tractor fuel consumption. Trans. ASAE. 29: 85-89.
- Uresti G., J. y S.G. Campos M. 1995. Respuesta del maíz a la labranza de conservación en cuatro suelos tropicales. Agronomía Mesoamericana 6: 80-87.
- Witney, B.D. y K. Eradat-Oskoui. 1982. The basis of tractor power selection on arable farms. J. Agric. Eng. Res. 27: 513-527.

ESTUDIOS DE OPTIMIZACIÓN DE LA OXIDACIÓN CRÓMICA DEL CARBONO ORGÁNICO DE LOS SUELOS

Optimization Studies of the Chromic Oxidation of Soil Organic Carbon

Arturo Aguirre Gómez^{1†}, Frida María León Rodríguez¹ y Armando Aguilar Márquez¹

RESUMEN

Se estudiaron las condiciones experimentales que permitieran la digestión crómica, vía húmeda, libre de interferencias y la determinación efectiva del carbono orgánico de los suelos. Se estudiaron los factores: agente oxidante, acidez, tiempo de digestión, método de digestión y la complejación con metales para eliminar la interferencia de cloruros. La metodología se aplicó a soluciones sintéticas de estándares primarios con contenido de carbón conocido (sacarosa, biftalato de potasio, oxalato de sodio) con diferentes agentes oxidantes [permanganato de potasio (KMnO_4), dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), cromato de potasio (K_2CrO_4) y yodato de potasio (KIO_3)], en ácido sulfúrico con dos métodos de calentamiento (reflujo abierto y baño María). Los sistemas dicrómico y crómico mostraron estabilidad química, mientras que el KMnO_4 y el KIO_3 fueron inestables durante el calentamiento. Los estudios de interferencia se realizaron en soluciones sintéticas, con y sin carbono, adicionando metales complejantes (Hg^{2+} o Ag^+) para disminuir la actividad del Cl^- . Ambos sistemas, crómico y dicrómico, fueron ineficaces para suprimir la interferencia por cloruros bajo reflujo abierto, dando interferencias $< 10\%$ para sacarosa y oxalato, y $> 35\%$ en el blanco y biftalato. La interferencia se evitó eficazmente por complejación metálica, mientras que el Ag^+ suprimió la interferencia en ambos medios. Adicionado en cantidades equivalentes, el Hg^{2+} permitió 2.3 a 6% de oxidación de Cl^- (relativo al carbono) en estándares y blancos. Un exceso de Ag^+ dio altos consumos de oxidante, por precipitación de Ag_2CrO_4 . El calor de reacción, el tiempo de digestión y la concentración de ácido sulfúrico, óptimos fueron: 90 °C, 2 h y 7.2 M. Esta

metodología, aplicada al sistema crómico, con soluciones sintéticas de estándares primarios, con iones Cl^- interferentes, mostró valores de oxidación de carbono orgánico de aproximadamente 100% y no se detectó oxidación de cloruros. En muestras de suelos, los análisis comparativos del método mostraron oxidaciones de carbono orgánico mayores que las del método de Walkley-Black, en especial para muestras con altos valores de materia orgánica, medida por pérdida de peso por ignición. El objetivo de este estudio fue optimizar el análisis químico del carbono orgánico de los suelos, eliminando la interferencia de Cl^- de la oxidación crómica, vía húmeda, y reduciendo las fuentes de error encontradas en esta determinación rutinaria de laboratorio.

Palabras clave: Materia orgánica, análisis de carbono, digestión húmeda, interferencia de cloruros.

SUMMARY

Experimental conditions that allow interference-free chromic wet-acid digestion and effective determination of organic carbon in soils were studied. Different oxidants, variable acid strength and digestion times, control of digestion heat, and complexation with metals (Hg^{2+} , Ag^+) to suppress the Cl^- interference, were tested. The methodology was conducted by digesting synthetic solutions of analytical primary standards of known carbon content (sucrose, potassium biphthalate and sodium oxalate) with different oxidizing agents (KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, K_2CrO_4 , and KIO_3), in sulfuric acid, by two heating systems: the hot plate open reflux method, and the water bath method. Only the dichromic and chromic solutions proved to be useful in the study of digestion procedures since KMnO_4 and KIO_3 decomposed during heating. Chloride synthetic solutions were tested for their blank and carbon contents after treating samples with Hg^{2+} or Ag^+ . Both, chromic and dichromic acids were inefficient to suppress the Cl^- interference under the open reflux

¹ Departamento de Química. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México.

[†] Correspondencia: Apartado Postal 149, 54800 Cuautitlán, estado de México, México. (aag@servidor.unam.mx)

Recibido: Abril de 2001. Aceptado: Mayo de 2002.

Publicado en Terra 21: 21-30.

method, showing <10% of Cl⁻-interference in the labile carbon standards (sucrose and oxalate), and > 35% in the blank and non-labile carbon standard (biphtalate). Interference was completely suppressed by complexation of Cl⁻ with Hg²⁺ and Ag⁺. Whereas Ag⁺ suppressed the interference in both media when added in equivalent amounts to Cl⁻, Hg²⁺ allowed some Cl⁻ oxidation (2.3 to 6% relative to carbon) in the standards and blank solutions. Excess levels of Ag⁺ resulted in high oxidant consumption due to Ag₂CrO₄ precipitation. Heating temperature, digestion time and sulfuric concentration gave optimal results of 90 °C, 2 h and 7.2 M, respectively. The optimized methodology used to evaluate organic carbon in synthetic chloride-added primary standard solutions showed effective carbon oxidation values of about 100%, while no Cl⁻ interference was detected. The comparative analysis of the developed method showed higher results than those obtained by the Walkley-Black methodology, especially for samples with known high organic matter content, determined by loss of ignition. The objective of the study was to optimize the chemical analysis of organic carbon in soils, suppressing the Cl⁻ interference in the wet chromic oxidation, and reducing the source or errors usually found in this routine determination in laboratory.

Index words: Organic matter, carbon analysis, wet digestion, chloride interference.

INTRODUCCIÓN

La determinación del carbono orgánico de los suelos es un procedimiento que se lleva a cabo en forma rutinaria en muchos laboratorios del mundo, ya que la materia orgánica (MO) y otras propiedades físicas y químicas del suelo condicionan la fertilidad del mismo. Aunque la evaluación de la MO ha sido, y es, un tema de considerable interés, existen múltiples problemas asociados con ésta.

La mayoría de los métodos usados para evaluar el contenido de carbono orgánico están basados en la evaluación del poder reductor de la MO del suelo. De los métodos más comunes, pueden mencionarse el de Kurmies (Kurmies, 1949; Houba *et al.*, 1989), basado en la oxidación dicrómica, a temperaturas mayores que 100 °C, en H₂SO₄ 11 M (moles L⁻¹); el método espectrofotométrico (Walinga *et al.*, 1992), el cual depende fuertemente de la estabilidad del complejo (verde) del ion crómico, Cr³⁺, generado por

reducción del anion dicromato (Cr₂O₇²⁻) a altas concentraciones de ácido sulfúrico (> 10 moles L⁻¹); o bien, el método de Walkley-Black (Walkley y Black, 1934; León y Aguilar, 1987; Houba *et al.*, 1989) el más usado en el mundo, que además de requerir de una previa calibración con métodos de referencia, esto es, aquéllos basados en la evolución de CO₂ [método de Allison (1960); analizador cromatográfico de C, etc.], presentan serios problemas experimentales. Todos estos métodos sufren de una o más de las siguientes inconveniencias analíticas: 1) la oxidación incompleta y variable del carbono orgánico, debido a las bajas e incontroladas condiciones de calor de digestión, que dependen exclusivamente de la exotermia de la reacción del sistema H₂SO₄-H₂O y, por lo tanto, de la rapidez de la adición del ácido; 2) los bajos tiempos de reacción; 3) condiciones variables de acidez sulfúrica usadas en diferentes laboratorios, las cuales modifican las condiciones oxidantes del medio y la temperatura de reacción; 4) la interferencia de diversos agentes reductores (Cl⁻, S²⁻, MnO₂-activo y Fe²⁺-libre) que resulta en la sobrestimación de los valores de la materia orgánica de los suelos (MOS); 5) la adición y manejo de metales caros o contaminantes del medio ambiente (Ag⁺ y Hg²⁺) supresores de la interferencia por Cl⁻; 6) la evaluación visual del punto estequiométrico, debido a la incertidumbre en la detección del vire de color de los indicadores redox (difenilamina, orto-fenantrolina ferrosa, etc.); 7) la inestabilidad del titulante ferroso (Fe²⁺) a la luz y a la oxidación del aire, lo cual provoca una importante inversión de tiempo en la valoración diaria de este analito; y 8) la aplicación de factores numéricos de corrección por oxidación incompleta del carbono de los suelos (Walkley y Black, 1934; León y Aguilar, 1987; Houba *et al.*, 1989), o por la interferencia de cloruros (Hesse, 1971; Jackson, 1976).

Otro método utilizado comúnmente en la determinación de la materia orgánica de los suelos es el de pérdida de peso por ignición (Nelson y Sommers, 1982; Houba *et al.*, 1989), sin embargo, también presenta algunas inconveniencias debido a la descomposición o volatilidad de ciertos componentes del suelo (CaCO₃, H₂O_(e) y NaCl) lo que sobreestima el valor de la MOS.

En este estudio, estos problemas se han reformulado con la finalidad de establecer un método razonablemente rápido, de alta precisión y selectivo, es decir, libre de los problemas experimentales e

interferencias más comunes encontrados en la determinación.

Con el fin de reducir y evitar diversos problemas experimentales involucrados en el análisis, vía húmeda, del carbono orgánico de los suelos, se planteó el uso de agentes oxidantes (MnO_4^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, CrO_4^{2-} y IO_3^-) en medio ácido, el control del tiempo y calor de reacción de digestión, la adición de agentes complejantes (Hg^{2+} y Ag^+) para eliminar la interferencia de Cl^- a cualquier concentración, principalmente, la cual, debido a su oxidación cuantitativa, se presenta a temperaturas mayores que 190°C . Otros posibles interferentes (MnO_2 -activo, Fe^{2+} -libre, S^{2-} -libres) difícilmente se encuentran en muestras de suelos secas y bien aireadas.

También se consideró necesario investigar nuevas condiciones que permitan la completa eliminación de la interferencia por cloruros, sin la adición de metales complejantes, al mismo tiempo que se mantengan condiciones óptimas de oxidación de la MOS.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron sustancias químicas de grado analítico. Se prepararon soluciones de: agentes oxidantes; 0.17 M $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 0.33 M K_2CrO_4 , 0.2 M KMnO_4 y 0.2 M KIO_3 ; titulante; 0.5 M (0.4808 M a la valoración) $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; agentes complejantes; 0.5 M AgNO_3 , 0.5 M $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$; estándares primarios de carbono orgánico; 0.14 M sacarosa ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$), 0.13 M ftalato ácido de potasio ($\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$), y 0.5 M oxalato de sodio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$); interferente; HCl 4.0 M.

Los estudios de oxidación de carbono orgánico se llevaron a cabo en soluciones sintéticas a través de una digestión vía húmeda, bajo las variables que definen los componentes de variación, según se muestra en el Cuadro 1. Las soluciones sintéticas se prepararon con los estándares analíticos primarios sacarosa, biftalato de potasio y oxalato de sodio, de contenidos de carbón conocidos, con diferentes agentes oxidantes (KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, K_2CrO_4 y KIO_3) en medio ácido (H_2SO_4) de concentración variable (0.72, 1.44, 2.16, 2.88, 3.6 y 7.2 M), a cinco tiempos de digestión (1.5, 2, 3, 4 y 4.5 h), con temperatura controlada, bajo dos métodos de digestión: el método de reflujo abierto de alta temperatura (APHA-AWNA-WPCF, 1985; Aguirre, 1995), en parrilla de calentamiento, a temperatura cercana a la ebullición, y el método de temperatura

moderada, en baño María a 90°C . Se prepararon blancos de digestión (soluciones con la mezcla de digestión, pero sin carbono orgánico). La reacción se terminó al enfriar y diluir con agua destilada. La cantidad remanente de oxidante no consumido se tituló con sulfato ferroso, siguiendo la titulación por el método visual, usando como indicador la *o*-fenantrolina ferrosa, como por el método potenciométrico, usando un potenciómetro estándar y los electrodos de platino y de vidrio para pH, como electrodo indicador y de referencia, respectivamente. Todas las mediciones de volumen se realizaron con pipetas volumétricas calibradas. Todas las digestiones y determinaciones se hicieron por duplicado.

Método de Reflujo Abierto

Las digestiones se llevaron a cabo en parrillas de calentamiento Thermolyne (tipo 2200), en matraces volumétricos de 50 mL de acuerdo con el procedimiento reportado por Standard Methods (APHA-AWNA-WPCF, 1985), y modificado por Aguirre (1995). A la mezcla de reacción con 3 mmoles(+) de C (de los estándares primarios), y a los blancos, con y sin 8 mmoles(-) de Cl^- , se le adicionaron 5 mL de solución de agente oxidante y 5 mL de ácido sulfúrico concentrado (98%, 1.84 g cm^{-3}). Las soluciones se calentaron justo por debajo del punto de ebullición de la mezcla por 2 h, permitiendo que por reflujo, los vapores se condensaran a la mitad del cuello del matraz. Después de enfriar la mezcla, se aforó a 50 mL, y dos (o más) alícuotas de 10 mL se valoraron con la solución de sulfato ferroso 0.4808 M, hasta el punto de equivalencia, marcado por el evidente salto de aproximadamente 300 mV en la lectura del potenciómetro.

Cuadro 1. Variables de estudio que definen los componentes de variación de la evaluación

Oxidantes:	K_2CrO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, KMnO_4 , KIO_3
Titulante: Sulfato ferroso:	FeSO_4
Estándares primarios:	Sacarosa ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) Biftalato de potasio: $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ Oxalato de sodio: $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$
Agentes complejantes:	Hg^{2+} , Ag^+
Interferente:	Cl^-
Molaridad de ácido sulfúrico:	0.72, 1.44, 2.16, 2.88 y 7.2
Tiempo de digestión:	1.5, 2, 3, 4 y 4.5 h

Digestiones en Baño María

Las digestiones se realizaron en tubos de digestión en un baño María Polyscience, modelo 20I-M, con control digital de temperatura. A las mezclas de reacción con 3 mmoles(+) de C, de los estándares primarios, y a los blancos, con o sin Cl⁻, y con o sin los agentes complejantes (Hg²⁺, Ag⁺), se le adicionaron 5 mL de solución de agente oxidante y 5 mL de ácido sulfúrico concentrado (98%, 1.84 g cm⁻³). Las muestras se calentaron a 90 °C por 1.5, 2, 3, 4 y 4.5 h, o para la metodología ya optimizada, por 2 h. La reacción se terminó al adicionar agua destilada hasta completar un volumen final de aproximadamente 100 mL. Las mezclas entonces se valoraron con solución de sulfato ferroso 0.4808 M, hasta el punto de equivalencia.

Estudios de Interferencia

Estas determinaciones se realizaron adicionando a blancos y a muestras paralelas, sin o con 5 mmoles(+) de C de los estándares primarios, cantidades de 8 mmoles de Cl⁻, en forma de HCl en 25 mL de solución, lo que simularía salinidades clorhídricas de aproximadamente 32 dS m⁻¹ de conductividad eléctrica (CE).

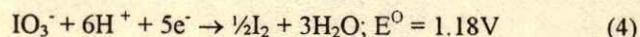
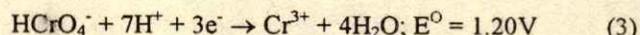
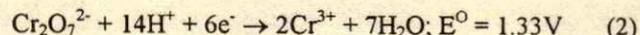
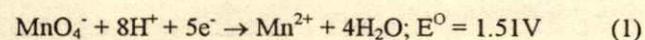
Determinaciones en Suelos

De forma comparativa al método de Walkley-Black (León y Aguilar, 1987), la determinación del C-orgánico se realizó, en cantidades que variaron de 0.2 a 2 g de suelo, por el método desarrollado aquí, con ambos sistemas, crómico (K₂CrO₄, 0.33 M) y dicrómico (K₂Cr₂O₇, 0.17 M) en H₂SO₄ 7.2 M con un tiempo de digestión de 2 h a 90 °C en baño María.

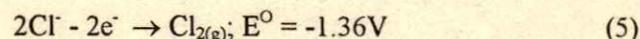
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Agentes Oxidantes

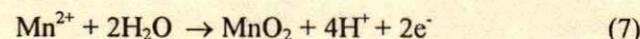
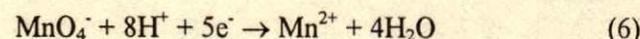
Los estudios sobre la factibilidad de usar diversos agentes de diferente fuerza relativa de oxidación se realizaron por el método de reflujo abierto. De los agentes oxidantes evaluados, con los potenciales redox de reacción siguientes:



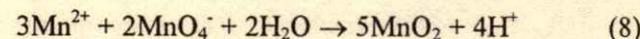
sólo las mezclas dicrómica (Cr₂O₇²⁻/14 H⁺) y crómica (HCrO₄⁻/7 H⁺) resultaron útiles para continuar los estudios de optimización, ya que por un lado, el ion permanganato, MnO₄⁻, siendo el más fuerte de los oxidantes con un potencial redox E(V) = 1.51, presentó, serias dificultades tanto al tratar de disminuir la interferencia por cloruros, Cl⁻, cuya reacción de media celda es:



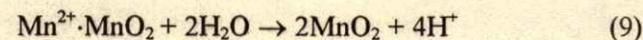
como por su alta inestabilidad química como oxidante, a altas temperaturas. Esto último parece ser causado por las altas concentraciones de ácido sulfúrico (> 10 M) y las altas temperaturas de reacción utilizadas que favorecen la descomposición catalítica del MnO₄⁻, por el ion manganoso, Mn²⁺, producido durante la reacción de oxidación del carbono orgánico, de acuerdo con la siguiente serie de reacciones:



La suma algebraica de las dos ecuaciones electrónicamente balanceadas, da:



El Mn²⁺ es, en realidad, autooxidado catalíticamente (Aguirre, 2001) al óxido café negruzco de dióxido de Mn(IV), MnO₂, durante la digestión, según la reacción:

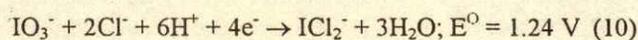


Esta reacción puede proceder sin fin hasta el límite de concentración del agente oxidante, especialmente a altas temperaturas, ya que en frío la reacción es muy lenta, en particular en medios ácidos.

Las reacciones esquematizadas arriba son favorecidas debido al aumento en el poder oxidante del MnO₄⁻, causado también por las altas

molaridades de ácido sulfúrico. La diferencia de potencial, ΔE , alcanzada a concentraciones de 10 M de H_2SO_4 es del orden de los 80 mV. Este valor se obtiene de aplicar la ecuación de Nernst para sistemas redox en equilibrio que, para este caso particular, resulta de evaluar ΔE para concentraciones de 1 mmol(+) L^{-1} (0.2 M) de oxidante permangánico, a dos diferentes molaridades de ácido sulfúrico. Según la Reacción 1, una concentración de H^+ de ocho veces la molaridad del MnO_4^- , daría valores de 1.6 M de H_2SO_4 . Puede demostrarse teóricamente que para concentraciones de 10 M de H_2SO_4 , ΔE alcanzaría valores cercanos a 80 mV, que sumados al valor estándar original de 1.51 V, más un incremento extra de 15 a 35 mV debido al efecto causado por el incremento de temperatura de 25 °C (298 K) a cerca de 100 a 200 °C (373-473 K), resultaría en potenciales redox de cerca de $E \approx 1.59$ a 1.62 V, incrementando el poder oxidante del medio en más de 100 mV. Esto resultaría, consecuentemente, en una mayor probabilidad de interferencia de los iones cloruro, Cl^- .

El KIO_3 , por otro lado, a altas temperaturas, tampoco mostró estabilidad como oxidante en presencia de Cl^- , debido a una rápida y evidente descomposición de acuerdo con la reacción redox siguiente:



por este hecho, resulta no recomendable para continuar los estudios

Los sistemas crómico ($HCrO_4^-$) y dicrómico ($Cr_2O_7^{2-}$), debido a su mayor estabilidad, con respecto al yodato (IO_3^-) y al permanganato, MnO_4^- , y su menor potencial redox, relativo al MnO_4^- , mostraron menor selectividad por el par redox $2Cl^-/Cl_2$. Basados en estos resultados, se decidió continuar los estudios sólo con ambos oxidantes crómicos.

Los sistemas crómico y dicrómico, aunque dieron resultados excelentes en cuanto a la oxidación del carbón orgánico (recuperaciones de C-orgánico de 98 a 100%), mostraron amplios intervalos de interferencia por Cl^- , del orden de 3 a 39%, según los resultados mostrados en el Cuadro 2. Este cuadro también muestra, cómo la oxidación del C-orgánico se favorece con respecto a la oxidación de Cl^- , ya que en el blanco, en ausencia de C, se obtuvo un alto porcentaje de interferencia por cloruros en ambos

sistemas crómicos. Resulta de interés observar cómo, en ausencia de C-orgánico (Blanco) o en presencia del estándar primario aromático biftalato de potasio, de relativamente difícil oxidación, los niveles de interferencia fueron mayores. Por otro lado, los porcentajes de interferencia de Cl^- en presencia de los otros dos compuestos modelo, oxalato y sacarosa, fueron bajos (2.7 a 9.3 %), lo cual muestra cómo la preferencia de oxidación entre los iones cloruro y el carbono orgánico fácilmente oxidable, es mucho más marcada en favor de este último. Aunque algunos autores (Hesse, 1971; Jackson, 1976; Norma Oficial Mexicana, 2000) han sugerido la aplicación de un factor numérico de corrección para la interferencia de cloruros en muestras de suelo; este resulta dudoso, principalmente debido a la parcial e incierta oxidación paralela de cloruros en la determinación del C-orgánico.

A partir de estos resultados, se pensó que el sistema crómico, con semireacción de media celda redox de $HCrO_4^- + 7H^+ \rightarrow Cr^{3+} + 4H_2O$ ($E^0_{red} = 1.20 \text{ V}$) podría ser más controlable que el sistema dicrómico, que obedece la semireacción: $Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ \rightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$ ($E^0_{red} = 1.33 \text{ V}$), esto en términos de evitar la interferencia por la oxidación paralela de los cloruros, según la semireacción: $2Cl^- \rightarrow Cl_{2(g)}$ ($E^0_{ox} = -1.36 \text{ V}$). Sin embargo, el método de digestión de reflujo abierto, aplicado en parrilla de calentamiento, como sugieren algunas metodologías empleadas en los análisis de aguas de tratamiento y naturales (APHA-AWNA-WPCF, 1985), da aún cierta oxidación de Cl^- , con ambos sistemas oxidantes, probablemente debido a los altos valores de temperatura alcanzados, lo que podría catalizar la reacción de descomposición de los $Cr_2O_7^{2-}$ a $HCrO_4^-$, a CrO_2Cl_2 (Nelson y Sommers, 1982), de acuerdo con la reacción: $6H^+ + Cr_2O_7^{2-} + 4Cl^- \rightarrow 2CrO_2Cl_2 + 3H_2O$. El cloruro de cromilo

Cuadro 2. Porcentajes de interferencia de la oxidación de muestras sintéticas, con y sin 3 mmoles(+) de carbono orgánico, causados por la presencia de un exceso de 8 mmoles(-) de cloruro, con respecto a 5 mmoles(+) de oxidante, y porcentajes de carbono recuperado, oxidado, expresado como recuperación relativa (%RR), entre paréntesis.

Sistema	Blanco (sin carbono)	Biftalato	Oxalato	Sacarosa
	----- % -----			
$CrO_4^{2-}/7H^+$	36	29 (92.3)	2.7 (98.2)	5.7 (100)
$Cr_2O_7^{2-}/14H^+$	38	39 (93.6)	4.0 (100)	9.3 (98.7)

(CrO_2Cl_2) puede, a su vez, descomponerse a temperaturas de $190\text{ }^\circ\text{C}$, lo que resulta probable, pues la mezcla puede alcanzar calores de reacción cercanos a los de la ebullición de la solución ($T_{\text{eb}} = 210\text{ }^\circ\text{C}$).

Estudios de Complejación

Algunos autores reportan cierta efectividad en la eliminación de la interferencia de cloruros, cuando ciertos metales supresores, por ejemplo, Ag^+ (Quinn y Salomon, 1964; Houba *et al.*, 1989) y Hg^{2+} (Snoeyink y Jenkins, 1980) se adicionan a soluciones que contienen Cl^- . Estos dos metales complejantes se probaron en exceso y en cantidades equivalentes a los iones cloruro. Los estudios mostraron que el Ag^+ eliminó completamente la interferencia de Cl^- , precipitándolo como AgCl , tanto en el sistema crómico, como en el dicrómico, cuando el metal se adicionó en cantidades equivalentes. El ion mercuríco, Hg^{2+} , en el sistema crómico, por otro lado, no eliminó totalmente la interferencia de los iones cloruro (formando el complejo estable de HgCl_2), oxidando bajos porcentajes de éstos, del orden de 2.3% para la sacarosa, 2.4% para el oxalato, 5.6% para el biftalato de potasio y 6% en el blanco. El sistema dicrómico mostró mejores resultados con Hg^{2+} como agente supresor de Cl^- , obteniéndose valores de 0% de oxidación de Cl^- en todos los casos. Debe mencionarse que el ion plata (I), Ag^+ , cuando se adicionó en exceso con respecto a los iones cloruro, tiende a dar resultados altos de consumo de oxidante debido a la precipitación del cromato de plata, Ag_2CrO_4 . Esta reacción de precipitación disminuye el poder oxidante de ambas soluciones, crómica y dicrómica, al consumir cantidades extra de CrO_4^{2-} inmovilizando al Cr(VI) en la fase sólida, y dando lugar a bajos valores de recuperación de oxidante no gastado; con esto se sobrestima la valoración del C-orgánico. Los resultados de este tratamiento no se reportaron al no poder obtenerse datos confiables debido a esta precipitación. Aunque la complejación de Cl^- con Hg^{2+} (en ambos tratamientos) y con Ag^+ (cuando se adicionó en cantidades equivalentes) dio excelentes resultados de supresión con ambos oxidantes, su uso es poco recomendado debido a su alta toxicidad para los organismos, a su riesgo como agentes contaminantes del medio ambiente, en especial el ion mercuríco, Hg^{2+} (McBride, 1994; Ross, 1994), y su alto costo como reactivos analíticos, principalmente la plata.

De los resultados obtenidos de los dos experimentos anteriores, se decidió dejar de lado el uso de los agentes complejantes Hg^{2+} y Ag^+ , e investigar la posibilidad de reducir a 0% la interferencia de los iones cloruro, modificando sólo la concentración de ácido sulfúrico y el tiempo de digestión, con temperaturas moderadas para evitar la reacción de descomposición de cromatos a cromilos y cambiando el método de reflujo abierto por uno de control de temperatura más estricto y por debajo de la ebullición del agua, esto es, en baño María a $90\text{ }^\circ\text{C}$. Entonces, se estudió la variación del poder oxidante (potencial redox, E) del sistema crómico, en función de la molaridad del ácido sulfúrico y del tiempo de digestión para disminuir el poder oxidante del medio e incrementar la preferencia relativa de oxidación por el C-orgánico, en contraste con los iones cloruro, pero sin sacrificar la oxidación eficiente del carbono de la materia orgánica. Además, se cambió de la evaluación visual del punto de equivalencia, a la potenciométrica, con base en estudios previos y en procedimientos analíticos sugeridos en la literatura (Houba *et al.*, 1989).

Poder Oxidante

La Figura 1 muestra la variación del poder oxidante (E) del cromato de potasio K_2CrO_4 , en función de la molaridad de ácido sulfúrico. La

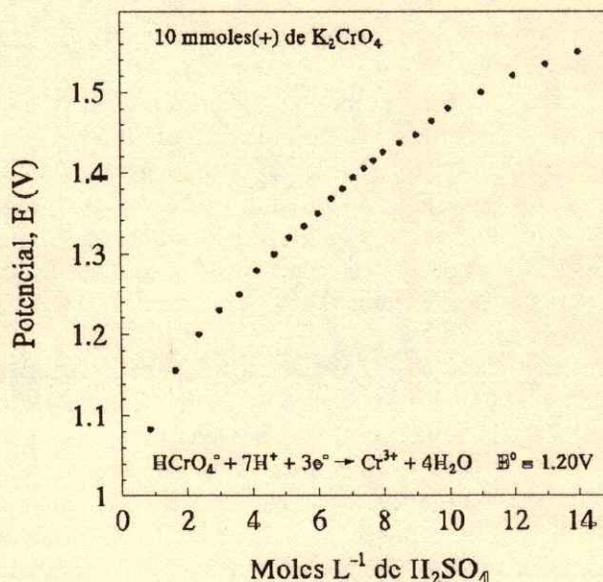


Figura 1. Efecto de la molaridad del ácido sulfúrico sobre el potencial redox, E(V), del sistema crómico.

gráfica muestra que a mayor concentración de ácido, mayor es el poder oxidante y mayor es la posibilidad de interferencia por cloruros, ya que el potencial de reducción de media celda del sistema crómico se incrementa con la concentración del H_2SO_4 .

De este estudio, se pensó en controlar la concentración de ácido sulfúrico del medio de reacción, a fin de reducir, en lo más posible, el poder oxidante del medio, considerando que el aumento de temperatura produciría un aumento de potencial menor que el producido por el aumento de acidez, además de que el aumentar el tiempo de digestión permitiría mantener la temperatura lo suficientemente baja como para limitar la reacción de interferencia de los iones cloruro. Por tal motivo, se decidió investigar el mínimo de concentración de ácido sulfúrico necesaria para oxidar completamente el C-orgánico, partiendo de lo dictado por la estequiometría de las Reacciones 2 y 3. Al mismo tiempo, se consideró estudiar el comportamiento de la oxidación crómica en función del tiempo de digestión, a diferentes concentraciones de ácido (Figura 2).

Molaridad de Ácido Sulfúrico

La Figura 2 muestra la variación del porcentaje de C-oxidado, con el aumento de la molaridad de ácido sulfúrico. Las curvas para ambos sistemas, crómico y dicrómico, sugieren que a concentraciones de H_2SO_4 de 7.2 M, la oxidación del carbono (como biftalato de potasio), bajo las condiciones de temperatura y tiempo de digestión señalados, es completa. De este experimento, es notorio que no es necesario incrementar desmesuradamente la cantidad de ácido sulfúrico en el medio de reacción, según recomiendan otras metodologías (Kurmies, 1949; Jackson, 1976; León y Aguilar, 1987; Houba *et al.*, 1989; Norma Oficial Mexicana, 2000), ya que una concentración del orden de 7.2 M es suficiente para lograr la eficiente oxidación del C-orgánico, al menos de los compuestos modelo usados aquí. Cabe mencionar que el estándar primario, biftalato de potasio, representa la factibilidad química de oxidar compuestos aromáticos de difícil degradación y ataque químico. De este estudio, se desprende que el uso de menores molaridades de ácido sulfúrico, no sólo representa una disminución importante del riesgo de interferencias, sino también un ahorro de ácido.

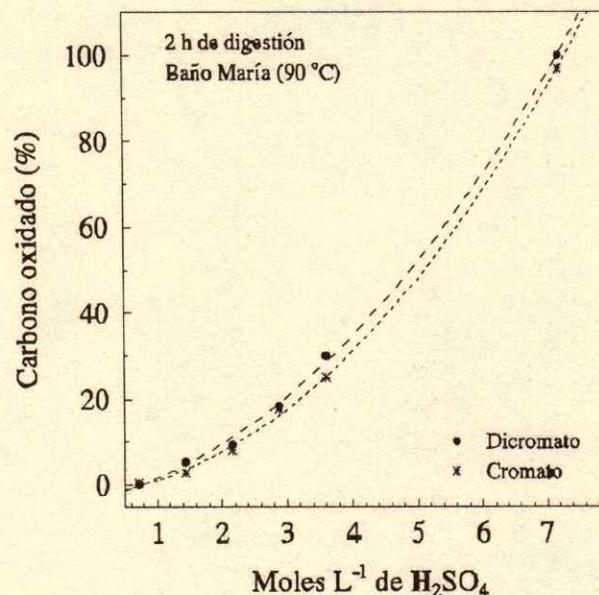


Figura 2. Efecto de la molaridad del ácido sulfúrico sobre el porcentaje de carbono oxidado, para el estándar primario biftalato de potasio ($KHC_8H_4O_4$) con ambos oxidantes; dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) y cromato ($HCrO_4^-$).

Tiempo de Digestión

La Figura 3 muestra el comportamiento del valor de porcentaje de C-oxidado en función de las variables tiempo de digestión y molaridad de ácido sulfúrico. Las curvas, graficadas sólo para el sistema crómico ($HCrO_4^-/H_2SO_4$), claramente manifiestan las condiciones óptimas de uso del sistema oxidante estudiado. Aunque con tiempos de digestión de 1.5 h, a una concentración de 7.2 M, se obtuvo 100% de oxidación, se consideró como adecuado, un tiempo de digestión de 2 h y una concentración de ácido sulfúrico máxima del medio de digestión de 7.2 M, lo que significaría la adición de sólo 8 mL de ácido sulfúrico concentrado (98%, $d = 1.84 \text{ g mL}^{-1}$), en 20 mL de solución, o bien, de 10 mL en 25 mL de mezcla de reacción. Cabe mencionar, sin embargo, que existe la posibilidad de que en tiempos de digestión menores que 1.5 h pudiera alcanzarse la oxidación eficiente del carbono orgánico, para lo cual habrá que continuar indagando en este punto.

De este estudio, también se desprende la importancia de no elevar la temperatura de la mezcla de digestión en forma descontrolada o desmesurada. Por el contrario, la regulación del calor de reacción a

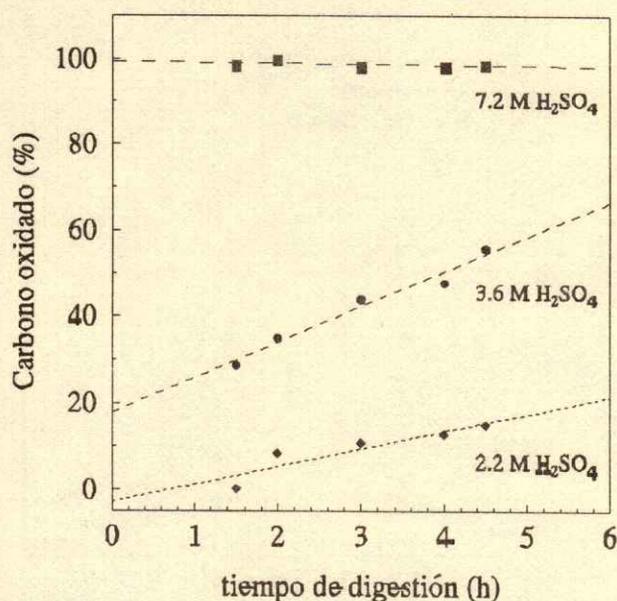


Figura 3. Efecto de la molaridad del ácido sulfúrico y tiempos de digestión en el porcentaje de carbono orgánico oxidado, para el estándar primario biftalato de potasio.

relativamente bajas temperaturas ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), asegura que el poder de oxidación de ambos sistemas, crómico y dicrómico, se mantenga dentro de ciertos límites, lo cual podría ser crítico en la eliminación de la interferencia de los cloruros, logrando además, una digestión de las muestras más homogénea, así como una mayor reproducibilidad en los resultados de la determinación del carbono orgánico de los suelos.

Prueba de la Oxidación Crómica

De los resultados anteriores sobre el efecto que el poder oxidante, la molaridad de ácido sulfúrico y el tiempo de digestión tuvieron sobre la oxidación eficiente del carbono orgánico, se decidió evaluar, exclusivamente, la efectividad del sistema crómico, $\text{HCrO}_4^-/7\text{H}^+$, como oxidante de las soluciones sintéticas de estándares primarios y suelos, obedeciendo las condiciones experimentales seleccionadas en este estudio, que fueron: 2 h de digestión, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura (en baño María) y una concentración de ácido de 7.2 M de H_2SO_4 .

El sistema crómico ($\text{HCrO}_4^-/7\text{H}^+$) mostró nula selectividad por el par redox $2\text{Cl}^-/\text{Cl}_2$ sin y con la presencia de C-orgánico, en las condiciones experimentales elegidas. Todos los valores de porcentaje de oxidación de carbono fueron cercanos

a 100 [recuperaciones relativas (%RR) de: 99.95% sacarosa; 100.8% oxalato; 98.2% biftalato] presentándose un nulo consumo de los 8 mmoles(-) de cloruro presentes, tanto en las muestras blanco (sin carbono orgánico), como en las que contenían 3 mmoles(+) de C-orgánico.

La diferencia de potencial de 200 mV adquirida por la adición de H_2SO_4 , para dar la concentración óptima de 7.2 M (Figura 1), le confiere al sistema crómico un poder oxidante de aproximadamente 1.40 V, valor apenas mayor que los potenciales estándares de reducción del sistema $2\text{Cl}^-/\text{Cl}_2$, que es $E^{\circ} = 1.36\text{ V}$, y del $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}/14\text{H}^+$, que es $E^{\circ} = 1.33\text{ V}$, este último en condiciones de acidez de 2.3 M, y a concentraciones de 0.17 M de dicromato, según la estequiometría de la Reacción 2. Cabe mencionar que el sistema dicrómico, con un potencial de 130 mV mayor que el del sistema crómico ($\text{HCrO}_4^-/7\text{H}^+$) presentaría, en las mismas condiciones, un potencial de $E = 1.55\text{ V}$, mayor que el del fuerte oxidante KMnO_4 ($E^{\circ} = 1.51\text{ V}$), incrementando, por este simple hecho, la probabilidad de interferencias.

Muestras de Suelos

Se analizaron ocho materiales de los programas internacionales de intercambio de muestras de suelos, con sede en la Universidad Agrícola de Wageningen, Holanda. El Cuadro 3 muestra algunos datos y propiedades importantes de los materiales, así como también los valores comparativos de porcentaje de C-orgánico obtenidos por el método propuesto, aplicado con ambos sistemas dicrómico y crómico, y el método universal (Walkley y Black, 1934).

Los resultados de estas determinaciones muestran que ambos sistemas oxidantes dieron resultados similares de C-orgánico oxidado y mayores que el método de Walkley-Black (1934), al menos para tres de las muestras, en especial las 912 y 946, que mostraron, según lo reportado (Houba, 1988-2000), altos valores de MO_i , medidos por el método de pérdida de peso por ignición, lo cual no implica que la totalidad del valor se deba a la presencia de material orgánico, debido a posibles interferencias (Jackson, 1976; Houba *et al.*, 1989), principalmente de CaCO_3 , $\text{H}_2\text{O}_{(c)}$ y NaCl , pero en especial debido a la presencia de cantidades altas de *lutum*, esto es, partículas de arcilla, fracción $< 2\text{ }\mu\text{m}$ (Houba *et al.*, 1989). Cabe mencionar que mientras

Cuadro 3. Número y tipo de muestra de suelo, y algunas de sus propiedades analíticas, del Programa Internacional de Intercambio de Muestras de Suelo, ISE, de la Universidad Agrícola de Wageningen, Holanda.

Muestra	País	Tipo de suelo [†]	pH		CE	CaCO ₃	P < 2 μm [†]	MO _i [§]	C _{WB} [¶]	C _{Dcr} [#]	C _{Cr} ^{††}
			H ₂ O 1:2	1:5 dS m ⁻¹							
912	Suiza	Loess	5.62	11.3	0.3	40.5	11.8	2.5	3.4	3.5	
933	Alemania	Franco	6.90	19.3	-	13.6	4.7	1.3	1.6	1.6	
934	Holanda	Loess encalado	7.80	19.5	6.2	17.8	4.7	1.2	1.2	1.3	
946	Holanda	De marisma	7.72	8.2	14.3	33.2	16.5	3.0	3.5	3.7	
956	Grecia	Arcillo-arenoso	8.10	15.9	17.2	21.0	3.5	0.6	0.5	0.7	
959	Mali	Arenoso	6.11	3.3	0.1	8.0	1.3	0.3	0.2	0.2	
975	Alemania	Párido ácido	4.40	3.72	-	23.0	3.6	0.3	0.4	0.4	
981	Holanda	Arenoso	6.58	17.0	0.2	3.9	4.2	1.6	1.7	1.6	

[†] En los reportes internacionales de suelos no se incluye la clasificación taxonómica de los materiales. [†] P < 2 μm = partículas < 2 μm; [§] MO_i = materia orgánica: pérdida por ignición; [¶] WB = método Walkley-Black; [#] DCr = sistema dicrómico; ^{††} Cr = sistema crómico.

la Muestra 946 presentó valores altos de MO_i, tal vez debido a interferencias de CaCO₃, las Muestras 912 y 933 lo hicieron probablemente debido a su alto contenido de sales (alta CE).

Debe mencionarse que tanto el control de la concentración del ácido sulfúrico, como el de la temperatura, parecen ser los factores más importantes en el control y selectividad de la oxidación crómica del carbono orgánico, tanto de las muestras sintéticas, como de las muestras de suelos. Sin embargo, según los equilibrios químicos acuosos y de especiación del sistema H₂CrO₄/H₂Cr₂O₇ reportados en la literatura (Greenwood y Earnshaw, 1994), tanto el tipo de acidez, como la concentración, influyen en forma determinante en la especiación de estos dos agentes oxidantes. Más estudios se realizarán para determinar completamente qué especie química, el ácido crómico (H₂CrO₄) o el dicrómico (H₂Cr₂O₇), es la dominante en el medio oxidante, en las molaridades de ácido sulfúrico elegidas, ya que puede presentarse un equilibrio de coexistencia de ambos ácidos a elevados valores de acidez.

Aunque estos estudios se encuentran muy avanzados, los resultados obtenidos todavía sugieren que la determinación de materia orgánica puede estudiarse más a fondo, esto en términos, tanto de su selectividad hacia medir exclusivamente el contenido de carbono orgánico, como de optimar también la etapa de titulación analítica del exceso remanente de oxidante, donde se emplea el ion ferroso (Fe²⁺) como titulante. En próximos estudios se realizarán las investigaciones pertinentes, a modo de contrastar la metodología desarrollada aquí, con aquella sugerida por los métodos de referencia (Allison, 1935, 1960); reportado también por Jackson (1976) y por Houba

et al. (1989), o bien por el método cromatográfico (analizador de carbono).

CONCLUSIONES

- Los resultados de este estudio mostraron que los compuestos KMnO₄ y KIO₃ no fueron efectivos como agentes oxidantes, mientras que los sistemas crómico y dicrómico mostraron ser sistemas muy estables en términos de oxidar cuantitativamente el carbono orgánico de las soluciones sintéticas usadas.
- La digestión crómica por el método de reflujo abierto sugerido como óptimo para el análisis de aguas, mostró serias interferencias de cloruros y poca reproducibilidad en los resultados.
- Aunque la interferencia de los iones cloruro pudo disminuirse con la adición de los agentes complejantes Ag⁺ o Hg²⁺, más efectivamente con el primero, los argumentos económicos y ambientales inherentes al uso de estos dos metales hacen dudosa su recomendación.
- Los resultados obtenidos muestran que al usar un medio menos oxidante, como el sistema crómico, HCrO₄⁻/H₂SO₄, en lugar del sistema dicrómico Cr₂O₇²⁻/H₂SO₄, la interferencia por Cl⁻ puede evitarse, en especial bajo condiciones de temperatura, tiempo de reacción y molaridad de ácido sulfúrico, controladas.
- La temperatura, el tiempo de digestión y la concentración de ácido sulfúrico, bajo las condiciones de experimentación, dieron resultados óptimos de 90 °C, 2 h y 7.2 M, respectivamente.
- Los resultados obtenidos a través de la aplicación de los métodos crómico y dicrómico óptimos mostraron, comparativamente con el método de Walkley-Black (1934), mayores porcentajes de

oxidación de carbono orgánico, en especial en el caso de muestras con alto contenido de MO_i (por ignición), según valores reportados en la literatura.

LITERATURA CITADA

- Aguirre G., A. 1995. Electrochemical studies of cadmium, copper, lead and zinc complexation in synthetic and soil solutions. Ph.D. Dissertation. Cornell University. New York.
- Aguirre G., A. 2001. Química de los suelos ácidos, templados y tropicales. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. Cuautitlán, México.
- Allison, L.E. 1935. Organic matter determination by reduction of chromic acid. *Soil Sci.* 40: 311-320.
- Allison, L.E. 1960. Wet combustion apparatus and procedure for organic and inorganic carbon in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24: 36-40.
- APHA-AWNA-WPCF. 1985. Standard methods for the examination of water and waste water. Open reflux method 508.532-535, 16th ed. APHA-AWNA-WPCF. New York.
- Greenwood, N.N. y A. Earnshaw 1984. Chemistry of the elements. Pergamon Press. Oxford, U.K.
- Hesse, P.R. 1971. A Textbook of Soil Chemical Analysis. Chemical Publishing. New York.
- Houba, V.J.G. 1988-2000. Reports of the International Soil Analytical Exchange Program for Soils. Department of Soil Science and Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Houba, V.J.G., J.J. van der Lee, I. Novozamsky e I. Walinga. 1989. Soil and plant analysis: A Series of Syllabi. Part 5. Soil Analysis Procedures. Department of Soil Science and Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Jackson, M.L. 1976. Análisis químico de suelos. 3a ed. Trad. al español por José Beltrán Martínez. Omega. Barcelona, España.
- Kurmies, B. 1949. Determination of humus by the dichromate method without potassium iodide. *Z. Pflanzenern. Dueng. Bodenk.* 44: 121-125.
- León A., R. y A. Aguilar. S. 1987. Materia orgánica. pp. 85-91. In: A. Aguilar S., J.D. Etchevers y J.Z. Castellanos R. (eds.). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- McBride, M.B. 1994. Environmental chemistry of soils. Oxford University Press. New York.
- Nelson, D.W. y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. pp. 539-579. In: A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). Methods of soil analysis. Part 2. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Norma Oficial Mexicana. 2000. PROY-NOM-021RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos: Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. Tomo DLXV, No. 12. 17 Octubre de 2000. México, D.F.
- Quinn, J.G. y M. Salomon. 1964. Chloride interference in the dichromate oxidation of soil hydrolyzates. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28: 446.
- Ross, S.M. 1994. Toxic metals in soil-plant systems. John Wiley. Chichester, UK.
- Snoeyink, V.L. y D. Jenkins, 1980. Water chemistry. John Wiley. New York.
- Walinga, I., M. Kithome, I. Novozamsky, V.J.G. Houba y J.J. van der Lee. 1992. Spectrophotometric determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23(15 y 16): 1935-1944.
- Walkley, A y T.A. Black 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.

INTERACCIÓN Zn-Cd EN EL SUELO Y MAÍZ

Cd-Zn Interaction in Soil and Corn Plants

R. Carrillo-González^{1†}, J. Cruz-Díaz¹ y L.J. Cajuste¹

RESUMEN

Los elementos potencialmente tóxicos, como As, Cd, Ni y Pb, introducidos a los ecosistemas con diversos residuos, pueden afectar los procesos de absorción y retención de elementos esenciales en la superficie del suelo, así como su disponibilidad para los organismos. Dentro de la planta también pueden alterar el balance en los nutrimentos. En la literatura sobre el tema se reportan diferentes interacciones entre Cd y Zn dependiendo de la concentración de cada elemento y de la especie vegetal usada en los experimentos. El presente estudio se realizó con el fin de generar información sobre la interacción entre Cd y Zn adicionados al suelo y su absorción por maíz. Se aplicaron dosis crecientes de Cd y Zn en dos suelos calcáreos (agrupados en la serie Progreso) colectados en Hidalgo, México. Se sembró maíz en invernadero y después de 45 días se analizaron microelementos y Cd en suelo y follaje. En el suelo Tlaxcoapan, la adición de Zn incrementó ligeramente el Cd intercambiable; en el Tlathuelilpan, el DTPA-Cd se redujo al aumentar la concentración del Zn; esto sugiere competencia por la solución extractante. La sorción de Cd en la superficie del suelo fue modificada por el Zn, también la isoterma de adsorción de Zn cambió al añadirse Cd en la solución de equilibrio. A concentraciones altas de Zn = 30 mg kg⁻¹ en presencia de Cd = 40 mg kg⁻¹ ó más, se observó una reducción en la asimilación de Zn por la planta. La adición de Zn atenuó el efecto negativo del Cd en la producción de materia seca de maíz.

Palabras clave: Contaminación, metales pesados, absorción de metales.

SUMMARY

The potentially toxic elements such as As, Cd, Ni, and Pb, introduced into the ecosystems with a number of residues, may affect the retention mechanisms of essential elements at the soil surface and their availability to the organisms. Inside the plant tissues, the nutrient balance may also change. The available literature describes a wide range of possible Cd and Zn interactions including antagonistic and synergistic effects depending on metal concentration and plant species. This study was carried out in order to obtain information about the effect of Cd applied to soils on the Zn availability and uptake by corn. Increasing doses of Cd and Zn were applied to two calcareous soils (Progreso soil series) from the state of Hidalgo, Mexico. Corn was grown in a greenhouse and after 45 days the soil samples and corn tissue materials were collected, and microelements and Cd were analyzed. The addition of Zn to Tlaxcoapan soil resulted in a slight increase of exchangeable Cd, this may be due to the competition between these two elements for the exchangeable sites on the soil. In Tlathuelilpan soil, the Cd-DTPA decreased as a result of an increase in Zn concentration; this suggested competition between elements for extractant solution. Cd adsorption on the soil surface was modified by Zn additions, the Zn adsorption isotherms was also changed as a result of the Cd additions to the equilibrium solution. When the Zn concentration was equal to 30 mg kg⁻¹ and Cd concentration to 40 mg kg⁻¹ or more, a reduction of Zn uptake by corn plant was observed. Zn addition decreased the depressive effect of Cd on the dry matter production of corn.

Index words: Antagonism, pollution, heavy metals, metal uptake.

INTRODUCCIÓN

Los problemas de contaminación en los suelos donde se aplican residuos tóxicos y aguas residuales no tratadas que contienen metales pesados, a menudo son complejos, debido a la actividad conjunta de varios elementos (Yongming y Rimmer, 1995). En los

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

[†] (crogelio@colpos.colpos.mx)

últimos años, se han estudiado las consecuencias de la contaminación del suelo, en especial la acumulación y la disponibilidad para las plantas; sin embargo, la información sobre el efecto combinado de estos elementos y su interacción con elementos esenciales es escasa (Bjerre y Schierup, 1985; Wong *et al.*, 1986), y se han reportado resultados contradictorios o efectos nulos (Zhu-Bo *et al.*, 1997; Moral *et al.*, 1998; Welch *et al.*, 1999).

Los metales pesados pueden afectar en forma directa a los organismos, causando toxicidad a concentraciones relativamente altas (Sajwan y Ornes, 1994), también interactúan entre sí y con los nutrimentos de las plantas (Miller *et al.*, 1977), lo que puede tener un efecto indirecto sobre éstas, al incidir sobre la disponibilidad de otros elementos (McBride, 1995) y algunos procesos fisiológicos (Bazzyński *et al.*, 1980) aun en concentraciones bajas.

De acuerdo con Kabata-Pendias y Pendias (1986), estas interacciones pueden ocurrir en la superficie de la raíz y dentro de la planta y afectan la asimilación de ciertos nutrimentos y su transporte, por ejemplo Fe, Mn y Zn (Moral *et al.*, 1998; Welch *et al.*, 1999). Los elementos potencialmente tóxicos comúnmente reportados son: Cd, Pb, Ni, Cr y Zn, debido a las cantidades presentes en los residuos (Alloway, 1995; Yongming y Rimmer, 1995).

Los procesos químicos, que afectan la disponibilidad del Cd para las plantas, se han ampliamente estudiado en suelos de las regiones templadas, debido a su posible efecto tóxico en la salud humana y en la calidad del suelo. Entre los procesos que afectan la adsorción de Cd en el suelo, Alloway (1995) mencionó su competencia con otros iones como el Ca^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+} . Christensen (1984) encontró que el Zn tiene fuerte efecto inhibitorio sobre la adsorción del Cd en el suelo.

Debido a la semejanza química del Cd y Zn, su interacción ha sido la más estudiada (Sikora y Wolt, 1986). Se han descrito efectos negativos (antagónicos) y positivos (sinérgicos) entre ambos elementos (Williams y David, 1976; Welch *et al.*, 1999) o ninguna interacción (White y Chaney, 1980); esto ha causado algunas controversias al respecto (Kabata-Pendias y Pendias, 1986). Debido a esta situación, no se ha podido hacer una generalización, aunque Abdel-Sabour *et al.* (1988) observaron que el incremento en las cantidades de Zn en el suelo tiene efectos inhibitorios sobre la absorción de Cd y *viceversa*; sin embargo, la relación parece depender de la

concentración de ambos elementos y de la especie vegetal expuesta.

Cajuste *et al.* (1991), Carrillo y Cajuste (1995) y Siebe y Cifuentes (1995) han informado que, en los suelos del Distrito de Riego 063 de Hidalgo donde se han usado aguas residuales no tratadas durante varias décadas, en consecuencia las concentraciones de metales pesados se han incrementado. Sin embargo, con base en la literatura tales concentraciones no alcanzan valores fitotóxicos. Poco se ha documentado sobre las interacciones entre esos elementos y los elementos esenciales, y la forma en que estas relaciones afectan a las plantas cultivadas en estos sitios.

En este trabajo, se estudió el efecto del Cd en la asimilación del Zn por el maíz (*Zea mays* L.). Esta investigación se basó en la siguiente hipótesis: El Cd compete con el Zn por los sitios de sorción en el suelo afectando su disponibilidad y absorción por las plantas.

MATERIALES Y MÉTODOS

En las localidades Tlaxcoapan y Tlathuelilpan, Hidalgo, México, se colectaron dos suelos calcáreos a una profundidad de 0 a 30 cm, pertenecientes a la serie Progreso; algunas propiedades se presentan en el Cuadro 1. La caracterización se hizo con muestras secadas al aire y tamizadas por una malla de 2 mm. Estos suelos se han regado con agua residual durante más de 70 años. El agua usada para regarlos tiene composición variable; en términos generales, el intervalo de pH, carbono orgánico y algunos iones metálicos en muestras colectadas en cuatro fechas durante el año se muestran en el Cuadro 2.

Con ellos se estableció un experimento en invernadero como sigue: 2 kg de suelo, secados al aire y tamizados por una malla de plástico de 5 mm de abertura, se colocaron en macetas y se les aplicaron dosis crecientes de Cd: 10, 20, 40 y 80 mg kg^{-1} ($3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), y Zn: 15, 30 y 60 mg kg^{-1} (ZnSO_4), en un diseño factorial completo más un testigo sin la adición de Cd o Zn, dando un total de 13 tratamientos, con tres repeticiones; las dosis adicionadas se calcularon con base en la sorción de los elementos.

Después de un mes de incubación, durante el cual el suelo se mantuvo a 80% de su capacidad de campo, el material se homogeneizó y, posteriormente, se sembró maíz, el cual se cosechó después de 45 días. Cada dos semanas, se aplicó solución nutritiva, sin

Cuadro 1. Algunas características de los suelos colectados en las localidades Tlaxcoapan y Tlathuelilpan.

Característica	Tlaxcoapan	Tlathuelilpan	Método
pH	8.2	8.3	Agua rel. agua:suelo 2.5:1
Materia orgánica (%)	3.4	3.3	Walkley y Black (1934); Mebius (1960)
Cd [†] (mg kg ⁻¹)	3.2	4.8	Bradford <i>et al.</i> (1975)
Zn [†] (mg kg ⁻¹)	42.0	69.5	"
Cu [†] (mg kg ⁻¹)	25.0	42.0	"
Mn [†] (mg kg ⁻¹)	535.0	13286.0	"
Fe [†] (mg kg ⁻¹)	8400.0	513.0	"
Carbonatos totales (%)	1.41	1.17	Sokolovich (1966)
Arena (%)	5.0	25.0	Day (1965)
Limo (%)	25.0	31.0	"
Arcilla (%)	70.0	44.0	"

† Totales.

incluir Zn, con base en la recomendación de Waugh y Fitts (1966).

Al finalizar la incubación, se obtuvieron muestras de suelo y se analizó en ellas el Cd y Zn asociados a la materia orgánica por el método propuesto por Kononova y Bel'chicova (1960), para lo cual se usaron NaOH 0.1 M y Na₂P₄O₇·7H₂O 0.1 M y las fracciones intercambiables por la técnica analítica descrita por Thomas (1982) con acetato de amonio 1 N. Al cosechar las plantas, también se tomaron muestras de suelo y se determinaron las concentraciones de Cd y Zn extractables con solución de DTPA-CaCl₂-TEA (Lindsay y Norvell, 1978).

En adición, en el laboratorio se determinó la capacidad de sorción de Zn en el suelo, en presencia de Cd. Para lo cual se aplicaron al suelo dosis crecientes de Cd: 0, 1, 5, 10, 20, 40 y 80 mg L⁻¹ a diferentes concentraciones de Zn: 0, 10, 20, 40 y 80 mg L⁻¹ en solución acuosa, y se equilibró durante 2 h en un agitador oscilatorio. La suspensión resultante se centrifugó a 1250 g durante 10 min y se filtró el sobrenadante, en el cual se determinó la concentración de Cd por absorción atómica. Los datos se

Cuadro 2. Algunas características del agua usada para riego en el área donde se colectaron los suelos.

Parámetro	Intervalo	Método analítico
pH	7.2 - 7.5	Potenciométrico
C orgánico (μmol)	6.5 - 24.4	Digestión húmeda (Golterman <i>et al.</i> , 1978)
Ca (μmol)	740.0 - 804.0	(Radojevic y Bashikin, 1999)
Mg (μmol)	71.0 - 114.0	
Cd (μmol)	0.13 - 0.16	
Pb (μmol)	0.35 - 1.19	
Zn (μmol)	1.45 - 2.95	

procesaron suponiendo una relación lineal simple entre ellos:

$$(x/m) = a + K_d C$$

Donde: C = concentración de Zn en equilibrio en la suspensión de suelo (μg mL⁻¹); x = Zn sorbido por el suelo; m = masa de suelo (g); x/m = Zn sorbido por masa de suelo (μg g⁻¹); K_d = coeficiente de sorción (mL g⁻¹); a = ordenada al origen.

Las plantas se lavaron con agua desionizada (CE < 10 mS m⁻¹), secadas a 65 °C por 72 h y se molieron en un molino Thomas. Las muestras se mineralizaron por digestión húmeda (Jones y Case, 1990) y se determinaron el Cd y los micronutrientes por absorción atómica. A los resultados se les hizo el análisis de varianza y prueba de Tukey para obtener la diferencia significativa honesta DSH (P = 0.05% y 0.01%).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de la incubación se observó que hubo más Cd en forma intercambiable que Zn al incrementarse las dosis de Zn aplicado. Por lo que puede suponerse que el Zn es retenido con más energía por el suelo que el Cd. La distribución de ambos elementos enlazados a la fracción orgánica fue inconsistente, por lo que serían necesarios estudios más detallados. En las concentraciones de Cd unido a la fracción orgánica no hubo diferencias estadísticas significativas (P = 0.01), a excepción de la dosis de 80 mg kg⁻¹ de Cd y de 60 mg kg⁻¹ de Zn; en contraste a esto, se observó un incremento significativo (P = 0.01) en el Cd intercambiable en función de la dosis aplicada (Cuadro 3).

Cuadro 3. Cadmio y Zn intercambiable (CdI y ZnI) y asociados a la materia orgánica (CdO y ZnO) del suelo Tlathuelilpan.

Zn [†] (mg kg ⁻¹)	0.0					15				
	Cd [†]	0.0	10	20	40	80	10	20	40	80
CdO		1.08 a	1.41 a	1.49 a	2.32 b	4.44 c	0.89 a	1.53 a	1.65 a	3.10 b
ZnO		0.06 a	0.49 a	0.44 a	0.42 a	0.29 a	0.14 a	0.14 a	0.13 a	0.24 a
CdI		0.03 a	0.73 ab	0.71 ab	2.84 ab	1.83 ab	1.09 ab	1.38 ab	1.41 ab	2.68 ab
ZnI		0.09 a	0.05 a	0.14 a	0.11 a	0.15 a	0.27 a	0.28 a	0.19 a	0.12 a
Zn [†]	30					60				
	Cd [†]	0.0	10	20	40	80	10	20	40	80
CdO		tr	1.10 a	2.09 b	2.97 b	3.55 b	0.56 a	1.58 a	4.47 a	7.26 d*
ZnO		tr	0.37 a	0.34 a	0.50 a	0.58 a	0.20 a	0.17 a	0.74 a	1.17 a
CdI			0.33 a	1.22 b	1.52 b	3.39 c	0.49 a	0.79 a	2.80 b	13.59 d**
ZnI			0.11 a	0.25 a	0.29 a	0.31 a	0.44 b	0.40 b	0.60 b	0.65 b

[†] aplicado al suelo (mg kg⁻¹). tr = trazas. Estadísticamente significativos * P = 0.05 y ** P = 0.01.

Promedios con la misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey, P = 0.05) en forma horizontal.

ZnI DSH_{0.05} = 0.896, DSH_{0.01} = 1.023. ZnO DSH_{0.05} = 2.17, DSH_{0.01} = 2.49. CdI DSH_{0.05} = 2.93, DSH_{0.01} = 3.39. CdO DSH_{0.05} = 3.48, DSH_{0.01} = 3.99.

La adición de Zn incrementó ligeramente el Cd intercambiable a altas dosis de Cd. Esto concuerda con lo observado por Sikora y Wolt (1986), quienes informaron que la adición de Zn incrementó el Cd soluble. Para las condiciones de estos suelos y las concentraciones de Cd aportado por el agua residual, no se esperaría fuerte competencia entre estos elementos a menos que el pH disminuya o se modifiquen los factores que controlan la solubilidad de este elemento.

Sin aplicación de Zn, el Cd intercambiable constituye de 10 a 13% del Cd adicionado al suelo y al agregar Zn, el Cd intercambiable se incrementó hasta 31% con las dosis de 60 y 80 mg kg⁻¹ de Zn y Cd, respectivamente; se observaron diferencias estadísticas significativas sólo con los más altos valores de Cd, que no son comunes en los suelos estudiados.

También hay que señalar que menos de 2% del Zn adicionado al suelo se recuperó como Zn intercambiable, lo cual indica una fuerte asociación del elemento a la fase sólida o una baja liberación de Zn sorbido. Considerando el contenido de carbonatos totales en los suelos (0.235 mol), se podría esperar precipitación de ambos elementos en esta fracción, pues a pH mayor que 7, la solubilidad de estos elementos es controlada por los carbonatos y minerales del suelo (Lindsay, 1979).

En el suelo Tlaxcoapan, la aplicación de Zn al suelo no afectó significativamente (P = 0.05) la cantidad de Cd extractable con DTPA (DTPA-Cd) o el Cd reactivo, como lo llamó Beckett (1989), las cantidades extractables dependen de la dosis de Cd aplicada. La adición de Cd incrementó el Zn

extractable significativamente sólo con la dosis de 60 mg kg⁻¹ (Cuadro 4). Esto se explica por el alto contenido de arcilla en este suelo (70%), lo que influye en la capacidad de fijación. Sólo se observaron diferencias significativas (P = 0.01) en la concentración de ambos metales en función de las dosis aplicadas.

En contraste, en el suelo Tlathuelilpan, el DTPA-Cd disminuyó hasta 1.7 veces al aumentar la concentración del Zn, lo que aparentemente se debe a que hubo competencia entre ambos metales por los sitios de enlace en el suelo, como lo mencionaron Kitagishi y Yamane (1981) (Cuadro 5). La ecuación de regresión lineal simple de DTPA-Cd en función del Cd aplicado al suelo, sin la adición de Zn, fue:

Cuadro 4. Concentraciones de Cd y Zn extraídas con DTPA en el suelo Tlaxcoapan.

Cd [†] (mg kg ⁻¹)	0	10	20	40	80
Zn [†]	----- Cd, mg kg ⁻¹ -----				
0	0.33 a	9.5 a	19.0 b*	31.0 bc**	49.5 d**
15		8.0 a	17.0 b*	22.0 bc**	54.0 d**
30		8.5 a	18.0 b*	34.0 bc*	45.0 cd*
60		9.5 a	16.5 ab	34.0 bc**	54.0 d**
	----- Zn, mg kg ⁻¹ -----				
0	2.54 a	2.5 a	2.3 a	2.0 a	2.0 a
15		4.5 a	4.5 a	3.5 a	5.0 ab
30		7.0 ab	6.0 ab	6.0 ab	4.5 a
60		7.0 ab	12.0 bc**	12.0 bc**	11.5 bc**

[†] Cd DSH_{0.05} = 16.64, DSH_{0.01} = 19.03; Zn DSH_{0.05} = 6.98, DSH_{0.01} = 7.98. Estadísticamente significativos * P = 0.05 y ** P = 0.01. Promedios con la misma letra dentro de cada grupo no son estadísticamente diferentes (Tukey P = 0.05) en forma horizontal.

Cuadro 5. Concentraciones de Cd y Zn extraídas con DTPA en el suelo Tlahuelilpan en función del tratamiento.

Cd [†] (mg kg ⁻¹)	0	10	20	40	80
Zn [†]	Cd, mg kg ⁻¹				
0	0.60 a	8.5 a	13.0 a	31.0 bc**	58.0 bcd**
15		9.5 a	14.5 a	28.5 bc**	56.0 bcd**
30		8.5 a	18.0 ab*	24.0 bc**	41.5 bcd**
60		9.0 a	11.0 a	17.0 abc**	54.0 bcd**
	Zn, mg kg ⁻¹				
0	7.0 a	7.0 a	4.5 a	8.5 a	10.0 ab
15		13.0 ab	13.0 ab	8.0 a	12.0 a
30		14.5 b*	11.5 ab	11.0 ab	10.0 ab
60		15.5 ab	17.5 bc**	16.0 bc**	16.5 bc**

[†] Cd DSH_{0.05} = 16.64, DSH_{0.01} = 19.03. Zn DSH_{0.05} = 6.98, DSH_{0.01} = 7.98. Estadísticamente significativos *P = 0.05 y ** P = 0.01. Promedios con la misma letra dentro de cada grupo no son estadísticamente diferentes (Tukey P = 0.05) en forma horizontal.

$$Y = 0.53 + 0.723 X (R^2 = 0.99)$$

y la obtenida en presencia de 60 mg kg⁻¹ de Zn fue:

$$Y = 2.6 + 0.394 X (R^2 = 0.98)$$

lo que muestra una reducción en la pendiente debido a la incorporación de Zn al suelo.

Esto puede considerarse como efectos antagónicos entre estos elementos, como Smilde *et al.* (1992) y Moraghan (1993) han señalado, lo que implica competencia en función de la concentración de ambos elementos en el suelo. La aplicación de Zn también incrementó la concentración de DTPA-Zn, sin que el incremento del Cd tuviera una influencia, excepto que sin la adición de Zn al suelo, la incorporación de Cd incrementó ligeramente el DTPA-Zn, posiblemente debido a que el Cd desplazó al Zn adsorbido en el suelo.

A los valores de pH y de carbonatos observados en los suelos, se espera que los carbonatos sean importantes para el control del Cd y Zn en equilibrio, pues la formación de complejos con OH⁻ y su asociados con HCO₃⁻ y CO₃²⁻ controlan su solubilidad (Lindsay, 1979; Hirsh y Banning, 1990). Sin embargo, el efecto de la rizósfera puede modificar la disponibilidad de ambos elementos al bajar el pH en el área de influencia de la raíz (Jones y Hutchinson, 1988), ya que la disminución del pH incrementa la disponibilidad de los elementos (Jeng y Sing, 1995).

En las isotermas de sorción pudo observarse que la aplicación del Cd al suelo afecta directamente la capacidad de retención de Zn, pues al incrementar la

concentración de Cd, la capacidad máxima de fijación de Zn se incrementó (Figuras 1a y b), aparentemente por efecto de la adsorción del ligando sobre el suelo, pero sobre este punto es necesario un estudio más detallado, ya que la reacción residual ácida del sulfato debe causar una reducción en la sorción. Sin embargo, a las concentraciones que normalmente entran al suelo con el agua residual no se esperarían efectos fuertes a corto plazo.

El suelo Tlaxcoapan tuvo ligeramente mayor capacidad de fijación de Zn que el suelo Tlahuelilpan (Figuras 1c y d), debido aparentemente al menor contenido de arcilla en este último. La concentración en la solución en equilibrio fue mayor. La fuerte sorción explica porque no se observó efecto entre el Zn y Cd extraídos con DTPA.

A concentraciones bajas de Cd en la solución en equilibrio, el Zn fijado sigue el comportamiento descrito por la ecuación de Freundlich, pero a concentraciones altas (> 40 mg kg⁻¹) la isoterma sigue un comportamiento distinto al descrito por esa ecuación, aparentemente debido a cambios en la adsorción sobre la superficie del suelo. Las ecuaciones calculadas suponiendo un comportamiento descrito por la ecuación de Freundlich fueron:

Dosis de Cd mg kg ⁻¹	Ecuación	R ²
Tlaxcoapan		
10	X/m = 82.81 C ^{0.4719}	0.9984
20	X/m = 96.80 C ^{0.4831}	0.9512
40	X/m = 84.27 C ^{0.6445}	0.8691
80	X/m = 239.37 C ^{0.5129}	0.9057
Tlahuelilpan		
10	X/m = 432.31 C ^{0.4719}	0.9092
20	X/m = 230.62 C ^{0.4831}	0.9932
40	X/m = 129.38 C ^{0.6445}	0.8313
80	X/m = 81.71 C ^{0.5129}	0.9844

Las curvas de adsorción sugieren una reducción en la fuerza de adsorción de Cd debido a la adición de Zn, aparentemente esto fue debido a que el suelo tiene mayor afinidad por el Zn y se refleja en el incremento del Zn intercambiable. La adsorción depende de la concentración inicial. Estas observaciones tienen implicaciones en las condiciones reales de suelo donde es común que sean introducidos varios elementos que pueden competir por los sitios de adsorción del suelo.

La concentración de Cd en tejido de maíz se incrementó con la aplicación de Cd en el suelo en presencia de todas las dosis de Zn. La aplicación de

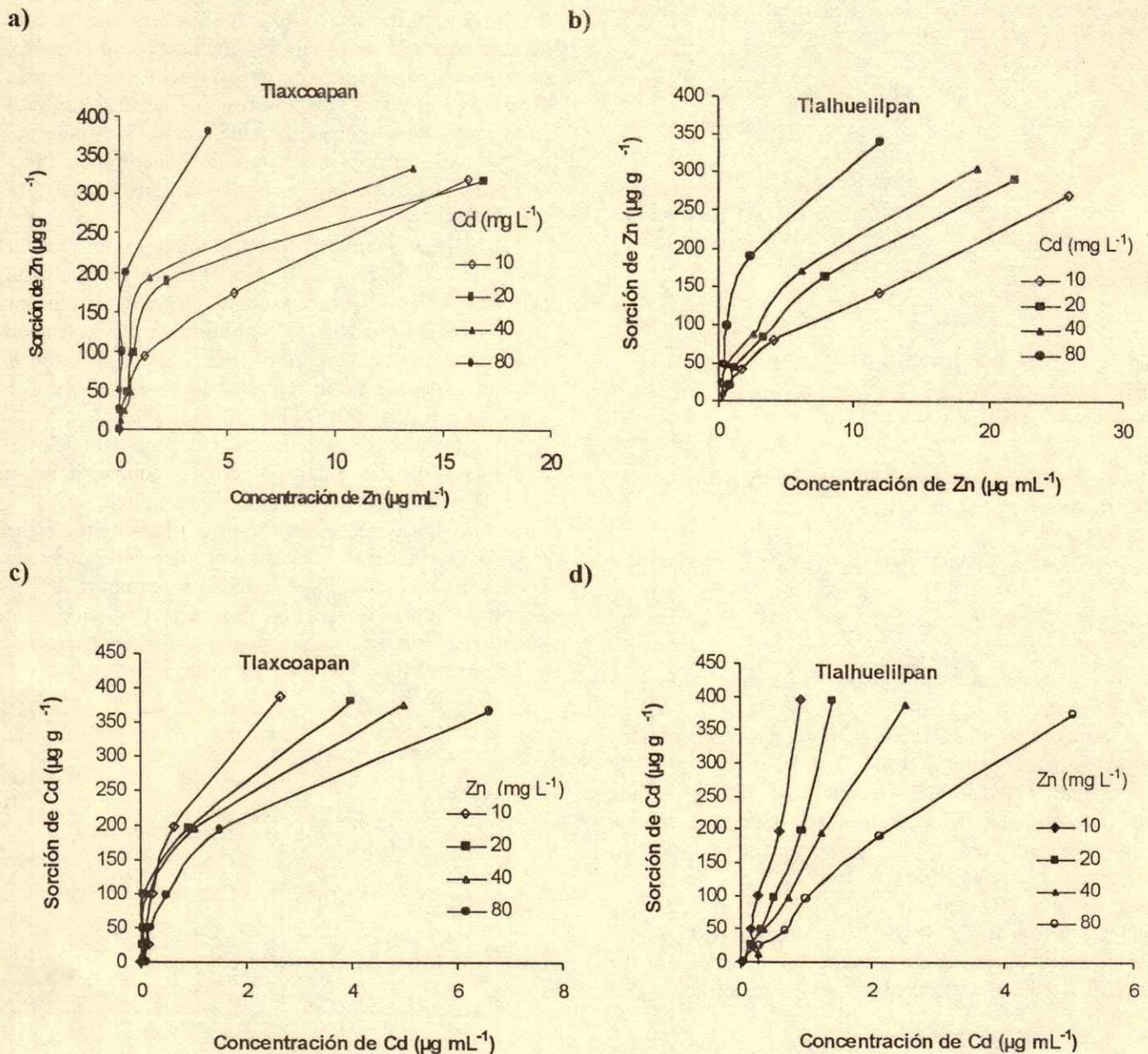


Figura 1. Isothermas de sorción de Zn a diferentes concentraciones de Cd.

(a) Suelo Tlaxcoapan; (b) suelo Tlahuelilpan; de Cd a diferentes concentraciones de Zn en el suelo (c) Tlaxcoapan y (d) Tlahuelilpan.

Zn indujo mayor absorción de Cd por el maíz y se observaron diferencias estadísticamente significativas ($P = 0.05$), aparentemente por incrementarse la disponibilidad en la solución del suelo. También se observó que la interacción Zn*Cd fue significativa ($P = 0.05$); parece que hubo un efecto de sinergismo del Zn sobre la absorción de Cd a altas dosis de Cd. Esto es opuesto a lo observado en otras especies

vegetales donde el Zn tiene efecto inhibitorio de la absorción y transporte de Cd en trigo y papa (McLaughlin *et al.*, 1994; Oliver *et al.*, 1994). Cakmak *et al.* (2000) observaron menor absorción de Cd cuando no se aplicó Zn en comparación con los tratamientos donde adicionaron este elemento. Zhu-Bo *et al.* (1997) observaron que a bajas concentraciones de Cd, se promovió la absorción de

Cuadro 6. Concentración de Cd en tejido vegetal maíz, parte aérea[†].

Cd (mg kg ⁻¹)	0	10	20	40	80
	----- Cd, mg kg ⁻¹ -----				
	Tlaxcoapan				
Zn, mg kg ⁻¹					
0	2.7 a	24.5 a	56.5 a	124.0 bc**	174.0 cd**
15		30.0 ab	63.0 ab*	88.0 b*	207.0 cd**
30		35.0 ab	43.0 ab	108.0 c**	218.0 cd**
60		29.0 ab	40.0 ab	150.0 c	215.0 cd**
	Tlahuelilpan				
0	2.4 a	34.0 ab	45.0 ab	101.0 c*	148.0 c*
15		35.0 ab	55.0 b*	70.0 b*	139.0 c**
30		24.0 ab	52.0 ab	110.0 bc**	164.0 c**
60		31.0 ab	59.0 b*	139.0 bc**	201.0 cd**

[†] Hojas y tallo.DSH_{0.05} = 51.00; DSH_{0.01} = 58.5. Estadísticamente significativos *P = 0.05 y ** P = 0.01.Promedios con la misma letra dentro de cada grupo no son estadísticamente diferentes en forma horizontal. Entre valores de Zn DSH_{0.05} = 10.14.

Cuadro 7. Concentración de Zn en maíz en función del tratamiento dado a los suelos Tlaxcoapan y Tlahuelilpan.

Cd (mg kg ⁻¹)	0	10	20	40	80
	----- Zn, mg kg ⁻¹ -----				
	Tlaxcoapan				
Zn, mg kg ⁻¹					
0	77.0 a	92.0 a	82.5 a	80.0 a	107.0 a
15		104.0 a	104.0 a	86.5 a	106.0 a
30		112.0 a	131.0 b**	123.0 a	136.0 b**
60		124.0 a	158.0 ab**	163.0 bc**	128.0 b**
	Tlahuelilpan				
0	52.5 a	36.0 a	52.5 a	62.0 a	43.0 a
15		67.0 a	69.0 a	54.5 a	78.0 ab
30		85.0 a	98.0 a	94.0 a	82.5 ab
60		114.5 bc**	112.0 bc**	145.0 bc**	132.0 bc**

** Estadísticamente significativos P = 0.01 con DSH_{0.05} = 49.57; DSH_{0.01} = 56.87. Promedios con la misma letra dentro de cada grupo no son estadísticamente diferentes, en forma horizontal. Entre valores de Zn: DSH_{0.05} = 11.43.

Zn y a elevadas concentraciones de Zn la absorción de Cd disminuyó en trigo, lechuga, tomate y coliflor.

La ecuación de regresión lineal simple de Cd en la planta en función del DPTA-Cd sin aplicación de Zn fue:

$$Y = 1.11 + 3.58 X (R^2 = 0.99)$$

y la obtenida con la aplicación de 60 mg de Zn kg⁻¹ fue:

$$Y = -5.52 + 4.05 X (R^2 = 0.97).$$

El cambio en la pendiente muestra mayor absorción de Cd debido a la presencia del Zn lo que está relacionado con el incremento del Cd en solución. En el suelo Tlaxcoapan a bajas dosis de Cd (10 y 20 mg kg⁻¹), el Zn compitió con el Cd y la

concentración de éste en el maíz tendió a reducirse ligeramente (Cuadro 7).

Conforme aumentaron las dosis de Cd y Zn en el suelo, se observó la tendencia a incrementarse la absorción de Zn por la planta, resultado que es opuesto a lo reportado por Smilde *et al.* (1992), aunque estos efectos no fueron significativos, pero a concentraciones altas de ambos elementos (30 mg kg⁻¹ de Zn en presencia de concentraciones de 40 mg kg⁻¹ de Cd) decreció su concentración en la planta, aparentemente porque disminuyó la disponibilidad de ellos en la solución del suelo (Cuadro 7); esto concuerda con lo señalado por Moraghan (1993) y Sikora y Wolt (1986). Los últimos autores observaron que no hubo un efecto consistente de la adición de Cd al suelo sobre la absorción de Zn por maíz. La disminución en absorción de Zn pudo ser debido

Cuadro 8. Concentración de Mn, Fe y Cu en la parte aérea[†] de maíz, en función de los tratamientos aplicados en suelo de Tlaxcoapan y suelo de Tlathuelilpan.

Tratamiento		Tlaxcoapan			Tlathuelilpan		
Zn	Cd	Mn	Fe	Cu	Mn	Fe	Cu
----- mg kg ⁻¹ -----							
0	0	45.0 a	187.0 a	3.0 a	33.0 a	115.0 a	3.0 a
	10	46.0 a	117.0 b*	6.0 a	34.5 a	119.0 a	6.0 a*
	20	35.5 b*	121.0 b*	7.5 b*	24.0 a	145.0 a	6.0 a*
	40	39.0 b*	148.0 b*	8.5 b*	33.5 a	150.0 c*	8.5 b*
	80	34.0 b*	164.0 a	10.0 b*	37.0 a	134.0 a	11.0 b**
15	10	38.0 b*	141.0 b*	7.5 b*	33.0 a	95.5 a	10.0 b*
	20	43.0 a	150.5 b*	8.0 b*	34.0 a	104.5 a	10.0 b*
	40	44.5 a	156.0 b*	5.5 a	24.5 a	75.0 b*	11.0 b**
	80	38.0 b*	191.0 a	9.0 b*	28.0 a	130.0 a	11.0 b**
30	10	35.5 b*	105.0 b*	3.5 a	23.0 a	101.0 a	9.0 b*
	20	36.0 b*	130.0 b*	6.0 a	36.0 a	128.0 a	7.0 b
	40	37.5 b*	112.5 b*	7.0 b*	39.0 b*	151.5 c*	8.0 b*
	80	33.5 b*	173.0 a	9.0 b*	42.0 b*	133.0 a	9.0 b*
60	10	31.5 b*	126.0 b*	6.0 a	37.0 a	124.0 a	7.0 b
	20	31.5 b*	111.0 b*	5.0 a	32.5 a	135.0 a	10.0 b**
	40	31.5 b*	145.0 b*	7.0 b*	35.0 a	115.0 a	9.0 b*
	80	34.5 b*	134.0 a	7.5 b*	35.0 a	117.0 a	10.5 b**
DHS _{0.05}		5.14	30.49	2.57	5.14	30.49	2.57

[†] Hojas y tallo.

Cambio por efecto de la dosis de cadmio: * P = 0.05, P = 0.1. Promedios con la misma letra dentro de cada grupo no son estadísticamente diferentes (Tukey P = 0.05) en forma vertical.

al efecto tóxico del Cd sobre las actividades metabólicas de la planta.

Interacción con Micronutrientos

Las adiciones de Cd incrementaron la asimilación de Cu, aunque de manera inconsistente, pues sólo en el maíz plantado en el suelo Tlathuelilpan se observó efecto estadístico significativo (P = 0.01), debido a la interacción Cd*Zn. El efecto sobre la absorción de Fe y Mn por la planta no fue significativo en ambos suelos; la variación fue debido, aparentemente, a la variación experimental, pues los cambios fueron muy inconsistentes (Cuadro 8). Esto último concuerda con lo reportado en plantas de tomate por Navarro *et al.* (1997).

La aplicación del Cd redujo fuertemente la producción de materia seca en ambos suelos; de manera similar a lo reportado por Sikora y Wolt (1986), la materia seca disminuyó en forma directa con las dosis aplicadas de Cd (Figura 2). En el suelo Tlaxcoapan, la aplicación de 10 mg kg⁻¹ de Cd fue suficiente para reducir en 10% la materia seca (Figuras 2a y b). La presencia del Zn atenuó el efecto negativo del Cd en la materia seca; se encontró que la interacción Cd*Zn fue altamente significativa

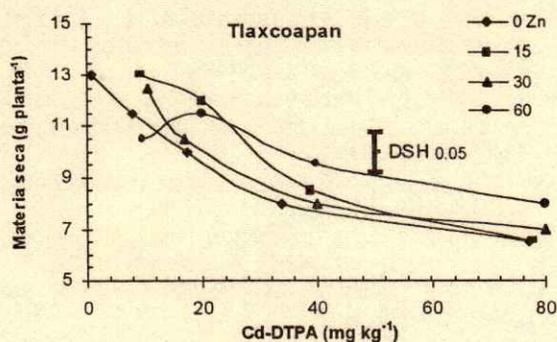
(P = 0.01), (Figura 2); esto concuerda con el antagonismo observado por Smilde *et al.* (1992) en un suelo arcilloso (> 40%), y con la relación Cd-Zn en maíz observada por Sikora y Wolt (1986). Sin embargo, a dosis altas de Zn, parece haber un efecto sinérgico sobre la toxicidad de Cd que se tradujo en menor desarrollo de la planta, aunque esto deberá investigarse más detalladamente.

A bajas concentraciones de Zn, los efectos de Cd en la planta pueden ser mayores que cuando hay un abasto adecuado de Zn; sin embargo, si ambos elementos tienen una concentración elevada, las plantas pueden sufrir mayor estrés. Esto implica que en suelos contaminados con varios elementos podrían esperarse mayores efectos negativos sobre la planta por acción conjunta de elementos potencialmente tóxicos.

CONCLUSIONES

- La adición de Zn al suelo Tlaxcoapan incrementó ligeramente el Cd intercambiable. En el suelo Tlathuelilpan, el Cd extraído con DTPA disminuyó al aumentar el Zn, lo que sugiere competencia durante la extracción, también compiten por los sitios de sorción en los suelos. La aplicación de 20 mg kg⁻¹ de Cd al

a)



b)

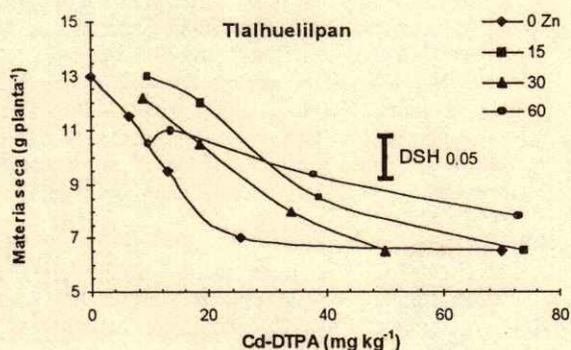


Figura 2. Producción de materia seca en función de las dosis de Cd extractable con DTPA a diferentes valores de Zn en el suelo. (a) Tlaxcoapan y (b) Tlathuelilpan.

suelo, sin adición de Zn, redujo hasta en 23 y 40% la PMS en el suelo Tlaxcoapan y Tlathuelilpan, respectivamente. El incremento en la concentración del Zn en el suelo redujo el efecto nocivo del Cd en la producción de materia seca, es decir, se presenta antagonismo entre ambos elementos, pero a concentraciones muy elevadas de ambos ocurre un efecto sinérgico tóxico de ambos elementos hacia la planta.

AGRADECIMIENTOS

A la memoria del Ing. E. Osoreo Cárdenas (RIP). Los autores agradecen a la Sra. Laura Santamaría por la captura de la información y las observaciones de los dos revisores anónimos.

LITERATURA CITADA

- Adbel Sabour, M.F., J.J. Mortvedt y J.J. Kelson. 1988. Cadmium-zinc interactions in plants and extractable cadmium and zinc fractions in soil. *Soil Sci.* 145: 424-431.
- Alloway, B.J. 1995. Cadmium. pp. 122-151. *In:* B.J. Alloway (ed.). *Heavy metals in soils*. Blackie A&P. London, UK.
- Baszynski, T., L. Wajda, M. Krol, D. Wolinska, Z. Kupa y A. Tukendorf. 1980. Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants. *Physiol. Plant* 4: 365-371.
- Beckett, P.H.T. 1989. The use of extractants in studies on trace metals in soils, sewage sludge and sludge treated soils. pp. 141-176. *In:* B.A. Steward (ed.). *Advances in Soil Science* 9. Springer Verlag. New York.
- Bjerrre, G.K. y H.H. Schierup. 1985. Uptake of six heavy metals by oat as influenced by soil type and additions of cadmium, lead, zinc, and copper. *Plant Soil* 88: 57-69.
- Bradford, G.R., A.L. Page, J.L. Lund y W. Olmstead. 1975. Trace element concentrations of sewage treatment plant effluents and sludges: Their interactions with soil and uptake by plants. *J. Environ. Qual.* 4: 123-127.
- Cajuste, L.J., R. Carrillo González., E. Cota G. y R.J. Laird. 1991. The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. *Water, Air and Soil Pollution* 57: 763-771.
- Cakmak, I., R.M. Welch, B. Erenoglu, V. Römheld, W.A. Norvell y L.V. Kochian. 2000. Influence of varied zinc supplied on re-translocation of cadmium (^{109}Cd) and rubidium (^{86}Rb) applied on mature leaf of durum wheat seedlings. *Plant Soil* 219: 279-284.
- Carrillo González, R. y L.J. Cajuste. 1995. Behavior of trace metals in soils of Hidalgo, Mexico. *J. Environ. Sci. Health* A30: 143-155.
- Christensen, T.H. 1984. Cadmium sorption at low concentrations. I. Effect of time, cadmium load, pH and calcium. *Water, Air and Soil Pollution* 21: 105-114.
- Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. pp. 545-567. *In:* C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis*. Agronomy 9. Part 1. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Golterman, H.L., R.S. Clymo y M.A.M. Ohnstad. 1978. *Method for physical and chemical analysis of fresh waters*. Blackwell Scientific Publications. London, UK.
- Hirsh, D. y A. Banning. 1990. Cadmium speciation in soil solution. *J. Environ. Qual.* 19: 366-372.
- Jeng, A.S. y B.R. Sing. 1995. Cadmium status of soils and plants from a long term fertility experiment in Southeast Norway. *Plant Soil* 173: 67-74.
- Jones, M.D. y T.C. Hutchinson. 1988. Nickel toxicity in mycorrhizal birch seedlings infected with *Lactarius rufus* or *Scleroderma flavidum*. II. Uptake of nickel, calcium, magnesium phosphorus and iron. *New Phytologist* 108: 461-470.
- Jones, J.B. y V.W. Case. 1990. Sampling, handling and analysis plant tissue samples. pp. 398-427. *In:* R.L. Westerman (ed.). *Soil testing and plant analysis*. 3er ed. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Kabata Pendias, A. y H. Pendias. 1986. *Trace elements in soils and plants*. CRC. Press. Boca Raton, FL.

- Kitagishi, K. e I. Yamane. 1981. Heavy metals pollution in soils of Japan. Japan Science Society Press. Tokyo, Japan.
- Kononova, M.M. y N.P. Bel'chicova. 1960. Quick methods of determining the humus composition of mineral soils. *Sov. Soil Sci. (English translation)* 11: 1112-1121.
- Lindsay, W.L. 1979. Chemical equilibria. John Wiley. New York.
- Lindsay, W.L. y W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-428.
- McBride, M.B. 1995. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulations protective? *J. Environ. Qual.* 24: 5-18.
- McLaughlin, M.J., L.T. Palmer, K.G. Tiller, T.A. Beech y M.K. Smart. 1994. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in filled-grown potato tuber. *J. Environ. Qual.* 23: 1013-1018.
- Mebius, J.L. 1960. A rapid method for the determination of organic carbon in soil. *Anal. Chim. Acta* 22: 120-124.
- Miller, J.E., J.J. Hasse y D.E. Koeppel. 1977. Interactions of lead and cadmium on metal uptake and growth of corn plants. *J. Environ. Qual.* 6: 18-20.
- Moraghan, J.T. 1993. Accumulation of cadmium and selected elements in flax seed grown in a calcareous soil. *Plant Soil* 150: 61-68.
- Moral, R., J. Navarro P., J. Moreno C., I. Gómez y J. Mataix S. 1998. Nutrients in calcareous soil affected by cadmium. *J. Plant Nutrition.* 21: 1933-1941.
- Navarro Pedreno, L., I. Gómez, R. Moral, G. Palacios y J. Mataix. 1997. Heavy metals and plant nutrition and development. *Recent Res. Dev. Phytochemistry* 1: 173-179.
- Nelson, D.W. y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 539-579. *In: L. Page (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. Part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI.*
- Oliver, D.P., J.E. Schultz, K.G. Tiller, N.S. Wilhelm, R.H. Merry y G.D. Cozens. 1994. The effects of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain. *J. Environ. Qual.* 23: 705-711.
- Radojevic, M. y V.N. Bashikin. 1999. Practical environmental analysis. Royal Society of Chemistry. Cornwall, UK.
- Sajwan, K.S. y W.H. Ornes. 1994. Phytoavailability and bioaccumulation of cadmium in duckweed plants (*Spirodela polyrhiza* L. Schleid). *J. Environ. Sci. Health* A29: 1035-1044.
- Siebe, Ch. y E. Cifuentes. 1995. Environmental impact of wastewater irrigation in central Mexico: An overview. *Int. J. Environ. Health Res.* 5: 161-173.
- Sikora, F.J. y J. Wolt. 1986. Effect of cadmium and zinc treated sludge on yield and cadmium-zinc uptake of corn. *J. Environ. Qual.* 15: 340-345.
- Smilde, K.W., B. van Luit y D. Van Driel. 1992. The extraction by soil and absorption by plants of applied zinc and cadmium. *Plant Soil* 143: 233-238.
- Sokolovich, V.E. 1966. A new volumetric method of determining carbonate in soil and grounds. *Soils Fert.* 29: 33.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. pp. 159-165. *In: A.L. Page et al. (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.*
- Walkley, A. e I.A. Black. 1934. An examination of the dagtjareff methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Waugh, D.L. y W.J. Fitts. 1966. Estudio de interpretación de análisis de suelos, laboratorio y macetas. *International Soil Testing. Boletín Técnico 3 de la serie Proyecto Internacional de Análisis de Suelos. Estación Experimental Agrícola. Universidad de Carolina del Norte. Raleigh, NC.*
- Welch, R.M., J.J. Hart, W.A. Norvell, L.A. Sullivan y L.V. Kochian. 1999. Effects of nutrient solution zinc activity on net uptake, translocation, and root export of cadmium and zinc by separated sections of intact durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) seedling roots. *Plant Soil* 208: 243-250.
- Williams, C.H. y D.J. David. 1976. The accumulation in soil of cadmium residues from phosphate fertilizers and their effect on the cadmium content of plants. *Soil Sci.* 121: 86-93.
- White, M.C. y R. L. Chaney. 1980. Zinc, Cd and Mn uptake by soybean from two Zn and Cd amended coastal plain soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 308-313.
- Wong, M.K., G.K. Chuac, L.L. Koh, K.P. Ang y C.S. Hew. 1986. The uptake of cadmium by *Brassica chinensis* and its effect on plant zinc and iron distribution. *Environ. Exp. Bot.* 24: 189-195.
- Yongming, L. y D.L. Rimmer. 1995. Zinc-copper interaction affecting plant growth on metal-contaminated soil. *Environ. Poll.* 88: 79-83.
- Zhu Bo, Qing-ChangLe, Mu-ShuSen, Zhu B., Qing Cl y Mu SS. 1997. Ecological effect of exotic Cd-Zn compound pollution on purple soil. *Chinese J. App. Ecol.* 6: 639-644.

CRECIMIENTO RADICAL DE NOPAL CON DIFERENTES DOSIS DE NITRÓGENO EN HIDROPONÍA

Prickly Pear Root Growth in Response to Nitrogen in Hydroponics

Rafael Zúñiga Tarango¹, José A. Cueto Wong², Emilio Olivares Sáenz³ y Enrique Salazar Sosa¹

RESUMEN

El nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. como la mayoría de los cultivos manifiesta su producción en la parte aérea, por ello al referirse a los aspectos nutricionales se han reportado diversos ensayos de fertilización con productos químicos y orgánicos limitándose a evaluar sus efectos en el rendimiento y su fenología. En el presente trabajo, que se realizó en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FAUANL) en condiciones de hidroponía, se evaluaron las dosis de N de 100, 150 y 200 mg L⁻¹ en una solución nutritiva para determinar la influencia de este elemento en el desarrollo radical de dos variedades de nopal para verdura (Jalpa y Villanueva). Las variedades se comportaron de diferente manera por la influencia de las dosis de N suministradas. La variedad Jalpa dio mayor rendimiento comercial, tuvo un comportamiento inverso en el desarrollo radical y mostró de esta forma ser más eficiente para la absorción de nutrimentos.

Palabras clave: Variedades, desarrollo, fertilidad, nopalito.

SUMMARY

The prickly pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., like most crops, yields its useful parts in the shoot

¹ Facultad de Agricultura y Zootecnia. Universidad Juárez del Estado de Durango. Apartado Postal 1-142, 35000 Gómez Palacio, Durango, México. (Joshua@teleinfo.com.mx)

² CENID-RASPA. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 41, 35150 Cd. Lerdo, Durango, México. (josecuet@raspa.inifap.conacyt.mx)

³ Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de Nuevo León. Apartado Postal 358, 66700 San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. (emolivar@ccr.dsi.uanl.mx)

Recibido: Agosto de 2000. Aceptado: Mayo de 2002.
Publicado en Terra 21: 41-45.

portion of the plant. For this reason, when we refer to the nutritional aspects, different fertilization problems have been reported with chemical and organic products limiting their evaluation effects on yield and phenology. In the present work, carried out under hydroponics, the doses of 100, 150, and 200 mg L⁻¹ N of a nutrient solution were studied in order to determine the influence of this element on root development of two vegetable varieties of prickly pear (Jalpa and Villanueva). The varieties behaved in a different way according to the doses of N supplied. The most efficient of these crops according to the absorption of nutrients was the Jalpa variety.

Index words: Variety, development, fertility.

INTRODUCCIÓN

En México, se cultivan 10 500 ha de plantaciones para producir nopalito con una producción de 54.82 t ha⁻¹ sin contar con los huertos familiares utilizados para este mismo propósito (Flores, 1997). Se consideran la ciudad de México y su área conurbana el primer centro de consumo en el país. Además, se reportan tres millones de nopaleras silvestres donde se recolectan entre tres y cuatro mil toneladas de nopalito por temporada y se distribuye fundamentalmente en salmuera y escabeche (Flores *et al.*, 1996).

El nopal, como la mayoría de los cultivos, manifiesta su producción en la parte aérea, de la cual el hombre se beneficia en forma directa; por ello, al referirse a los aspectos nutricionales del nopal se han realizado diversos ensayos de fertilización con productos químicos y orgánicos limitándose a evaluar su efecto sobre la fenología, el rendimiento y la calidad de su producto. Sin embargo, existe la necesidad de encontrar las bases técnicas de la producción relacionadas con la capacidad de extracción y selectividad realizadas por parte de las raíces de las plantas.

Existen varios factores que afectan el desarrollo de la raíz. Entre ellos se incluyen factores que dependen de las especies vegetales, hábitos de crecimiento y algunas variables ambientales, como la concentración del O₂, la temperatura y el estado hídrico del suelo y la planta (Glinski y Steoniewski, 1985; Taiz y Zeiger, 1991).

Las raíces que crecen en un medio con bajo contenido de N tienden a ser largas y escasamente ramificadas; las que crecen con alto contenido de N son cortas y bien ramificadas (Black, 1975). Kolesnikov (1971) indicó que la falta de este elemento reduce el desarrollo de las raíces, mientras que su exceso anula el crecimiento radical de las mismas.

Baca (1990) determinó la sintomatología específica de cada uno de los elementos estudiados y para el caso de deficiencia de N reportó manifestaciones eventualmente en los bordes superiores de los cladodios que se transforman en tejido corchoso de tamaño variable, mismos que en ocasiones inhiben la formación de yemas vegetativas.

Nobel (1988) concluyó que la actividad metabólica es promovida cuando el contenido de N en el clorénquima es cerca de 2%, lo cual coincide con otras plantas de interés agronómico. Haciendo énfasis en el N, este autor lo consideró como el elemento de mayor influencia en el crecimiento de agaves y cactáceas. Otros resultados del mismo trabajo mostraron que el crecimiento de la raíz, así como de la parte aérea, se incrementó cuando el valor de N alcanzó 0.1% en el suelo, aunque éste disminuyó al incrementarse su contenido.

En este contexto, en un estudio llevado a cabo en condiciones de hidroponía, en el cual se usaron cladodios de siete meses de *Opuntia amyoclaea*, Cruz *et al.* (1990) encontraron que el N es el elemento que más limitó el crecimiento y la producción de materia expresada en peso fresco. Su ausencia en la solución nutritiva fue similar al tratamiento que involucró sólo agua destilada.

Legaspi (1990) reportó una mayor producción de raíces con una mezcla de tepetate y suelo y mencionó que ésta mejora los regímenes de aireación y humedad del suelo, al incrementar el tamaño de los poros con lo que favorece el intercambio gaseoso y propicia una mayor retención de humedad con las partículas finas del suelo.

Nobel y Hartsock (1986), al evaluar la respuesta de plántulas de *Agave deserti* a las adiciones de

nitrate, fosfato y potasio, encontraron que los incrementos mayores de materia seca se correlacionaron positivamente con incrementos de NO₃⁻, y registraron que el aumento del peso seco fue proporcional logarítmicamente al N adicionado hasta cerca de 10 mg de N planta⁻¹, para plántulas de 3.5 meses de edad, desarrolladas en arena lavada como sustrato.

En adición a lo anterior, el estado nutricional de las plantas, el cual afecta su actividad metabólica, se ha estudiado en detalle para plantas C3 y C4, en tanto que las plantas CAM en general, y en particular el nopal (*Opuntia* spp.), han recibido escasa atención (Nobel, 1983), de manera que son pocos los estudios que revelan el efecto de los iones minerales sobre este tipo de plantas.

Por lo anteriormente expuesto, se realizó el siguiente trabajo cuyos objetivos fueron determinar el efecto de las dosis de N en el desarrollo radical del nopal, en la etapa de establecimiento, y determinar qué variedad de nopal muestra mayor respuesta a la aplicación de N.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del Área de Estudio

El experimento se llevó a cabo en el invernadero de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, ubicada en Marín, Nuevo León, México, el cual se encuentra situado entre 25°53' N y 100°03' O con una altitud de 375 m.

Conducción del Experimento

Se utilizaron cladodios de nopal para verdura (*Opuntia ficus-indica* L.), variedades Jalpa y Villanueva, las cuales se depositaron en macetas de 25 cm de diámetro por 25 cm de fondo; se usó arena sílica como medio de soporte. La plantación se llevó a cabo en octubre de 1997 y se mantuvo por un período de siete meses; se regó semanalmente con una solución nutritiva estándar, a la cual se le varió el contenido de N en dosis de 100, 150 y 200 mg L⁻¹. La composición química de la solución nutritiva (Cuadro 1) se ha utilizado y recomendado en trabajos anteriores con resultados favorables en plantas de nopal creciendo en condiciones de hidroponía (Calderón, 1994).

Cuadro 1. Composición de la solución nutritiva utilizada en el experimento de variedades de nopal con tres dosis de nitrógeno.

Elemento	Concentración mg L ⁻¹	Fuente	N-NO ₃		
			100 mg L ⁻¹	150 mg L ⁻¹	200 mg L ⁻¹
N		Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	0.8220	1.2390	1.2390
		KNO ₃		0.02163	0.3838
P	40	KH ₂ PO ₄	0.1756	0.1756	0.1756
K	225	K ₂ SO ₄	0.3900	0.37056	0.0591
Ca	210	CaCl ₂	0.1850		
Mg	40	MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.4155	0.4155	0.4155
g para preparar 1000 L de solución patrón					
B	0.6	H ₃ BO ₃	3.4320	3.4320	3.4320
Mn	2.0	MnSO ₄ ·4H ₂ O	0.6091	0.6091	0.6091
Zn	0.2	Zn SO ₄ ·7H ₂ O	0.8794	0.8794	0.8794
Cu	0.1	Cu SO ₄ ·5H ₂ O	0.3929	0.3929	0.3929
Mo	0.05	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0.0920	0.0920	0.0920
Fe	5.0	Maxiquel Fe 930 [†]	71.42	71.42	71.42

[†] El Fe se aplicó en forma de EDTA con 7% de Fe.

Diseño Experimental. El experimento se estableció como un factorial con una distribución de tratamientos completamente al azar con cuatro repeticiones correspondiendo una maceta (planta) como unidad experimental. Se realizó una prueba de medias (Tukey) para jerarquizar los tratamientos.

Factores Evaluados. El factor A correspondió a las variedades Jalpa y Villanueva y el factor B representó las dosis de N con 100, 150 y 200 mg L⁻¹ en la solución nutrimental.

Variables Evaluadas

La medición de las variables de raíz se realizó después de efectuar un muestreo destructivo cuando la plantación tenía siete meses de establecida, tiempo en el que la primera brotación alcanzó su tamaño de corte comercial.

Rendimiento. Se evaluó cuando más de 50% de los brotes del nopal alcanzaron su tamaño comercial (20 cm de longitud por 11 de ancho). Este fue uno de los criterios para la finalización del experimento, al considerar que la planta de nopal había mostrado su máximo desarrollo de raíz cuando se cosecha en el primer nivel (planta madre).

Porcentaje de areolas enraizadas. Se cuantificó el número de areolas cubiertas por el sustrato y el número de éstas que emitieron raíces para determinar el porcentaje.

Peso fresco de la raíz. Se lavaron las raíces con una solución de agua y ácido clorhídrico a 2% y se secaron al ambiente durante 2 h para pesar las muestras.

Longitud de raíz. Se tomó en cuenta el máximo crecimiento de las raíces principales de las areolas enraizadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del experimento (Cuadro 2) muestran evidencias ($P < 0.05$) de que se presentó diferencia significativa en los parámetros de rendimiento, porcentaje de areolas enraizadas y peso fresco de la raíz.

Los resultados de la producción de nopalito al primer corte muestran una superioridad significativa por parte de la variedad Jalpa sobre la variedad Villanueva con un rendimiento de 254.3 contra 193 g planta⁻¹, con lo cual se puede asumir que la primera es más eficiente que la segunda, mientras que en el desarrollo radical el comportamiento fue inverso (Figura 1).

En lo que respecta al porcentaje de areolas enraizadas, se encontraron diferencias significativas en el factor correspondiente a las variedades utilizadas, resultando la variedad Jalpa con un mayor porcentaje de areolas enraizadas con 55.84%, mientras que la variedad Villanueva presentó 46% de enraizamiento de areolas; sin embargo, el desarrollo fue mayor para la variedad Villanueva al presentar un peso fresco y una longitud más elevados.

Cuadro 2. Cuadrados medios de los análisis de varianza de las variables evaluadas en dos variedades de nopal con tres dosis de nitrógeno.

Fuentes de variación	Rendimiento	% de areolas enraizadas	Peso fresco de raíz	Longitud de raíz
Variedades	22204.37*	582.32*	19147.78*	4160.66*
Valor de N	667.87	51.06	40.95	76.79
Interacción	2183.06	109.61	1162.48*	385.04*
Error	1030.78	53.68	8.79	25.86
C.V	14.35%	14.38%	7.67%	10.52%

Para el peso fresco de la raíz, se presentaron diferencias significativas en la interacción y, al realizar la comparación de medias de las dosis de N aplicadas dentro de las variedades utilizadas, tuvieron un comportamiento diferente en cada variedad, manifestándose un mayor peso en la variedad Villanueva con un promedio de 147.5 g planta⁻¹, mostrando que a mayor cantidad de N fue mayor su peso fresco de raíz. La variedad Jalpa presentó un promedio menor con 91.1 g planta⁻¹ y mostró un comportamiento inverso en las dosis de nitrógeno con respecto al de la variedad Villanueva, es decir, a mayor cantidad de N en la solución, menor peso fresco de la raíz (Figura 1), aun cuando las dosis de 100 y 150 mg L⁻¹ fueron estadísticamente iguales en ambos casos.

Los resultados de longitud de raíz presentaron un comportamiento diferente con respecto a las dosis de N en las variedades probadas y mostraron que la variedad Villanueva alcanzó la mayor longitud con un promedio general de todos sus niveles de 62.5 cm; el valor más alto se encontró cuando se aplicaron 200 mg L⁻¹ de N con una longitud de 71 cm, seguido

de las dosis de 150 y 100 mg L⁻¹ con 61.8 y 51 cm, respectivamente, y son estadísticamente diferentes.

La variedad Jalpa tuvo una longitud promedio de 34.9 cm y la mayor magnitud la presentó la dosis de 100 mg L⁻¹, con 38.5 cm comportándose estadísticamente igual a la dosis de 150 mg L⁻¹ con un valor de 35.5 cm, pero diferente al de 200 mg L⁻¹, que alcanzó una longitud de 30.8 cm y mostró una tendencia descendente a medida que aumentaba la concentración de N en la solución, con un comportamiento similar al presentado en el peso fresco de raíz (Figura 2).

En general, los resultados del desarrollo radical (peso fresco y longitud de raíz) para la variedad Jalpa coinciden con lo reportado por Kolesnikov (1971), Black (1975) y Nobel (1988), al referirse a que un aumento en el contenido de N en el suelo reduce el crecimiento de la raíz; sin embargo, esta misma aseveración contrasta con los resultados presentados por la variedad Villanueva al tener un comportamiento inverso dentro de los valores evaluados y coincidir con Aguilar (1991), quien reportó un incremento en el peso fresco de la raíz al hacer inyección de soluciones de

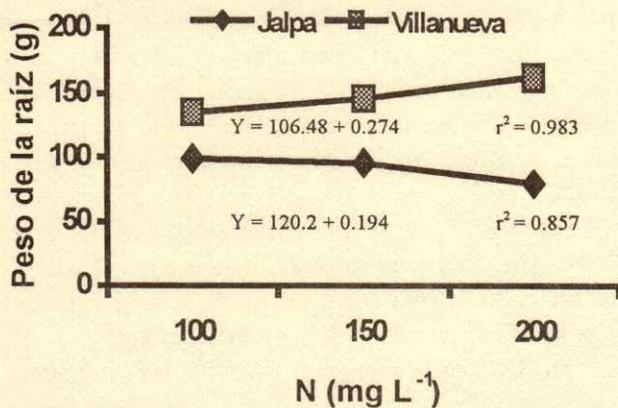


Figura 1. Peso fresco de raíz en nopal con tres dosis de nitrógeno.

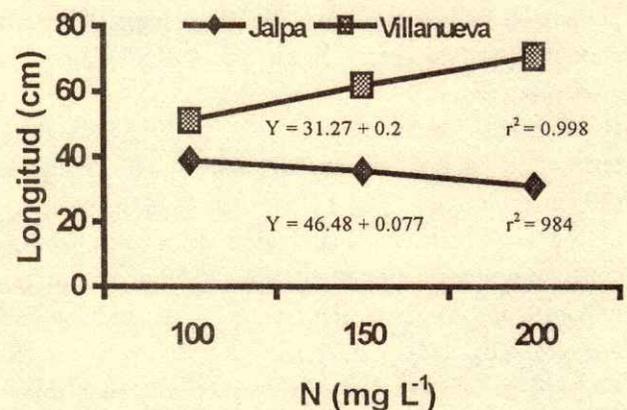


Figura 2. Longitud de raíz en nopal con tres dosis de nitrógeno.

urea al suelo, por lo que se asume que las variedades presentan diferente respuesta a la aplicación de N.

CONCLUSIONES

- La variedad que presentó la más alta producción comercial y un mayor porcentaje de enraizamiento fue la variedad Jalpa.
- El comportamiento en el desarrollo radical de las plantas de nopal en su etapa de establecimiento resultó ser diferente de acuerdo con las variedades; la variedad Villanueva mostró una mayor respuesta a la concentración de N, en lo concerniente a peso fresco y longitud de raíz.
- La respuesta de las variedades mostró tendencias diferentes en los parámetros evaluados; la variedad Jalpa resultó ser la más eficiente en la absorción de nutrientes, lo cual se manifestó con un desarrollo radicular moderado y una producción elevada en el rendimiento comercial.

LITERATURA CITADA

- Aguilar B., G. 1991. Contribuciones al conocimiento del nopal (*Opuntia* spp.). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Baca C., G.A. 1990. Deficiencias nutrimentales inducidas en nopal proveniente de cultivo *in vitro*. pp. 155-163. In: J.J. López G. y M.J. Ayala O. (eds.). El nopal su conocimiento y aprovechamiento. Memorias III Reunión Nacional y I Internacional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, México.
- Black, C.A. 1975. Relación agua-suelo-planta. Trad. al español por A. Rabuffetti. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina.
- Calderón P., N. 1994. Efecto de la salinidad en la producción de materia seca y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.). Tesis profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Cruz H., J.P., A. López G. y G. Baca C. 1990. Inducción de deficiencias de macronutrientes y de Fe en nopal tunero (*Opuntia* spp.). pp. 215-224. In: J.J. López G. y M.J. Ayala O. (eds.). El nopal su conocimiento y aprovechamiento. Memorias III Reunión Nacional y I Internacional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, México.
- Flores V., C.A. 1997. La producción de nopalito en México. Conocimiento y aprovechamiento del nopal. pp. 28-38. In: Memorias 7° Congreso Nacional y 5° Congreso Internacional. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México.
- Flores V., C.A., J.M. de Luna E. y P.P. Ramírez. 1996. Mercado mundial de nopalito. ASERCA-CIESTAM-Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Glinski, J. y W. Steoniewski. 1985. Soil aeration and its role for plants. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Kolesnicov, V. 1971. The root system of fruit plants. Mir Publishers. Moscow, USSR.
- Legaspi G., A., M. Anaya G., J.L. Tovar S. y A. Castillo M. 1990. Distribución de raíces de nopal (*Opuntia Amyclaea*, Tenore) en cepas desarrolladas bajo tres materiales de relleno en suelos degradados. Agrociencia Serie Agua-Suelo-Clima 1: 173-193.
- Nobel, P.S. 1983. Nutrient levels in cacti-relation to nocturnal acid accumulation and growth. *Am. J. Bot.* 70: 1244-1253.
- Nobel, P.S. 1988. Environmental biology of agaves and cacti. Cambridge University Press. New York.
- Nobel, P.S. 1994. Remarkable agaves and cacti. Oxford University Press. New York.
- Nobel, P.S. y T.L. Hartsock. 1986. Influence of nitrogen and other nutrients on the growth of *Agave deserti*. *J. Plant Nutr.* 9: 1273-1288.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 1991. Plant physiology. Benjamin/Cummings. Redwood City, CA.

SELECCIÓN DE PORTAINJERTOS PARA NARANJA "VALENCIA" EN SUELOS CALCIMÓRFICOS

Rootstock Selection for "Valencia" Orange in Calcimorphic Soils

Octavio Pérez Zamora¹, Salvador Becerra Rodríguez¹ y Víctor Medina Urrutia¹

RESUMEN

La naturaleza calcimórfica de los suelos tiene efecto negativo en el desarrollo y la producción de los cítricos en Colima. Durante el período de 1997 a 2001, se evaluaron quince portainjertos de cítricos para naranja Valencia (*Citrus sinensis* L.) en suelo calcimórfico. El objetivo del trabajo fue seleccionar portainjertos para cítricos con buena adaptación al suelo, alto rendimiento y calidad de fruta para jugo. Los tratamientos (portainjertos) incluyeron limones, mandarinos, lima ácida y varios trifoliados; como testigo se utilizó naranjo agrio (*C. aurantium* L.). Macrofila (*C. macrophylla* wester), Volkameriana (*C. volkameriana*, pasq) y naranjo agrio mostraron buena adaptación al suelo; sin embargo, Carrizo [*Poncirus trifoliata* (L.) Raf x *C. sinensis* L.], Amblicarpa (*C. amblycarpa* Ochse) y el híbrido Sunki x Trifoliado (Sunki x *P. trifoliata*), además de mostrar buena adaptación, propiciaron rendimientos y calidad de fruta de naranja comparables al testigo. Los portainjertos con pobre adaptación fueron Morton [*P. trifoliata* (L.) Raf. x *C. sinensis* L.], C-32 [*P. trifoliata* (L.) Raf x *C. sinensis* L.] y Rubidoux (*P. trifoliata*). La mayoría de los portainjertos produjeron frutos con aceptable calidad (°Brix/acidez) de jugo.

Palabras clave: Citranges, mandarino, trifoliados, crecimiento, producción, adaptación al suelo, calidad de jugo.

SUMMARY

Calcimorphic nature of soils have negative effects on growth and yield of citrus in Colima, Mexico. From 1997 to 2001 fifteen citrus rootstocks for sweet orange "Valencia" (*Citrus sinensis* L.) were evaluated in a

calcimorphic soil. The objective of this work was to select citrus rootstocks well adapted to soil conditions, with high yield and good quality fruit for juice. Treatments (rootstocks) included were lemons, mandarin orange, limes and various trifoliates; the control was sour orange (*C. aurantium* L.). Macrofila (*C. macrophylla* wester), Volkameriana (*C. volkameriana*, pasq), and sour orange were well adapted to soil; however, Carrizo [*P. trifoliata* (L.) Raf x *C. sinensis* L.], Amblicarpa (*C. amblycarpa* Ochse), and the hybrid Sunki x Trifoliado (Sunki x *P. trifoliata*), besides showing good soil adaptation, also had orange yield and fruit quality comparable to the control. Morton [*P. trifoliata* (L.) Raf. x *C. sinensis* L.], C-32 [*P. trifoliata* (L.) Raf x *C. sinensis* L.] and Rubidoux (*P. trifoliata*) had the poorest soil adaptation. All the rootstocks induced acceptable Valencia orange juice quality (°Brix/acidity).

Index words: Citranges, mandarin orange, trifoliata, juice quality, growth, yield, soil adaptation.

INTRODUCCIÓN

El limón mexicano [*Citrus aurantifolia* Swingle (Christm)] es el cítrico más importante en la planicie Costera de Colima, sin embargo, su potencial de producción está afectado entre 20 y 80% por la naturaleza calcárea de los suelos, que predominan en 80% de superficie plantada (Pérez, 1999) y amenazado por la entrada potencial de la enfermedad denominada tristeza (closterovirus transmitido por *Toxoptera citricidus* Kirkaldy) de los cítricos (Orozco, 1995). Los estudios y la selección de portainjertos para naranja "Valencia" (*Citrus sinensis* L.) son necesarios para encontrar sustitutos de limón mexicano en el estado de Colima, de manera que los productores puedan elegir el portainjerto más conveniente de acuerdo con las características del suelo de la región. La naranja tiene potencial, ya que su existencia en numerosos huertos de traspatio y algunas plantaciones comerciales de Colima, muestra que tienen buen rendimiento, no obstante que la

¹ Campo Experimental Tecomán. Apartado Postal 88, 28100 Tecomán, Colima. (inifaptecoman@prodigy.net.mx)

Recibido: Julio de 2001. Aceptado: Junio de 2002.
Publicado en Terra 21: 47-55.

calidad externa de la fruta no es tan buena como la de otras regiones productoras.

En estudios previos sobre portainjertos establecidos en suelos franco arcillosos, Reyes *et al.* (1984) detectaron que Volkameriana, (*C. volkameriana*, Ten. y Pasq) produjo árboles más grandes, pero con frutos bajos en la concentración de azúcar (9.37%) y de acidez (0.70%), que dieron una relación sólidos solubles totales (SST)/acidez de 13.6, considerada alta; además, los frutos producidos fueron grandes y de cáscara gruesa (3.93 mm); estos valores son aceptables en calidad de fruto y jugo. En Venezuela y países del Caribe, se ha utilizado, con resultados favorables, a Volkameriana como portainjerto en reemplazo de naranjo agrio, susceptible a tristeza de los cítricos (Jackson, 1999); también en Florida, se observaron buenos resultados al utilizar Volkameriana como portainjerto para naranja de jugo (Castle *et al.*, 1989; Castle y Gmitter, 1999).

En suelos franco arcillosos calcáreos de Cuba, Nuñez (1981) encontró que el toronjo "Marsh" (*C. paradisi* Macf.), el mandarino "Dancy" (*C. reshni*) y el naranjo "Valencia" injertados sobre Macrofila y Volkameriana produjeron frutos de mayor tamaño, y menor contenido de jugo, acidez y SST que cuando se injertaron sobre naranjo agrio. Macrofila se usa en Florida y España como portainjerto para naranjos y mandarinos, pero produce jugo de pobre calidad (Nef, 1997a,b; Castle y Gmitter, 1999).

En cuanto a vigor, Sobrinho *et al.* (1984) indicaron que los árboles de naranjo más pequeños se obtuvieron con el patrón *Poncirus trifoliata*, mientras que los más grandes se obtuvieron con el portainjerto Sunki (*Sunki sp* L.). En tanto que el mayor rendimiento de naranja "Valencia" se obtuvo con Sunki, y el más bajo con *Poncirus trifoliata*. En el mismo estudio, se obtuvo mayor rendimiento para la naranja "Natal" con ambos portainjertos y la mejor calidad de fruto se tuvo con *P. trifoliata*.

En suelos arcillosos de Cuba, árboles de naranjo "Valencia" sobre *Amblicarpa*, (*C. amblycarpa* Oehse) y Volkameriana mostraron mayor altura, volumen de copa y rendimiento que aquéllos injertados sobre naranjo agrio; sin embargo, los dos primeros portainjertos produjeron frutos con menor contenido de jugo, menos SST y menor acidez que los injertados sobre naranjo agrio (Del Valle *et al.*, 1981). En Florida, "Amblicarpa" indujo una producción de 10 a 20% más fruta de naranja que el mandarino "Cleopatra" (*C. reshni* Hort. ex Tan.), sin detrimento de la calidad de fruta (Castle y

Gmitter, 1999). Entre los mandarinos "Sun Chu Sha" (*C. reshni* Hort. ex Tan.) y "Shekwasha" (*C. depressa* Hayata), se les reporta como portainjertos de mayor tolerancia a clorosis férrica ocasionada por suelos calcáreos (Zekri, 1995; Alva y Tucker, 1999).

Por lo que respecta a adaptación de portainjertos a condiciones de suelo, los naranjos "Taroco" y "Moro" (*Citrus sinensis* L.) injertados sobre *P. trifoliata* mostraron síntomas de deficiencias de hierro en terrenos con contenido de medio a alto de carbonato de calcio (Russo y Reforgiato-Recupero, 1984). Los naranjos trifoliados se reconocen como bien adaptados a suelos arcillosos con drenaje pobre; sin embargo, no toleran condiciones calcáreas o salinas (Tucker *et al.*, 1995; Zekri, 1995; Goldschmidt y Spiegel-Roy, 1996; Castle y Gmitter, 1999).

Los portainjertos varían en habilidad para absorber Fe; los naranjos trifoliado y sus híbridos Citrumelo "Swingle" (*P. trifoliata* x *C. paradisi* L. Raf) y citrange "Carrizo" (*P. trifoliata* (L.) Raf. x *C. sinensis* L.) son más ineficientes para absorber Fe que los portainjertos tipo limón y mandarino (Zekri, 1995).

En Florida, Hutchison (1982) encontró que los portainjertos tipo limón son superiores a los mandarinos en su tolerancia a suelos calcáreos. A su vez, los mandarinos "Sun Chu Sha" (*C. reshni* Hort. ex Tan.) y "Shekwasha" (*C. depressa* Hayata), de tolerancia intermedia, son los mejores en este grupo, mientras que naranjo dulce, toronjo y pomelo desarrollan una pobre adaptación a suelos calcáreos.

En la Costa de Sonora, Macrofila ha promovido rendimientos de naranja "Valencia" de 52 a 115% mayores que los obtenidos con naranjo agrio y citrange "Carrizo", respectivamente, en suelos alcalinos. En contraste, naranjo trifoliado (*P. trifoliata* L.) resultó sensible a alcalinidad y salinidad del suelo (Durón, 1999).

Considerando los antecedentes, el objetivo del estudio fue seleccionar portainjertos que formen árboles de naranjo con buena adaptación a condiciones de suelo franco arcilloso calcáreo, adecuado vigor, buena calidad de fruta para jugo y alto rendimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

El estudio se realizó en el rancho San José, municipio de Tecmán, Colima; las coordenadas del terreno son 18°52'22.2" N y 103°53'21.3" O. El clima,

según la estación meteorológica 0623 de la Comisión Nacional del Agua, corresponde a BS1(h)W(w) con lluvias en verano; los registros promedio de 1951 a 2001 mostraron que la precipitación anual es de 808.7 mm, de la cual 86.9% ocurre durante el periodo de junio a octubre; las temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales fueron de 26.3, 35.9 y 16.9 °C, respectivamente.

Características Calcimórficas del Suelo

El pH del suelo superficial es 7.9, con contenido de materia orgánica de 2.9%, CE = 1.1 dS m⁻¹, 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, Fe = 16 mg kg⁻¹ y Mn = 32.4 mg kg⁻¹, pendiente menor que 1%, 10 m de altitud. El suelo se clasificó como Calcisol pétrico (FAO, 1991). El terreno donde se estableció el experimento tiene un estrato endurecido (CaCO₃) a la profundidad de 40 a 60 cm. En esta área algunos portainjertos no crecieron a causa de clorosis férrica, y el 20 de octubre de 1997 tuvo que derribarse 16% del total de árboles. Los portainjertos eliminados fueron 60% de "C-32", 40% de "Cleopatra" y "Rubidoux" y 20% de "Sun Chu Sha", "Shekwasha", "Carrizo" y naranjo agrio (considerado como tolerante a condiciones calcáreas).

Calidad del Agua de Riego

La conductividad eléctrica es de 1.32 dS m⁻¹, con alto contenido de Ca²⁺, Na⁺, HCO₃⁻ y SO₄²⁻; la clasificación del agua para fines de riego es C₃S₁, es decir, de alto riesgo de salinidad (Pérez, 1999).

Portainjertos Evaluados

Los 15 portainjertos evaluados fueron los siguientes: 1. Volkameriana (*C. volkameriana*, pasq), 2. Citrange "Carrizo" [*P. trifoliata* (L.) Raf x *C. sinensis* L.], 3. Mandarin "Shekwasha" (*C. depressa* Hayata), 4. Mandarin "Cleopatra" (*C. reshni* Hort. ex Tan.) 5. Naranjo agrio (*C. aurantium* L.), 6. Mandarin "Sun Chu Sha" (*C. reshni* Hort. ex Tan.), 7. Lima ácida "Rangpur" (*C. limonia*), 8. Amblicarpa (*C. amblycarpa* Ochse), 9. Macrofila (*C. macrophylla* wester), 10. Citrange "Willis" (*P. trifoliata* (L.) Raf. x *C. sinensis* L.), 11. Citrange "Rusk" (*P. trifoliata* (L.) Raf x *C. sinensis* L.), 12. Citrange "C-32" (*P. trifoliata* (L.)

Raf x *C. sinensis* L.), 13. Rubidoux (*P. Trifoliata*), 14. Sunki x Trifoliado (Sunki x *P. Trifoliata*) y 15. Citrange "Morton" (*P. trifoliata* (L.) Raf. x *C. sinensis* L.); el testigo fue naranjo agrio, portainjerto utilizado para naranja en el estado de Colima. Sobre los portainjertos se injertó naranjo "Valencia" (*Citrus sinensis* L.), que es de maduración tardía. Los portainjertos seleccionados fueron materiales reconocidos por servir a dos propósitos: primero, el portainjerto debería de minimizar los efectos de sitio (patógenos del suelo como gomosis (*Phytophthora parasitica* Dastur), de calidad pobre del suelo, de insuficiencia y de calidad pobre de agua; segundo, el portainjerto debería mejorar el rendimiento y la calidad de fruto (Ferguson *et al.*, 1990).

Plantación y Manejo del Huerto

Los árboles injertados se establecieron en campo el 22 de agosto de 1993; la distancia de plantación fue de 8 x 4 m. Los árboles se irrigaron por microaspersión a una tensión de humedad no mayor que 75 kPa, según lecturas de tensiómetros colocados a 30 y 60 cm de profundidad. La fertilización y el control de plagas, enfermedades y malezas se efectuaron de acuerdo con las recomendaciones del Campo Experimental Tecmán.

Variables Estudiadas

Durante cuatro ciclos, de 1997 a 1998 y de 2000 a 2001 en tres árboles centrales se midieron las siguientes variables: a) altura; b) diámetro del portainjerto y copa de cada árbol; c) volumen de copa (se calculó asumiendo que la forma del árbol correspondía a una semiesfera [(volumen = (4/6) x π x altura x radio de copa²]) (Roose *et al.*, 1989); d) rendimiento en kg árbol⁻¹ y t ha⁻¹; e) eficiencia de producción que resultó del cociente de rendimiento/volumen de copa (Roose *et al.*, 1989); f) calidad de jugo, para ello se colectaron 25 frutos de la unidad experimental (tres árboles), tomando frutos de los cuatro puntos cardinales de cada árbol; Wardowski *et al.* (1979) establecieron la metodología para las determinaciones de calidad.

Cosecha

La cosecha constó de tres cortes de fruta, que se efectuaron de septiembre a enero en cada uno de los

cuatro ciclos (de 1997 a 1998 y de 2000 a 2001); previo al corte de naranja, se efectuaron muestreos de fruta para detectar el punto de cosecha (índice de madurez), una vez alcanzado dicho índice, 10 ó mayor, se procedió al corte manual utilizando redes con gancho.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con cinco repeticiones; los tratamientos fueron los portainjertos, la parcela experimental total constó de cinco árboles y la parcela experimental útil de los tres árboles centrales (unidad experimental).

Se efectuó análisis de varianza de los tratamientos utilizando procedimiento GLM con el paquete estadístico CoHort Software (1995), con la interacción tratamiento x bloque como término del error y la comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). También se efectuaron contrastes ortogonales para crecimiento y rendimiento; los contrastes entre portainjertos de naranja considerados relevantes fueron los siguientes: naranja agrio vs. Citranges, naranja agrio vs. mandarinos, naranja agrio vs. Lima ácida, naranja agrio vs. Trifoliados y naranja agrio vs. Tipo limón. Además, se estimó la interacción portainjerto x año, efectuando análisis de varianza para lo cual se utilizó el diseño de

parcelas divididas; los años fueron las parcelas grandes y los portainjertos las parcelas chicas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento

Las variables indicadoras del vigor del naranjo "Valencia", registradas en el año 2000, se muestran en el Cuadro 1.

Altura. Las diferencias en altura entre portainjertos resultaron significativas, los árboles de naranja más altos fueron los injertados sobre Volkameriana y Amblicarpa; estos resultados se encuentran en concordancia con lo encontrado por Del Valle *et al.* (1981), Reyes *et al.* (1984) y Castle y Gmitter (1999). Le siguieron Carrizo, Rangpur y Macrofila, estos últimos portainjertos son del tipo citrange, lima ácida y limón, respectivamente. Los portainjertos que indujeron la menor altura fueron Rubidoux y Morton (Trifoliado y Citrange).

Al comparar entre portainjertos, el naranjo agrio propició mayor altura que los citranges, excepto Carrizo, Sunki x Trifoliado y Willis; sin embargo, naranjo agrio resultó igual que la lima ácida y los

Cuadro 1. Tamaño de árboles de naranjo "Valencia" injertado sobre 15 distintos portainjertos, rancho San José. Tecomán, Colima. 2000.

Portainjerto	Altura m	Diámetro		Volumen copa m ³
		portainjerto cm	copa m	
Volkameriana	3.72 a [†]	15.28 bcd	3.76 ab	28.22 a
Carrizo	3.54 abc	18.62 a	3.68 abc	25.16 ab
Shekwasha	3.10 bcd	12.38 e	3.02 c	17.13 ab
Cleopatra	3.24 abcd	14.24 de	3.24 bch	22.78 ab
Naranja agrio	3.46 abcd	13.94 de	3.32 abcd	21.80 ab
Sun Chu Sha	3.28 abcd	16.14 abcd	3.62 abc	22.95 ab
Rangpur	3.54 abc	14.02 de	3.62 abc	24.50 ab
Amblicarpa	3.58 ab	17.12 ab	3.66 abc	25.44 ab
Macrofila	3.50 abcd	15.34 bcd	3.92 a	28.63 a
Willis	3.26 abcd	18.64 a	3.54 abc	23.00 ab
Rusk	3.22 bcd	16.60 abcd	3.44 abc	20.20 ab
C-32	3.16 efg	18.56 a	3.40 abc	28.08 ab
Rubidoux	2.96 d	15.34 bcd	3.08 c	17.98 ab
Sunki x Trifoliado	3.30 abcd	16.18 abcd	3.66 abc	23.27 ab
Morton	3.00 cd	16.98 abc	3.30 abc	17.12 b
Tukey. 5%	0.30	1.50	0.37	6.65
Media	3.30	15.85	3.47	22.67
C.V.	7.26	7.48	8.47	21.43

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

mandarinos. Carrizo y Amblicarpa fueron considerablemente más altos que el resto de los portainjertos tipo citrange y mandarino, respectivamente; en consecuencia, las diferencias en altura se dan entre y dentro de portainjertos.

Diámetro de portainjerto. En congruencia con resultados de otros investigadores (Del Valle *et al.*, 1981; Ferguson *et al.*, 1990; Castle y Gmitter, 1999), con los citranges Carrizo, Willis, Rusk, C-32 y Morton se registró mayor diámetro (28.8%) de portainjerto con respecto del testigo (Cuadro 1); naranjo agrio fue estadísticamente igual a los portainjertos tipo lima ácida, limón y mandarino, excepto Amblicarpa. El portainjerto que desarrolló el menor diámetro fue Shewasha, lo cual resultó contrastante con lo indicado por Zekri (1995) y Alva y Tucker (1999).

Diámetro de copa. El testigo naranjo agrio fue superado por portainjertos tipo limón que tuvieron 15.7% más de copa; estos resultados son similares a los obtenidos en Cuba por Del Valle *et al.* (1981) y Reyes *et al.* (1984) en Venezuela. El comportamiento de un mayor diámetro de copa de los árboles resultantes de naranjo "Valencia" fue similar al observado por Valdez-Verduzco y Medina-Urrutia (1981) para limón mexicano, injertado en portainjertos tipo limón en suelos calcáreos de Colima. Sin embargo, las diferencias no fueron significativas entre el testigo y portainjertos tipo trifoliado, mandarino y lima ácida (Cuadro 1). El mandarino "Shekwasha" y el Trifoliado "Rubidoux" indujeron el menor diámetro de copa de la naranja que todos los portainjertos; estos resultados fueron similares para Rubidoux, pero contrastaron con lo observado en mandarino "Shekwasha" por Del Valle *et al.* (1981) y Reyes *et al.* (1984).

Volumen de copa. Los árboles de naranjo sobre Volkameriana (29%) y Macrofila (31%) mostraron mayor volumen de copa que el testigo naranjo agrio (Cuadro 1). Este resultado confirma lo encontrado por Tribulato *et al.* (1981) en mandarino "Clementina" y por Valdez-Verduzco y Medina-Urrutia (1981) en limón mexicano en suelos arcillo-arenoso y franco arcilloso ricos en Ca, respectivamente. Naranjo agrio fue estadísticamente igual a los portainjertos del tipo citrange, mandarino, lima ácida y trifoliado. Sin embargo, el volumen de copa de los árboles con naranjo agrio fue 21, 17 y 21%, mayor que en el mandarino "Shekwasha", trifoliado "Rubidoux" y Citrange "Morton", pero menor que en los Citranges "Carrizo" y "C-32" y mandarino "Amblicarpa" en 15, 28 y 17%, respectivamente. Estos resultados corroboran lo anotado

para altura en el sentido de que existen diferencias entre portainjertos y dentro de un mismo tipo de portainjerto. En crecimiento (vigor o porte) de los portainjertos evaluados, además de Volkameriana y Macrofila, destacaron Carrizo, Amblicarpa y Sunki x Trifoliado por ser de manera consistente los que propiciaron una mayor altura, diámetro de tronco del portainjerto, diámetro y volumen de copa del árbol. Estos resultados coinciden con lo observado por Simón y Jiménez (1986) para Amblicarpa, en Cuba, y contrastaron con los de Durón (1999) para el citrange "Carrizo", en la costa de Hermosillo.

Producción de Fruta

El rendimiento de cuatro ciclos de cultivo se muestra en el Cuadro 2. El Citrange "Carrizo", mandarino "Amblicarpa" y el híbrido "Sunki x Trifoliado" de manera consistente propiciaron mayor rendimiento acumulado (Cuadro 2). La producción acumulada fue 62.9% mayor en el híbrido Sunki x Trifoliado que en el testigo (naranjo agrio); los portainjertos Carrizo, Amblicarpa, Rangpur y Rusk fueron 56.9, 26, 19 y 14% superiores al testigo. Los resultados obtenidos para Carrizo contrastaron con lo reportado por Durón (1999) en suelos calcáreos de la costa de Hermosillo. En congruencia con lo encontrado por Del Valle *et al.* (1981), Volkameriana mostró consistencia en favorecer un mayor rendimiento de naranja durante los cuatro ciclos de cultivo; también en Colima al igual que en la costa de Hermosillo (Durón, 1999), el Macrofila resultó consistente. Tanto Macrofila como Volkameriana han resultado ser la mejor opción para limón mexicano en Colima (Valdez-Verduzco y Medina-Urrutia, 1981).

Por otra parte, el Trifoliado "Rubidoux", los Citranges "Willis" y "C-32", los mandarinos "Sun Chu Sha" y "Cleopatra" en este trabajo indujeron los rendimientos acumulados más bajos, resultados que son de interés, ya que Cleopatra y Sun Chu Sha se reportan como las mejores opciones dentro del grupo de mandarinos, por su adaptación a suelos calcáreos (Hutchison, 1982; Castle y Gmitter, 1999). En el caso de "Rubidoux" y "C-32", su comportamiento fue similar al de investigaciones previas (Tucker *et al.*, 1995; Zekri, 1995; Castle y Gmitter, 1999), ya que no toleran las condiciones calcáreas del terreno, y mostraron severos síntomas de deficiencia de Fe, así como el más alto porcentaje de árboles eliminados con 60% para el C-32 y 40% para el Rubidoux. En todo el

Cuadro 2. Rendimiento del naranjo "Valencia" injertado sobre 15 portainjertos en rancho San José. Tecomán, Colima. (1997 a 1998 y 2000 a 2001).

Portainjerto	Ciclo de cosecha				Rendimiento acumulado
	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	
	----- t ha ⁻¹ -----				
Volkameriana	7.86 a [†]	10.21 ab	11.92 abc	14.82 a	44.81 ab
Carrizo	5.21 abcd	11.61 a	13.84 a	14.85 a	45.51 ab
Shekwasha	2.48 cd	4.02 b	3.39 f	8.91 ab	18.79 def
Cleopatra	1.99 cd	3.08 b	5.89 def	8.34 ab	19.30 cdef
Naranjo agrio	3.90 abcd	6.56 ab	7.95 bcdef	10.58 ab	28.99 bcdef
Sun Chu Sha	2.06 cd	3.37 b	4.90 ef	6.97 ab	17.30 ef
Rangpur	4.54 abcd	7.72 ab	9.16 abcde	12.98 a	34.40 abcd
Amblicarpa	5.46 abc	7.23 ab	10.69 abcd	13.20 a	36.58 abc
Macrofila	7.67 ab	10.92 a	12.66 ab	14.16 a	45.41 ab
Willis	2.64 cd	5.25 ab	6.87 cdef	7.91 ab	22.67 cdef
Rusk	5.83 abc	8.11 ab	9.73 abcde	9.46 ab	33.13 abcde
C-32	1.05 d	10.23 ab	3.73 ef	6.85 ab	21.86 cdef
Rubidoux	1.23 d	2.52 b	2.65 f	4.10 b	10.50 f
Sunki x Trifoliado	7.26 ab	11.23 a	13.86 a	14.89 a	47.24 a
Morton	3.62 bcd	5.36 ab	6.83 def	8.42 ab	24.23 cdef
Tukey 0.05	4.19	3.67	2.88	4.21	9.36

[†] Medias con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$).

experimento se perdió 16.9% de los árboles, debido al grado de afectación por clorosis férrica. El porcentaje de árboles derribados a causa de la clorosis férrica fue 40% para el mandarino "Cleopatra", 20% en mandarinos "Sun Chu Sha" y "Shekwasha", 20% de los citranges "Willis" y "Carrizo" y 20% del testigo naranjo agrio (considerado como adaptado a condiciones calcáreas).

Los resultados del estudio mostraron que existen portainjertos alternativos para naranjo "Valencia" diferentes al naranjo agrio. En este sentido destaca el comportamiento del citrange "Carrizo" y del híbrido "Sunki x Trifoliado", los cuales se reportan como sensibles a suelos calcáreos (Tucker *et al.*, 1995; Durón, 1999); en pruebas con limón mexicano, los portainjertos trifoliados mostraron pobre adaptación a suelos calcáreos de Colima (Valdez-Verduzco y Medina-Urrutia, 1981), de manera que las mejores alternativas en estas condiciones fueron los portainjertos "Amblicarpa" y Volkameriana. Macrofila es tolerante a condiciones calcáreas, sin embargo, es sensible a la Tristeza de los cítricos (Orozco, 1995). El citrange "Morton", que es considerado como uno de los portainjertos más sobresalientes para variedades de naranjo, toronjo y mandarino, en varias regiones de Estados Unidos por producir rendimientos de fruta aceptables (Gardner y Horanic, 1967; Hutchison, 1978), en este estudio tuvo un comportamiento intermedio.

Las diferencias estadísticas entre años y la interacción años x portainjertos fueron amplias ($P \leq 0.01$). Considerando el incremento en la producción de fruta año con año, es de suponer que la máxima producción aún no se obtiene. Sin embargo, las diferencias entre portainjertos se manifestaron claramente en los cuatro años de evaluación, aunque algunos portainjertos como "Cleopatra" y "Sun Chu Sha" son lentos en producir (Castle y Gmitter, 1999). En conclusión, la capacidad de producción de los portainjertos promisorios alternativos a naranjo agrio ya está probada en el estudio. Por otra parte, también es posible descartar a aquellos portainjertos que afrontan serios problemas en crecimiento y rendimiento, de adaptación al suelo calcáreo: como son: "Rubidoux", "C-32", "Willis", "Cleopatra" y "Sun Chu Sha".

Calidad de Fruta y Jugo

Los resultados de calidad de fruto y jugo se presentan en el Cuadro 3. Se observaron diferencias estadísticas entre portainjertos sólo para el tamaño de la fruta. Congruente con la literatura (Reyes *et al.*, 1984; Castle y Gmitter, 1999; Jackson, 1999) Volkameriana produjo los frutos de mayor tamaño, naranjo agrio de tamaño medio a pequeño (Posición 14 entre los portainjertos). De los portainjertos con un rendimiento

Cuadro 3. Calidad de fruta (peso) y jugo para naranjo "Valencia" injertado sobre 15 portainjertos en rancho San José, Tecomán, Colima.

Portainjerto	Peso de fruto	Volumen jugo/fruto	SST [†] °Brix jugo	Acidez jugo	Relación SST/ acidez jugo
	g	%		%	
Volkameriana	275.8 ab [‡]	51.9 a	7.77 c	0.615 bc	12.78 ab
Carrizo	243.8 abc	54.7 a	8.37 abc	0.736 abc	11.47 ab
Shekwasha	264.8 abc	51.0 a	8.47 abc	0.674 abc	12.79 ab
Cleopatra	277.8 ab	50.8 a	8.07 bc	0.594 c	14.18 a
Naranjo agrio	248.8 abc	51.6 a	8.82 ab	0.655 abc	13.67 ab
Sun Chu Sha	236.2 abc	52.7 a	9.20 a	0.816 ab	11.34 ab
Rangpur	223.2 abc	51.2 a	8.20 abc	0.747 abc	11.04 ab
Amblicarpa	265.8 bc	53.2 a	8.17 bc	0.660 abc	12.59 ab
Macrofila	237.0 abc	52.8 a	7.87 bc	0.734 abc	10.73 ab
Willis	208.0 c	49.9 a	8.80 ab	0.781 abc	11.49 ab
Rusk	301.2 a	54.4 a	8.5 abc	0.641 bc	13.33 ab
C-32	249.0 abc	53.8 a	8.30 abc	0.713 abc	11.66 ab
Rubidoux	240.0 abc	50.4 a	8.17 bc	0.847 a	9.63 b
Sunki x Trifoliado	248.8 abc	47.6 a	8.32 abc	0.781 abc	10.73 ab
Morton	250.2 abc	50.2 a	8.60 abc	0.647 abc	13.52 ab
Tukey 0.05	65.2	7.28	1.01	0.204	4.23

[†] SST = sólidos solubles totales. [‡] Medias con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales (Tukey P ≤ 0.05).

promisorio, "Carrizo", "Macrofila", "Sunki x Trifoliado" y "Amblicarpa" no produjeron frutos de mayor tamaño que naranjo agrio, inclusive el híbrido "Sunki x Trifoliado" produjo los frutos más pequeños. El volumen de jugo por fruto (Cuadro 3) varió de 47.6 a 54.7%, sin embargo, no se tuvieron diferencias estadísticas entre portainjertos. De acuerdo con la literatura, este porcentaje de jugo es aceptable para naranjo Valencia en condiciones subtropicales (Castle *et al.*, 1993; Castle y Gmitter, 1999; Jackson, 1999).

En general, la calidad de jugo fue, de acuerdo con los valores establecidos, aceptable para la mayoría de los portainjertos. Naranjo agrio, que es el portainjerto para la referencia de calidad (Hutchison, 1978), en este estudio tuvo contenidos de azúcar más bajos que los determinados por Reyes *et al.* (1984), sin embargo, la acidez y cociente SST/acidez (valores mayores que 10) del jugo fue aceptable según referencias previas (Jackson, 1999). Es de señalar que se tuvieron diferencias altamente significativas para calidad de jugo, el comportamiento de Volkameriana resultó congruente con lo indicado por Del Valle *et al.* (1981), sin embargo, contrastó con lo observado para "Amblicarpa", ya que este portainjerto desarrolló frutos de buena calidad de jugo en este estudio. Los portainjertos tipo limón, Volkameriana y Macrofila propiciaron los menores valores de SST en la fruta lo cual es característico para este tipo de portainjertos (Cuadro 3).

Dentro de los citranges, "Rusk" es utilizado principalmente para mandarinos y, en menor escala, para naranjo en Florida (Campbell, 1972; Hutchison, 1978, 1982; Castle, 1982), debido a que los árboles tienen menor porte que otros citranges, pero con mayor calidad de fruta y jugo (Cuadros 1 y 3); en el estudio, "Rusk" tuvo mayor tamaño de fruta y una calidad de jugo comparable con el resto de los citranges y con el testigo naranjo agrio. Con el mandarino "Sun Chu Sha" y naranjo agrio, se registraron los más altos valores de SST, aceptable grado de acidez y cociente SST/acidez muy bueno en el jugo de frutos de naranja.

Eficiencia de Producción

Los resultados de eficiencia de producción (t m⁻³ de follaje) se muestran en el Cuadro 4. La eficiencia de producción media (cuatro años), osciló entre 0.26 y 0.69 t m⁻³. Los portainjertos sobresalientes en rendimiento "Volkameriana", "Carrizo", "Sunki x Trifoliado", "Amblicarpa" y "Macrofila" fueron más eficientes que el tratamiento testigo (naranjo agrio) en cada uno de los ciclos, aunque resultaron estadísticamente iguales.

Los valores de eficiencia de producción más bajos se observaron con "Cleopatra", "Sun Chu Sha", "Willis", "C-32" y "Rubidoux", sin embargo, no fueron diferentes estadísticamente al testigo. En contraste, la eficiencia de producción media con "Sun Chu Sha",

Cuadro 4. Eficiencia de producción para naranjo "Valencia" injertado sobre 15 portainjertos en rancho San José, Tecomán, Colima. (1997 a 1998 y 2000 a 2001).

Portainjertos	Ciclo de cosecha (Eficiencia t m ⁻³ de follaje)				Eficiencia media
	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	
Volkameriana	0.57 ab [†]	0.62 a	0.63 abcd	0.52 abc	0.58 abc
Carrizo	0.49 abc	0.66 a	0.70 abc	0.59 ab	0.61 ab
Shekwasha	0.41 abc	0.47 ab	0.41 bcd	0.52 abc	0.45 bcde
Cleopatra	0.36 bc	0.26 b	0.37 bcd	0.36 bc	0.34 de
Naranjo agrio	0.48 abc	0.49 ab	0.56 abcd	0.47 abc	0.50 abcd
Sun Chu Sha	0.35 bc	0.26 b	0.33 cd	0.30 c	0.31 e
Rangpur	0.46 abc	0.53 ab	0.59 abcd	0.52 abc	0.52 abc
Amblicarpa	0.52 abc	0.53 ab	0.65 abc	0.52 abc	0.55 bcd
Macrofila	0.56 ab	0.57 ab	0.66 abc	0.49 abc	0.57 abc
Willis	0.31 bc	0.41 ab	0.41 bcd	0.37 bc	0.38 bcde
Rusk	0.58 ab	0.58 ab	0.59 abcd	0.48 abc	0.56 abcd
C-32	0.27 c	0.50 ab	0.26 cd	0.25 c	0.32 e
Rubidoux	0.26 c	0.25 b	0.25 d	0.26 c	0.26 e
Sunki x Trifoliado	0.64 a	0.71 a	0.80 a	0.64 a	0.69 a
Morton	0.48 abc	0.50 ab	0.58 abcd	0.49 abc	0.51 abcd
Tukey 5%	0.27	0.18	0.21	0.13	0.20

[†] Medias con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$).

"C-32" y "Rubidoux" resultaron estadísticamente inferiores al testigo; esto se debió a que en todos los ciclos registraron las menores eficiencias.

Al comparar naranjo agrio con los portainjertos tipo limón, mandarinos y trifoliados no se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos. Sin embargo, la comparación entre portainjertos dentro del grupo de los citranges indicó que el "Carrizo" resultó superior (altamente significativa) a "C-32" y "Willis". En tanto que al usar "Amblicarpa" no registraron diferencias estadísticas en la eficiencia de producción de naranja con el resto de los mandarinos, excepto el "Sun Chu Sha". Por último, se observaron diferencias estadísticas en eficiencias de producción entre años y para la interacción años x portainjertos; éstas se atribuyeron a diferencias en crecimiento y variaciones climáticas entre años.

CONCLUSIONES

- El objetivo del estudio se logró al encontrar portainjertos alternativos al testigo naranjo agrio, que mostraron buena adaptación al suelo calcimórfico, vigor adecuado, buen rendimiento y calidad de jugo aceptable. Los portainjertos "Amblicarpa" y "Volkameriana" mostraron mayor crecimiento y vigor. En cuanto a rendimiento (t m⁻³) sobresalieron "Volkameriana", "Macrofila", "Carrizo", "Amblicarpa" y "Sunki x Trifoliado"; los tres últimos son importantes, ya que corresponden al grupo de citranges, mandarinos y

trifoliados, respectivamente. En general, todos los portainjertos produjeron frutos con buena calidad de jugo. "Rubidoux", "Sun Chu Sha" y "Cleopatra" mostraron crecimientos bajos, rendimientos y eficiencia de producción muy bajos. La mayor eficiencia media de producción se obtuvo en "Sunki x Trifoliado", "Volkameriana", "Carrizo", y "Macrofila"; la más pobre eficiencia se registró en "Rubidoux", "Willis", "Sun Chu Sha" y "Cleopatra".

- Entre los portainjertos más promisorios a suelos calcáreos de la región se encuentran "Sunki x Trifoliado", "Volkameriana", "Carrizo", "Macrofila" y "Amblicarpa". Sin embargo, en la literatura "Macrofila" se reporta como muy susceptible al virus de la tristeza de los cítricos.

LITERATURA CITADA

- Alva, A.K. y D.H. Tucker. 1999. Soils and nutrition. pp. 59-71. In: L.W. Timmer y L.W. Duncan (eds.). Citrus health management. The American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN.
- Campbell, C.W. 1972. Rootstock effects on tree size and yield of "Tahiti" lime. Proc. Fla. State Hort. Soc. 85: 332-334.
- Castle, W.S. 1982. Commercial rootstock in the United States. Fruit Var. J. 236(3): 74-79.
- Castle, W.S. y F.G. Gmitter. 1999. Rootstock and scion selection. pp. 21-34. In: L.W. Timmer y L.W. Duncan (eds.). Citrus health management. The American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN.

- Castle, W.S., D.P.H. Tucker, A.H. Krezdorn y C.O. Youtsey. 1993. Rootstocks for Florida citrus. Special Publication SP-42. University of Florida. Gainesville, FL.
- Castle, W.S., D.P.H. Tucker, A.H. Krezdorn y C.O. Youtsey. 1989. Rootstocks for Florida citrus. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida. Gainesville, FL.
- CoHort Software. 1995. CoStat Manual 5.00. Minneapolis, MN.
- Del Valle, N., O. Herrera y A. Rios. 1981. The influence of rootstocks on the performance of Valencia orange under tropical conditions. Proc. Int. Soc. of Citriculture 1: 134-137.
- Durón N., L.J. 1999. Establecimiento de huertas. In: L.J. Durón N., B. Valdez G., J.H. Núñez M. y G. Martínez D. (eds.). Cítricos para el noroeste de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Hermosillo, Sonora, México.
- FAO. 1991. Soil Resources. An explanatory note on the FAO World Soil Resources. Map at 25 000 scale. World Soil Resources Rep. 66. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Ferguson, L., N. Sakovich y M.L. Roose. 1990. California citrus rootstocks. Publication 21477. University of California. Davis, CA.
- Gardner, F.E. y G.E. Horanic. 1967. *Poncirus trifoliata* and some of its hybrids as rootstocks for Valencia sweet orange. Proc. Fla. State Hort. Soc. 80: 85-88.
- Goldschmidt, E.E. y P. Spiegel-Roy. 1996. Biology of citrus. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Hutchison, D.J. 1978. Influence of rootstock on the performance of Valencia sweet orange. pp. 523-525. In: Grierson, W. (ed.). Proc. Int. Soc. Citriculture. Citriculture II., Orlando. Fla. Intern. Soc. Citriculture. Lake Alfred, FL.
- Hutchison, D.J. 1982. Performance of Queen orange trees on 15 rootstocks. Proc. Fla. Sta. Hort. Soc. 94: 29-30.
- Jackson, L.K. 1999. Citrus cultivation. pp. 17-21. In: Citrus health management. L.W. Timmer y L.W. Duncan (eds.). The American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN.
- Nef, E. 1997a. Rootstock: One size does not fit all. Citrus Industry 78(2): 48-50.
- Nef, E. 1997b. Which rootstocks will make the most money? Citrus Industry 78(6): 17-18.
- Núñez, M. 1981. A study of some fruit quality indexes on three citrus species influenced by different rootstocks. Proc. Int. Soc. of Citriculture 1: 146-148.
- Orozco S., M. 1995. Enfermedades presentes y potenciales de los cítricos en México. Primera edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Pérez Z., O. 1999. Distribución y acumulación de carbonato de calcio en los suelos de la llanura costera de Tecmán, Colima. Agrociencia 33: 11-20.
- Reyes, F.J., E.E. Monteverde y M. Espinoza. 1984. Preliminary results of Valencia Orange on several rootstocks in Venezuela. Proc. Int. Soc. of Citriculture 1: 34-35.
- Roose, M.L., D.A. Cole, D. Atkin y D.R. Kupper. 1989. Yield and tree size of four citrus cultivars on 21 rootstocks in California. J. Am. Soc. Hort. Sci. 114: 678-684.
- Russo, F. y G. Reforgiato-Recupero. 1984. Recent results of some citrus rootstocks experiments in Italy. Proc. Int. Soc. of Citriculture 1: 42-45.
- Simón, A. y R. Jiménez. 1986. El Citrus amblycarpa, un patrón con perspectivas para la citricultura cubana. pp. 275-277. In: Vol. 1. Mem. Simp. Int. Citricultura Tropical. La Habana, Cuba.
- Sobrinho, J.T., J. Pompeum, J.O. Figuerido, D. Barbin y C.G.B. Demetrio. 1984. Fourteen-year study of rootstocks for Valencia and Natal Sweet oranges. Proc. Int. Soc. of Citriculture 1: 27-28.
- Tribulato, E., G. Continella, P. Damigella y G. Mangano. 1981. Comparative observations on the root systems of eleven citrus rootstocks. Proc. Int. Soc. of Citriculture 1: 137-140.
- Tucker, D.P.H., A.K. Alva, L.K. Jackson y T.A. Wheaton. 1995. Nutrition of Florida citrus trees. Publ. SPI169. Univ. Fla. Coop. Ext. Serv. Gainesville, FL.
- Valdez-Verduzco, J. y V.M. Medina-Urrutia. 1981. Influence of rootstocks on Mexican lime performance in Colima, Mexico. Proc. Int. Soc. of Citriculture 1: 142-144.
- Wardowski, W., J. Soule, W. Grierson y G.W. Westbrook. 1979. Florida quality test. Bulletin 188. Florida Cooperative Ext. Service. Inst. of Food and Agric. Sci., University of Florida. Gainesville, FL.
- Zekri, M. 1995. Nutritional deficiencies in citrus trees: iron, zinc and manganese. Citrus Industry 76: 16-17.

SOLUCIONES NUTRITIVAS DILUIDAS PARA LA PRODUCCIÓN DE JITOMATE A UN RACIMO

Diluted Nutrient Solutions for Single-Truss Tomato Production

Teodoro Gómez-Hernández¹ y Felipe Sánchez-del Castillo¹

RESUMEN

Este trabajo se realizó con el propósito de determinar qué tanto pueden disminuirse las concentraciones de los nutrimentos de la solución nutritiva que normalmente se usa en siembras comerciales para la producción hidropónica de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en invernadero, sin que se afecte el rendimiento ni la calidad de fruto. Se trabajó con el cultivar Solarset despuntado para dejar sólo un racimo por planta a una densidad de 24 plantas m⁻² de superficie. El riego se manejó sin recirculación de la solución (drenaje libre) con un sistema de goteo, usando como sustrato arena de tezontle rojo. Se compararon tres tratamientos básicos (concentración normal, 66 y 33 % de dicha concentración) y otros seis manejando la concentración normal, pero disminuyendo en 33 y 66 % la concentración de N, P o K. Se utilizó un diseño en bloques al azar con nueve tratamientos, cuatro repeticiones y dos plantas por unidad experimental. El mayor rendimiento se obtuvo con la solución a 66 % el cual fue 6.9 % más que con el control y 29 % más que con la solución a 33 %. A pesar de esa magnitud, no hubo diferencias significativas entre dichos tratamientos. En un experimento paralelo con dos tratamientos, cuatro repeticiones y cinco plantas por unidad experimental, se comparó el consumo de solución nutritiva usando acolchado plástico contra un testigo sin acolchar. Se encontró que hubo un ahorro significativo de 7.35 % en el consumo de solución nutritiva cuando se usó acolchado plástico, mejorando la eficiencia del uso del agua. En términos económicos, el ahorro en solución nutritiva fue equivalente a \$ 5640 ha⁻¹, mientras que el costo del plástico para acolchar equivaldría apenas a \$ 2290 ha⁻¹, sin considerar que dicho plástico podría usarse por un ciclo más.

¹ Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 carretera México-Texcoco. 56230 Chapingo, México. Tel. y Fax (595) 9540957. (fsanchezdelcastillo@yahoo.com.mx)

Recibido: Noviembre de 2001. Aceptado: Junio de 2002.
Publicado en Terra 21: 57-63.

Palabras clave: Despunte, alta densidad, solución nutritiva, hidroponía, *Lycopersicon esculentum* Mill.

SUMMARY

This work was carried out with the purpose of determining how much the concentrations of major nutrients of a nutrient solution that is generally used in commercial greenhouses for the hydroponics production of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.) can be decreased, without affecting yield or fruit quality. Plants of the cultivar Solarset were decapitated to leave only one cluster per plant and managed at a density of 24 plants m⁻² of effective area. The irrigation was managed without recirculation of the solution (free drainage) with a drip irrigation system, using red volcanic sand (tezontle) as substrate. Three basic treatments (normal concentration, 66 and 33 % of this concentration) and another six treatments were compared, managing the normal concentration, but reducing the concentration of N, P or K by 33 and 66 %. A randomized block design with nine treatments, four repetitions and two plants per experimental unit was used. The highest yield was obtained with the solution at 66 %, 6.9 % higher than the control and 29 % higher than with the solution at 33 %. In spite of that magnitude, there were no significant differences among these treatments. In a parallel experiment with two treatments, four replications and five plants per experimental unit, the consumption of nutrient solution using a polyethylene mulch was compared against a control without mulch. A significant saving of 7.35 % was found in the consumption of nutrient solution when plastic mulch was used, improving the efficiency in water use. In economic terms, the savings in nutrient solution was equivalent to 5640 Mexican pesos ha⁻¹, while the cost of the plastic was 2990 Mexican pesos ha⁻¹, without considering that the plastic can be used for another crop cycle.

Index words: Trimming, high density, nutrient solution, soilless culture, *Lycopersicon esculentum* Mill.

INTRODUCCIÓN

Se han publicado muchas fórmulas para diferentes cultivos acerca de la composición y concentración de las soluciones nutritivas empleadas en la hidroponía por diversos investigadores (Sánchez y Escalante, 1989; FAO, 1990; Resh, 1992); sin embargo, hay que considerar que la composición específica más adecuada depende de las condiciones climáticas, en particular de la temperatura y de la luz y sobre todo de la calidad del agua que se utilice. Se deben también de tomar en cuenta las necesidades nutrimentales de la planta a la que se va a aplicar, así como la edad o etapa fenológica de la misma y el sistema con el cual se lleve a cabo el cultivo; es decir, si se trata de un sistema cerrado en el cual hay recirculación de la solución nutritiva o si se trata de un sistema abierto en el cual no hay recirculación de la solución. Todos estos factores hacen difícil dar reglas generales para la preparación de la solución nutritiva (FAO, 1990; Resh, 1992).

Se han hecho varios trabajos en los que se evalúan diferentes concentraciones de la solución nutritiva y se ha encontrado, tanto en sistemas cerrados como en sistemas abiertos, que el rendimiento es poco afectado por el empleo de concentraciones de nutrimentos menores que las usualmente recomendadas. Por ejemplo, Pineda y Sánchez (1998) llevaron a cabo una investigación en la que se disminuyó la concentración de la solución nutritiva recomendada para crisantemo (*Dendranthema grandiflora*), buscando el valor al que se podía bajar dicha concentración sin que se presentaran deficiencias nutrimentales. Sus resultados indican que en un sistema abierto puede reducirse la concentración de los macronutrimentos en la solución nutritiva hasta en 50 % de lo que normalmente se recomienda en los cultivos hidropónicos, sin afectar la calidad comercial del crisantemo.

En el cultivo de jitomate, también se han probado diferentes concentraciones y se encontró que en un sistema de cultivo en el que la solución se recircula, hay poca respuesta a varios nutrimentos dentro de un intervalo amplio. Así que, según algunos trabajos, no hay efecto significativo en el rendimiento por el uso de diferentes concentraciones, dentro del intervalo de 10 a 320 mg L⁻¹ de N o de 5 a 200 mg L⁻¹ de P y de 20 a 300 mg L⁻¹ de K (Adams, 1986; FAO, 1990; Chung *et al.*, 1992; Chi y Han, 1994; Cadahía, 1995). Sin embargo, fundamentalmente las evaluaciones que se han desarrollado han sido para sistemas hidropónicos que involucran la recirculación de la solución nutritiva

(sistemas cerrados) y hay pocos trabajos realizados en sistemas hidropónicos sin recirculación de la solución (sistemas abiertos).

En la Universidad Autónoma Chapingo, se ha trabajado desde hace 15 años en una línea de investigación sobre la producción intensiva de jitomate en hidroponía, con el propósito básico de generar un paquete tecnológico factible y redituable, a fin de lograr al menos cuatro cosechas al año, mediante un sistema de producción con base en trasplantes tardíos y despuntes tempranos para dejar sólo uno o dos racimos por planta manejando altas densidades de población (Sánchez *et al.*, 1992, 1999; Sánchez y Ponce, 1998).

Lo que se ha tenido como meta es un sistema que no sea tan difícil ni tan sofisticado como el que se practica en los países nórdicos, o en los Estados Unidos, sino que pueda ser llevado a la práctica por los productores del país. Una de las bases para facilitar el manejo de la hidroponía en este paquete, la constituye el hecho de no recircular la solución nutritiva, pues con ello se evitan problemas de transmisión de enfermedades, salinidad, desbalance nutrimental y precipitación de compuestos, aspectos que para su manejo requieren de un mayor conocimiento técnico (Sánchez y Escalante 1989; Runia, 1994). Se han tenido varias experiencias exitosas con productores a escala comercial, de manera que en la actualidad los resultados obtenidos con este paquete tecnológico apuntan hacia la obtención de hasta 120 racimos m⁻² año⁻¹, mediante el manejo de diferentes aspectos del sistema (Sánchez *et al.*, 1998, 1999). Una forma de lograrlo es colocando 24 plantas m⁻² de superficie útil y manejando la poda de la planta a un solo racimo, tratando de tener cinco ciclos al año y una productividad cercana a 600 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Schwarz (1975), Douglas (1976), FAO (1990) y Resh (1992) manejaron intervalos de concentración óptimos para los nutrimentos que componen las soluciones nutritivas. Estos intervalos, medidos en mg L⁻¹, oscilan entre los valores siguientes: N: 150 a 300; P: 40 a 60; K: 200 a 400; Ca: 150 a 300; Mg: 30 a 60; S: 100 a 400; Fe: 0.5 a 3; Mn: 0.5 a 1; B: 0.5 a 1; Cu: 0.05 a 0.1; Zn: 0.05 a 0.1; Mo: 0.001 a 0.1.

Como parte del paquete tecnológico y con base en la experiencia comercial con productores, se ha manejado la siguiente concentración para el cultivo de jitomate: N: 250; P: 60; K: 300; Ca: 300; Mg: 60; S: 200; Fe: 2; Mn: 0.5; B: 0.5; Cu: 0.1; Zn: 0.1. Molibdeno y cloro, aunque esenciales, no se

añadieron pues se considera que se encuentran en cantidad suficiente como impurezas en los fertilizantes (Douglas, 1976) y en el agua utilizada.

Al aplicar este paquete tecnológico de producción de jitomate a escala comercial, se ha encontrado que el costo de la solución nutritiva que se requiere es de aproximadamente 10 pesos m^{-3} , lo que representa aproximadamente de 30 a 35 % del costo total de operación de un ciclo (Pineda y Sánchez, 1998); de ahí la necesidad de buscar alternativas que permitan disminuir el costo de la solución nutritiva por ciclo sin afectar el rendimiento por unidad de superficie o la calidad de los frutos (fuentes fertilizantes más baratas, bajar las concentraciones, ahorrar solución evitando evaporación a partir del sustrato y drenaje innecesario).

Por lo anterior, en este trabajo se planteó como objetivo el determinar los efectos de irrigar las plantas con soluciones nutritivas más diluidas de lo que se considera como una solución de concentración estándar en el paquete tecnológico comercial mencionado, basado en un sistema de riego por goteo sin recirculación de la solución y en el que se utiliza arena de tezontle como sustrato.

La hipótesis en que se sustentó el trabajo plantea que en el cultivo de jitomate manejado a un racimo por planta, donde se emplea arena de tezontle como sustrato hidropónico con un sistema abierto (sin recirculación de la solución nutritiva), es posible utilizar soluciones nutritivas con concentraciones menores que la que se considera normal o base, sin afectar el rendimiento por unidad de superficie ni la calidad del fruto.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó durante los meses de julio a diciembre de 1997 en un invernadero de vidrio ubicado en Cuautlalpan, municipio de Texcoco, estado de México, perteneciente a una empresa que se dedica a la producción comercial de jitomate. Se utilizó el cultivar híbrido Solarset. El sustrato empleado fue arena de tezontle rojo (partículas de 1 a 4 mm de diámetro), colocado en contenedores de plástico rígido de 18 L de capacidad. La superficie del sustrato se cubrió con plástico blanco para simular el acolchado que usa el productor. La solución nutritiva correspondiente a cada tratamiento se proporcionó por gravedad mediante un sistema de riego por goteo particular, usando como depósito cubetas plásticas de 18 L colocadas en alto y como emisores microtubos

de polietileno negro de 1 mm de diámetro interior. Los tratamientos que se compararon, fueron:

1. Concentración base (Cb)
2. 66 % de la Cb
3. 33 % de la Cb
4. Cb con sólo 66 % de N
5. Cb con sólo 33 % de N
6. Cb con sólo 66 % de P
7. Cb con sólo 33 % de P
8. Cb con sólo 66 % de K
9. Cb con sólo 33 % de K

La concentración base y las correspondientes cantidades para los tratamientos que requerían 66 y 33 % de la concentración de esos nutrimentos, se señalan en el Cuadro 1. Las fuentes utilizadas fueron fertilizantes comerciales: nitrato de calcio, sulfato de potasio, ácido fosfórico a 85 %, sulfato de magnesio, sulfato ferroso, sulfato de manganeso, borax, sulfato de cobre y sulfato de zinc.

También se instalaron otros contenedores con plantas de la misma edad que las usadas en el experimento, con el propósito de medir la evapotranspiración diaria, como un apoyo para conocer la cantidad de agua con que se tenían que regar las macetas del experimento. Para evaluar el consumo de agua, se registraron cotidianamente las mediciones de agua requerida para llevar el sustrato a saturación; agua drenada y agua consumida. Cada 24 h se determinó el agua consumida mediante la diferencia entre el agua agregada para saturar de nuevo la maceta y el agua drenada el día anterior inmediatamente después de saturar la maceta. Estas macetas se aprovecharon para montar un experimento accesorio con dos tratamientos: uno al que se le puso

Cuadro 1. Concentraciones de nutrimentos en la solución nutritiva base y en las que se empleó 66 y 33 % de ella.

Nutrimento	Concentración		
	Base (100 %)	66 % de la base	33 % de la base
	----- mgL ⁻¹ -----		
Nitrógeno	250.00	166.66	83.33
Fósforo	60.00	40.00	20.00
Potasio	300.00	200.00	100.00
Calcio	300.00	200.00	100.00
Magnesio	50.00	33.33	16.66
Azufre	200.00	132.00	66.00
Hierro	3.00	2.00	1.00
Cobre	0.05	0.03	0.01
Boro	0.50	0.33	0.16
Manganeso	0.50	0.33	0.16
Zinc	0.05	0.03	0.01

acolchado blanco, igual que a las macetas usadas para los tratamientos anteriormente descritos y otro tratamiento en el que las macetas no se acolcharon.

En ambos experimentos, se empleó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. En el primero, la parcela experimental estuvo constituida por dos contenedores en los que se colocaron al inicio cinco plantas, pero se dejaron desarrollar dos plantas hasta el final para evaluar las variables a la cosecha. En el segundo experimento, la unidad experimental consistió también de dos contenedores con cinco plantas cada uno. En ambos experimentos se registraron y analizaron las siguientes variables: 1) rendimiento comercial por unidad de superficie, 2) número de frutos por unidad de superficie y 3) peso fresco medio de fruto. Para fines de este trabajo se separaron del rendimiento total, aquellos frutos con diámetro menor que 4 cm, los que tuvieron alguna malformación y los que presentaron pudrición apical. En el caso del segundo ensayo, también se midió y analizó el agua consumida por día, capturando el agua drenada de los contenedores y calculando la diferencia entre la solución aplicada en cada riego menos la solución drenada.

Diez días después de que se inició la floración, es decir a 54 días después de la siembra (dds), se realizó el despunte, eliminando la yema terminal una hoja arriba del primer racimo, y de ahí en adelante se eliminaron también todos los brotes laterales, pues el sistema de manejo consistió en dejar un solo racimo por planta. Para cuando se realizó la cosecha se contaba con dos plantas por maceta y ello se tradujo en una densidad de 24 plantas m^{-2} de superficie útil, pues el arreglo físico de las dos macetas de cada tratamiento en promedio ocupó una superficie de 0.166 m^2 . Los primeros frutos se cortaron a 108 dds (11 de noviembre) y los últimos a 149 dds (22 de diciembre).

Los datos obtenidos se sometieron a análisis de varianza, pruebas de Tukey ($\alpha = 0.05$) y contrastes ortogonales. Para ello, se utilizó el programa computacional SAS (Statistical Analysis System).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En relación con la comparación de tratamientos con distintas soluciones nutritivas, los análisis de varianza (Cuadro 2) y las pruebas de Tukey con $\alpha = 0.05$ (Cuadro 3), indican que no se presentaron diferencias significativas atribuibles a los efectos de los tratamientos para ninguna de las variables

Cuadro 2. Cuadrados medios y valores de significancia para el rendimiento por unidad de superficie y sus componentes en jitomate cultivar Solarset.

FV	GL	Cuadrado medio		
		Rendimiento	Número de frutos	Peso medio de fruto
Bloque	3	10.17	190.33	419.03
Tratamiento	8	6.23	388.00	393.98
Error	24	4.94	178.33	304.46
Pr > F		0.31	0.07	0.29
(tratamiento)				
CV (%)		14.21	12.01	12.35
Media general		15.63 (g m^{-2})	111 (frutom $^{-2}$)	141 (g)

consideradas (rendimiento y número de frutos m^{-2} y peso fresco medio de fruto).

El hecho de no encontrar diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 5\%$) para ninguna de las variables es relevante, puesto que se probaron soluciones que implican el empleo de cantidades menores de fertilizantes, lo que puede transformarse en un importante ahorro económico a escala comercial. Sin embargo, como se presentaron diferencias que pueden ser importantes desde las perspectivas agronómica y económica, se hace un intento de explicar las tendencias que se observaron. También se hicieron algunas pruebas de contrastes para las variables de rendimiento y peso medio de fruto, partiendo de la consideración de que hubo tratamientos en que se apreciaron diferencias numéricas con tendencia a diferir estadísticamente.

Cuadro 3. Rendimiento comercial de frutos de jitomate por unidad de superficie y sus componentes (número de frutos y peso medio de frutos).

Tratamiento	Rendimiento	Frutos	Peso medio de fruto
	kg m^{-2}	número m^{-2}	g
66 % de la concentración base	17.55 a	131 a	135 a
66 % de fósforo	16.52 a	120 a	138 a
33 % de nitrógeno	16.49 a	111 a	149 a
Concentración base	16.41 a	105 a	156 a
66 % de nitrógeno	15.57 a	109 a	142 a
66 % de potasio	15.42 a	106 a	147 a
33 % de potasio	14.81 a	100 a	147 a
33 % de fósforo	14.28 a	117 a	122 a
33 % de la concentración base	13.60 a	100 a	135 a
DMS (Tukey $\alpha = 0.05$)	6.22	33.14	48.14

Medias con la misma letra dentro de columnas no presentan diferencias significativas.

El rendimiento comercial obtenido con el tratamiento de 66 % de la Cb fue numéricamente un poco mayor que el que se produjo con la solución base, pero su diferencia con el tratamiento de 33 % de la Cb fue de 4 kg m⁻² (29 %). Esa cantidad de fruto comercial equivale a más de 39 Mg ha⁻¹ y, si se considera que el precio de mayoreo pagado al productor por kg se mantuvo todo el año alrededor de \$ 8.00, eso representaría una diferencia de \$ 312 000 ha⁻¹ ciclo⁻¹, lo cual reviste importancia económica para los productores.

Según resultados en la prueba de contrastes, el valor de la probabilidad de diferir estadísticamente entre el tratamiento con 66 % de la Cb y el tratamiento con 33 % de la Cb en cuanto a rendimiento comercial, fue de $\alpha = 0.08$, por lo que la diferencia entre los efectos de estos tratamientos es considerable.

En función de lo anterior puede establecerse que resulta suficiente para rendimientos máximos que la solución nutritiva para el riego contenga 66 % de nutrimentos de la solución considerada como base. A escala comercial, este resultado es muy importante porque implica una disminución de los costos de operación de aproximadamente \$30 000 ha⁻¹ ciclo⁻¹ (más de \$100 000 año⁻¹).

Al bajar la concentración de sólo uno de los nutrimentos mayores, resultó que la disminución del rendimiento fue numéricamente mayor cuando se disminuyó el P o el K, ya que las diferencias entre el rendimiento total obtenido con la concentración base y el producido cuando se suministró 33 % de P o de K fue de 3.3 y 2.7 kg m⁻², respectivamente. Esta disminución en rendimiento no se manifestó cuando se redujo el N a 33 % de la concentración tomada como base.

Se presenta cierta semejanza de comportamiento en las variaciones de la concentración base y las variaciones de las concentraciones de P y K, lo que hace pensar que probablemente puedan manejarse comercialmente soluciones aún más diluidas que 66 % de la Cb si se mantiene al menos una concentración de 40 mg L⁻¹ de P y de 200 mg L⁻¹ de K, aspecto que valdría la pena investigar.

Cadahía (1995) señaló que la solución ideal lleva las siguientes concentraciones de estos nutrimentos: 105 de N; 62 de P, 273 de K, 180 de Ca y 36 de Mg.

En el presente estudio, las cantidades (en mg L⁻¹) de N, P, K, Ca y Mg de la concentración que fue suficiente para obtener buenos rendimientos (66 % de la Cb) fueron 167, 40, 200, 200 y 33, respectivamente.

Por lo tanto, se considera interesante probar si N y Ca pueden bajarse a 105 y 180 mg L⁻¹, propuestos por Cadahía (1995), manteniendo los demás elementos en las cantidades en que se tuvieron en el tratamiento con 66 % de la concentración base, o inclusive si el rendimiento no se afecta con concentraciones tan bajas como 50 % de la misma.

En el Cuadro 3, se aprecia que no hubo diferencias significativas para el número de frutos por unidad de superficie pero sí una tendencia a diferir. Los valores oscilaron desde 130.5 frutos m⁻² en el tratamiento correspondiente a 66 % de la Cb, hasta 100.5 frutos m⁻² en los tratamientos con 33 % de la Cb y con 33 % de K, lo que representa 30 % de disminución.

En cuanto al peso medio de fruto, la prueba de contrastes entre la concentración base y los tratamientos en que se disminuyó el P, presentó un valor de probabilidad significativo $\alpha = 0.02$; lo cual concuerda con el hecho de que el tratamiento con 33 % de P fue el más bajo (122 g), seguido por el tratamiento de 33 % de la Cb que presentó peso medio de fruto de 135 g.

Bergmann (1992) mencionó que plantas de jitomate deficientes en P, por lo general producen frutos de menor tamaño y peso, mientras que Marschner (1986) expresó que, en condiciones de deficiencia de este nutrimento, los procesos metabólicos se vuelven más lentos y las células en crecimiento alcanzan menor tamaño que las de plantas creciendo en condiciones normales de nutrición. En relación con el K, Besford y Maw (1975), Atherton y Harris (1986) y Ho y Hewitt (1986) indicaron que si el abastecimiento de este nutrimento es bajo, aumenta la absorción de flores y pequeños frutos y, en consecuencia, el rendimiento de fruto. Marschner (1986) argumentó que este efecto puede deberse a que la deficiencia de K afecta la síntesis de proteínas en las células que se encuentran en procesos de división o elongación.

En función de estos datos y de las tendencias que se observaron en el presente trabajo, puede pensarse que la disminución de la concentración de P a 20 mg L⁻¹, puede afectar en forma negativa el peso medio del fruto y la de K a 100 mg L⁻¹ al número de frutos; por lo tanto, la disminución en la concentración de ambos nutrimentos puede afectar el rendimiento. Estos resultados apuntan a que, en trabajos futuros de investigación con este tipo de sistema hidropónico sin recirculación, se estudien más

a fondo los efectos de los cambios en la concentración de dichos nutrientes.

En el ensayo paralelo que se realizó para evaluar el consumo de agua, los datos que se tomaron desde 46 a 150 dds, con el sistema para medir la evapotranspiración, se sometieron a la prueba de análisis de varianza y se encontró que hubo diferencias significativas ($\alpha = 0.05$), atribuibles a los efectos de los tratamientos para el total de agua consumida durante el ciclo, por lo que, una vez aplicada la prueba de Tukey (con $\alpha = 0.05$), puede afirmarse que hubo un consumo total 7.35 % mayor en el tratamiento no acolchado, correspondiente a 70.5 L m^{-2} más. La diferencia de consumo es más evidente en las primeras semanas de crecimiento del cultivo, mientras que en el resto del ciclo esta diferencia tiende a desvanecerse (Figura 1).

No hubo diferencia significativa por efecto de los tratamientos para la variable rendimiento por unidad de superficie, siendo el rendimiento total de 15.1 kg m^{-2} para el tratamiento en que se usó acolchado plástico y de 13.6 kg m^{-2} para el tratamiento en que no se utilizó el acolchado. La diferencia en el consumo de agua para una superficie de una hectárea significaría 705 m^3 . Si el costo del metro cúbico de solución nutritiva es de ocho pesos, resulta que por este concepto, la diferencia al final sería de \$ 5640 por no acolchar una ha de jitomate. El acolchado plástico costó el equivalente a \$ 2990 ha^{-1} (acolchado de 6600 m^2 de superficie útil con plástico calibre 120 galgas que rinde $30 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ a \$ 13 kg^{-1}) más \$ 500 de 10 jornales para su colocación y perforación; sin considerar la diferencia numérica en rendimiento, esto significa un ahorro de \$ 2150 ha^{-1} , además de que dicho plástico podría usarse en otro ciclo de cultivo. Por todo ello, se considera conveniente y económico utilizar esta técnica.

También el consumo diario de la solución nutritiva se promedió para cada semana y, de esa manera, se pudo obtener un indicador de la cantidad promedio de litros por metro cuadrado consumidos cada día, pero para períodos semanales resultó que la exigencia máxima llegó a ser de $14.5 \text{ L m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, hacia la semana 14, después se mantuvo por cinco semanas en alrededor de $12 \text{ L m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 1).

CONCLUSIONES

- El tratamiento con la solución en la que todos los nutrientes estuvieron a 66 % de la concentración base, produjo el mismo rendimiento comercial de

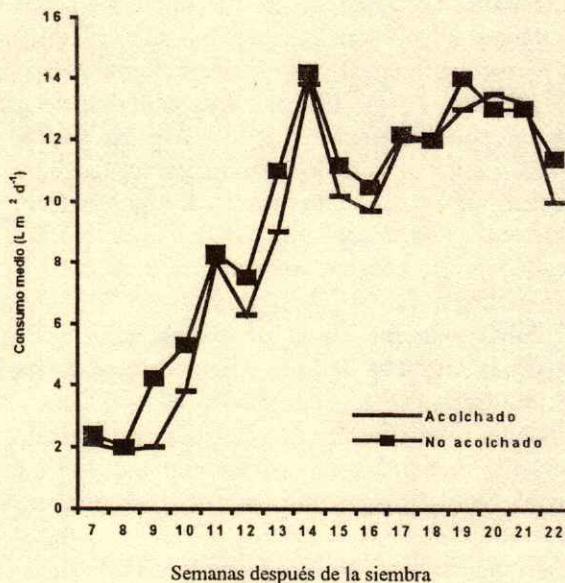


Figura 1. Consumo de agua por plantas de jitomate en condiciones de acolchado y no acolchado plástico (24 plantas m^{-2} de superficie útil despuntadas a un racimo por planta).

frutos que el de la solución completa, por lo que puede considerarse como el mejor desde el punto de vista económico.

- Aunque la disminución hasta 33 % de la concentración base no causó una pérdida significativa en el rendimiento de jitomate, desde el punto de vista económico hay una disminución considerable, por lo que no puede recomendarse comercialmente.

- La disminución en la concentración de P a 33 % de la solución nutritiva base no afectó estadísticamente el número de frutos, pero el peso medio del fruto sí tendió a disminuir, mientras que la disminución de K a 33 % de la solución nutritiva base tendió a provocar una disminución en el número de frutos.

- Hubo un ahorro de 7.35 % en el consumo de solución nutritiva en el tratamiento en que se usó acolchado plástico, mejorando la eficiencia del uso del agua.

AGRADECIMIENTOS

A los señores Antonio Junco Naranjo y Antonio Junco Rey, por el gran apoyo que representó el poder realizar la investigación en sus invernaderos. Gracias por todas las facilidades.

LITERATURA CITADA

- Adams, P. 1986. Mineral nutrition. pp. 281-334. *In*: J.G. Atherton y J. Rudich (eds.). The tomato crop: A scientific basis for improvement. Chapman and Hall. London, UK.
- Atherton, J.G. y G.P. Harris. 1986. Flowering. pp. 167-200. *In*: J.G. Atherton y J. Rudich (eds.). The tomato crop: A scientific basis for improvement. Chapman and Hall. London, UK.
- Bergmann, W. (ed.). 1992. Nutritional disorders of plants: Development, visual and analytical diagnosis. Gustav Fisher Verlag, New York.
- Besford, R.T. y G.A. Maw. 1975. Effect of tomato nutrition on tomato plant growth and fruit development. *Plant Soil* 42: 395-412.
- Cadahía L., C. 1995. Fertilización. pp. 167-187. *In*: F. Nuéz (ed.). El cultivo del tomate. Mundi Prensa. Madrid, España.
- Chi, S.H. y G.S. Han. 1994. Effect of nitrogen concentration in the nutrient solution during the first 20 days after planting on the growth and fruit yield of tomato plants. *J. Korean Soc. Hort. Sci.* 35(5): 415-420.
- Chung, S.J., B.S. Seo y B.S. Lee. 1992. Effects of nitrogen and potassium levels and their interaction on the growth and development of hydroponically grown tomato. *J. Korean Soc. Hort. Sci.* 33(3): 244-251.
- Douglas, J.S. 1976. *Advanced Guide to Hydroponics*. Drake Publishers. New York.
- FAO. 1990. *Soilless culture for horticultural crop production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.
- Ho, L.C. y J.D. Hewitt. 1986. Fruit development. pp. 201-240. *In*: J.G. Atherton y J. Rudich (eds.). The tomato crop: A scientific basis for improvement. Chapman and Hall. London, UK.
- Marschner, H. 1986. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press. New York.
- Pineda P., J. y F. Sánchez del C. 1998. Dilución de la solución nutritiva en el cultivo de crisantemo (*Dendranthema x grandiflorum*) en un sistema hidropónico abierto. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 4: 25-30.
- Resh, H.M. 1992. *Cultivos hidropónicos*. 3a ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Runia, W.T. 1994. Elimination of root-infecting pathogens in recirculation water from closed cultivation systems by ultra-violet radiation. *Acta Horticulturae* 361: 361-371.
- Sánchez del C., F. y E. Escalante R. 1989. *Hidroponía: Un sistema de producción de plantas*. 3a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Sánchez del C., F., P. Espinosa R. y E. Escalante R. 1992. Producción superintensiva de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en hidroponía bajo invernadero. *Avances de Investigación. Revista Chapingo* 78: 62-68.
- Sánchez del C., F., J. Ortiz C., C. Mendoza C., V. González H. y J. Bustamante O. 1998. Physiological and agronomical parameters of tomato in two new production systems. *Fitot. Mexicana* 21: 1-13.
- Sánchez del C., F. y J. Ponce O. 1998. Densidades de población y niveles de despunte en jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado en hidroponía. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 4(2): 89-94.
- Sánchez del C., F., J. Ortiz C., C. Mendoza C., V.A. González H. y M.T. Colinas L. 1999. Características morfológicas asociadas con un arquetipo de jitomate apto para un ambiente no restrictivo. *Agrociencia* 33: 21-29.
- Schwarz, M. 1975. *Guide to Commercial Hydroponics*. Israel Universities Press. Jerusalem, Israel.

COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR LA FIJACIÓN DE N₂ EN FRIJOL EN CONDICIONES DE CAMPO

Use of Different Indicators for Measuring N₂ Fixation in Common Bean under Field Conditions

O.A. Grageda-Cabrera^{1‡}, J.A. Vera-Núñez², J.Z. Castellanos¹ y J.J. Peña-Cabriales²

RESUMEN

Se realizó un estudio en el cual se compararon diferentes métodos para estimar la fijación de N₂ en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de campo; se emplearon dos variedades contrastantes en su potencial de fijar N₂: Flor de Mayo RMC y Bayocel. Los métodos evaluados fueron: dilución isotópica de ¹⁵N, masa nodular, actividad de reducción de acetileno (ARA) y contenido de ureidos. La técnica de dilución isotópica de ¹⁵N, la cual se tomó como referencia, mostró que las tasas más altas de fijación de N₂ ocurrieron al inicio del desarrollo reproductivo (70 a 77 días después de la siembra). Sin embargo, al mismo tiempo, tanto la masa nodular, como la ARA disminuyeron considerablemente. El contenido de ureidos en tallo en esta etapa presentó una correlación positiva ($r = 0.7304^{**}$) con el nitrógeno fijado estimado con la técnica isotópica. Dado que los nódulos de las raíces laterales son difíciles de monitorear en condiciones de campo, la ARA y la masa nodular pueden subestimar la fijación de N₂. En cambio, el contenido de ureidos en la parte aérea es un reflejo de la nodulación total, y la estimación de su concentración en tallo en la etapa de desarrollo reproductiva (R7) puede emplearse como un método indirecto confiable para determinar el potencial de fijación de N₂ en frijol cultivado en condiciones de campo.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., actividad de reducción de acetileno, dilución isotópica ¹⁵N, fijación de N₂, ureidos.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. km 6.0 Carr. Celaya-San Miguel de Allende, Apartado Postal 112, 38010 Celaya, Guanajuato, México.

[‡] (osgraca@hotmail.com)

² CINVESTAV-Instituto Politécnico Nacional, Unidad Irapuato. km 9.6 Lib. Nte. Carr. Irapuato-León, Apartado Postal 629, 36500 Irapuato, Guanajuato, México.

Recibido: Enero de 2001. Aceptado: Junio de 2002.
Publicado en Terra 21: 65-71.

SUMMARY

A field study was conducted to compare different methods to estimate N₂ fixation on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Nodule dry weight, acetylene reduction activity (ARA), ureide content, and ¹⁵N (isotope dilution technique) were measured. The ¹⁵N isotope dilution method showed that the highest N₂ fixation rate occurred during early reproductive stage [70 to 77 days after planting (dap)]. During this period, nodule dry weight and ARA decreased considerably. Ureide content in stems during early reproductive stage (70 dap) showed a positive correlation ($r = 0.7304^{**}$) with N₂ fixation measured by the isotopic method. Ureide content in stems at R7 can be employed as an effective indirect method for determining N₂ fixation potential in common bean grown in field conditions.

Index words: *Phaseolus vulgaris* L., acetylene reduction activity, ¹⁵N isotope dilution, biological nitrogen fixation, ureides.

INTRODUCCIÓN

En cualquier programa de mejoramiento para incrementar la fijación biológica de nitrógeno, es necesario contar con un método conveniente para cuantificarla (Danso, 1995). La fijación de N₂ es un proceso que se realiza por medio de un sistema enzimático denominado nitrogenasa, que transforma el nitrógeno atmosférico en amonio (Eady y Postgate, 1974). Los productos de la fijación de N₂ en leguminosas de origen tropical, como el frijol, son principalmente ureidos (McClure e Israel, 1979).

La estimación de la fijación de N₂ es necesaria para evaluar los efectos de las interacciones específicas entre Leguminosa-*Rhizobium*-Ambiente (Danso *et al.*, 1993). Sin embargo, ésta resulta difícil, dado que una vez que el nitrógeno forma parte de la planta, por lo general es imposible determinar su origen (Ham, 1980; Danso, 1995)

Existen numerosos métodos para cuantificar la fijación de N_2 y todos tienen sus ventajas y desventajas (Peoples, 1993). Sin embargo, las técnicas isotópicas de ^{15}N se consideran como las más confiables para suministrar valores cuantitativos e integrados del N_2 fijado. Este es el único método que permite distinguir la contribución relativa del nitrógeno del suelo, fertilizante y atmósfera al nitrógeno total de la planta (Faust, 1986; Danso *et al.*, 1993). Aunque este método es aceptado como el más confiable, hay relativamente pocos reportes en los cuales se emplea, debido a los altos costos del isótopo y los equipos para su detección.

La masa nodular, contenido de Leg-hemoglobina en nódulos, suministro de carbohidratos a la raíz, contenido de ureidos, reducción de acetileno y varias modificaciones del método Kjeldahl, son medidas indirectas que se han empleado como indicadores de la fijación de N_2 (McClure e Israel, 1979; Minchin *et al.*, 1981; Havelka *et al.*, 1982; Herridge, 1982; Patterson y LaRue, 1983; Schubert, 1986; Winkler *et al.*, 1988; Hardarson y Danso, 1993). Sin embargo, estos métodos presentan muchas limitaciones y sólo unos pocos se han utilizado como técnicas efectivas en campo (Westermann y Kolar, 1978). Por lo antes mencionado, el objetivo del presente estudio fue comparar diferentes métodos para estimar la fijación de N_2 en frijol en condiciones de campo. Se usó la técnica de dilución isotópica de ^{15}N como referencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se instaló en el Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP), Celaya, Guanajuato, México (20°34'N, 100°50'O, 1765 msnm). El suelo del área experimental presenta textura arcillosa, pH 7.7, 1.6% de materia orgánica y se clasifica como Vertisol pélico (FAO, 1994). Las variedades de frijol evaluadas fueron Flor de Mayo RMC y Bayocel, las cuales se identificaron previamente como contrastantes en su potencial de fijación de N_2 (Hardarson *et al.*, 1993). Se aplicó un inoculante multicepa directamente a la semilla en el momento de la siembra; éste se obtuvo de la colección microbiana del Laboratorio de Microbiología Ambiental del CINVESTAV-IPN, Unidad Irapuato. Como cultivos de referencia no fijadores, se incluyeron maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor* L.). Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con seis repeticiones y

cuatro tratamientos (cultivos). La siembra se realizó en surcos de 6 m de largo y 0.4 m de ancho. Se aplicaron en una franja de 1.5 m de cada parcela experimental 10 kg de N ha^{-1} como sulfato de amonio en solución marcado con 10.075% de átomos en exceso de ^{15}N . Toda el área experimental se fertilizó con $CaHP_2O_4$ a razón de 40 kg ha^{-1} .

El muestreo se realizó a partir de 22 días después de la siembra (dds) aproximadamente cada 10 días hasta finalizar el ciclo del cultivo. Todos los muestreos se obtuvieron de la parte fertilizada con ^{15}N .

Las variables para estimar la fijación de N_2 fueron: (a) Peso seco de nódulos (Somasegaran y Hoben, 1985). (b) ARA, para la cual se empleó la técnica propuesta por Dart *et al.* (1972); en este caso se usó un cromatógrafo de gases (Hewlett-Packard, serie 5880) equipado con un detector de ionización de flama y una columna Porapak N de acero inoxidable de 4.65 m de largo y 3.175 mm ϕ bajo las siguientes condiciones: temperatura del inyector a 120 °C, temperatura del horno a 100 °C y temperatura del detector a 120 °C; la tasa de flujo de los gases acarreadores fue de 30, 35 y 450 mL min^{-1} para N_2 , H_2 y aire, respectivamente. (c) Contenido de ureidos en nódulos, raíces, tallos, hojas y vainas (Patterson *et al.*, 1982). (d) La cantidad de nitrógeno fijado por el frijol se determinó usando la técnica de dilución isotópica ^{15}N (McAulliffe *et al.*, 1957; Fried y Middelbue, 1977), el material cosechado (1 m^2 , aproximadamente 25 plantas), se pesó y se separó en tallos, hojas y vainas; posteriormente, se secó a 70 °C; la determinación de N total y el porcentaje de átomos en exceso de ^{15}N se efectuaron por el método Kjeldahl, empleando un analizador 1500 ANA N y espectrómetro de masas VG, respectivamente.

Los cálculos y el análisis estadístico se efectuaron con el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1988), empleando la prueba de la Diferencia Mínima Significativa para la comparación de medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Asimilación de Nitrógeno

Las fuentes de nitrógeno acumulado a lo largo del ciclo de cultivo en las dos variedades estudiadas, se muestran en el Cuadro 1. El nitrógeno derivado de la atmósfera (N_{dda}) al igual que el nitrógeno derivado del suelo (N_{dds}) contribuyeron con la mayor cantidad de nitrógeno en la planta. Al finalizar el ciclo de

Cuadro 1. Acumulación de nitrógeno derivado del suelo (Ndds), del fertilizante (Nddf) y de la atmósfera (Ndda) a lo largo del ciclo de cultivo por las variedades de frijol Flor de Mayo RMC y Bayocel.

Dds [†]	Flor de Mayo RMC			Bayocel		
	Ndds	Nddf	Ndda	Ndds	Nddf	Ndda
	kg ha ⁻¹					
42	3.97	1.56	13.82 ^{***†}	7.57	1.70	5.93 ^{**}
49	10.84	1.60	23.27 ^{**}	13.72	1.99	16.62 ^{**}
56	16.78	1.71	34.15	17.75	1.81	27.39
63	23.06	1.20	42.94	32.30	1.70	33.95
70	25.07	1.13	40.35	36.80	1.50	53.68
77	70.55	2.15	60.36	67.13	2.18	77.77
84	76.52	1.94	55.55 [*]	64.72	1.72	75.71 [*]
91	70.51	1.72	62.66	66.42	1.77	72.09

[†] Dds = días después de la siembra. [†] Diferencias entre variedades: * = DMS a P ≤ 0.05. ** = DMS a P ≤ 0.01.

cultivo, del nitrógeno total, 46 y 53% se derivó de la atmósfera para Flor de Mayo RMC y Bayocel, respectivamente.

En la Figura 1, se describen las tasas diarias de asimilación de nitrógeno a distintos intervalos de tiempo. Se observa que durante el llenado de las vainas (71 a 77 dds), Flor de Mayo RMC y Bayocel presentaron la mayor asimilación de nitrógeno, proveniente tanto del suelo, como de la atmósfera. Se

ha observado en soya, haba, caupí y frijol, que existen altas tasas de fijación de N₂ en las etapas del desarrollo reproductivo (Klucas y Arp, 1977; Neves y Hungria, 1987; Zapata *et al.*, 1987; Wolyn *et al.*, 1989). Wolyn *et al.* (1989), en estudios de campo con frijol, determinaron que durante la etapa reproductiva los valores de las estimaciones indirectas de la fijación de N₂ (masa nodular, número de nódulos y ARA) fueron mayores en las raíces laterales que en los de la corona radical.

Masa Nodular

La fijación de N₂ en condiciones de campo es difícil de estimar por métodos indirectos. La masa nodular, contenido de Leg-hemoglobina y ARA se han empleado con éxito en invernadero para determinar la efectividad de combinaciones variedad-cepa; sin embargo, estas variables dependen de los nódulos incluidos en el análisis.

La dinámica de la nodulación se presenta en la Figura 2. Se observa que es muy similar en las dos variedades evaluadas y sólo existieron diferencias significativas en las etapas finales del ciclo de cultivo (84 y 97 dds); la variedad Bayocel produjo mayor masa nodular durante un período más prolongado que Flor de Mayo RMC. La presencia de nódulos inicialmente se detectó a 22 dds y alcanzó su máximo durante las etapas R6 y R7 (54 y 69 dds), posteriormente inició la senescencia y desaparición de los mismos.

Los estudios realizados por Wilson (1931) en frijol y Kossiak y Bohlool (1985) en soya, mostraron que la presencia de nódulos y cepas en las distintas zonas del sistema radical está determinada por la etapa de desarrollo de la planta.

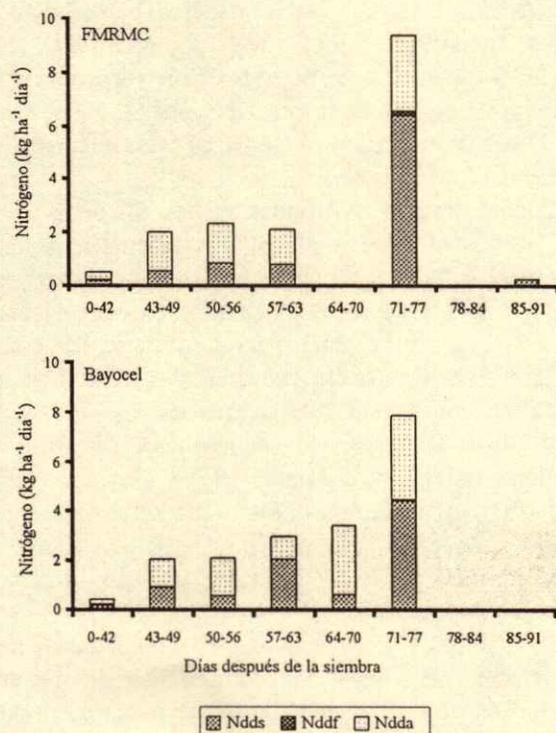


Figura 1. Tasas de asimilación de nitrógeno derivado del suelo (Ndds), del fertilizante (Nddf) y de la atmósfera (Ndda) en diferentes etapas del ciclo de cultivo.

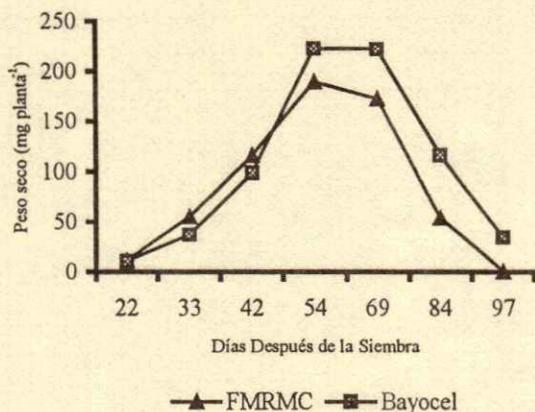


Figura 2. Cinética de la masa nodular a lo largo del ciclo de desarrollo.

Es importante mencionar que en condiciones de campo los nódulos de las raíces laterales, por lo general, no son considerados en el análisis, debido a lo difícil de su recolección y probablemente contribuyen con altas tasas de fijación de N_2 en las etapas reproductivas; por consiguiente, tanto las estimaciones de la ARA, como de la masa nodular pueden subestimar la fijación de N_2 en tales condiciones.

Actividad de Reducción de Acetileno

En la Figura 3, se muestra la ARA en distintas etapas del desarrollo del cultivo. Se observaron diferencias entre variedades a partir de 54 dds. La máxima ARA se presentó en las etapas de floración, para Flor de Mayo RMC fue a 42 dds, con una actividad de $2.053 \mu M C_2H_4 \text{ planta}^{-1} h^{-1}$, mientras que para Bayocel fue a 54 dds, con una actividad de $4.348 \mu M C_2H_4 \text{ planta}^{-1} h^{-1}$. En las etapas iniciales de nodulación (22 a 44 dds), las dos variedades redujeron cantidades similares de acetileno, pero a 54 dds, la variedad Bayocel alcanzó su máxima actividad, siendo más del doble que la presentada por Flor de Mayo RMC, a pesar de que ambas mostraron una masa nodular similar. Al respecto, Hungria y Neves (1987) mencionaron que las interacciones variedad-cepa presentan diferentes niveles de efectividad. Después del inicio de formación de vainas (69 dds), la actividad disminuyó paulatinamente hasta valores indetectables.

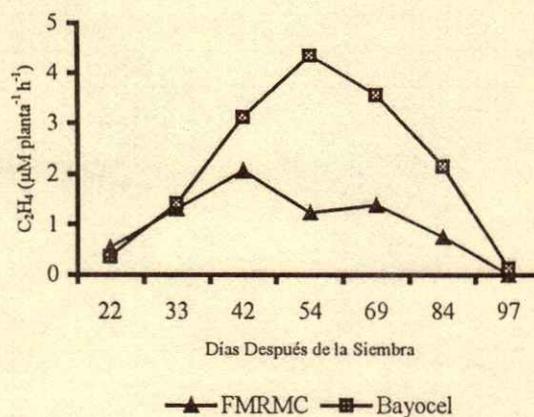


Figura 3. Cinética de la actividad de reducción de acetileno (ARA) a lo largo del ciclo de desarrollo.

Contenido de Ureidos

En la Figura 4, se muestra el contenido de ureidos en nódulos, raíces, tallos, hojas y vainas que presentaron las variedades a lo largo del ciclo de cultivo. Se observó que los tallos fueron la parte de la planta en los cuales se detectó la mayor cantidad de ureidos, existiendo diferencias significativas entre variedades desde 54 a 69 dds. Con respecto a los ureidos totales, la concentración en Flor de Mayo RMC llegó a su máximo valor a 69 dds, mientras que en Bayocel fue a 54 dds.

La distribución de ureidos en las distintas partes de la planta confirma modelos previamente reportados para frijol y soya (Atkins *et al.*, 1982; Patterson y LaRue, 1983), en los cuales la máxima concentración ocurre en los tallos, en especial, durante las etapas tempranas del desarrollo reproductivo, debido a que los tallos funcionan como reservorios de estos compuestos. Después, se remobilizan al fruto en desarrollo (McClure e Israel, 1979). Streeter (1979) observó en soya que los ureidos que se almacenan en el tallo más tarde se remobilizan a las vainas en desarrollo para sintetizar proteínas que contribuyen al desarrollo de la semilla.

En cambio, tanto las hojas, como las vainas presentaron pequeñas concentraciones de ureidos. Winkler *et al.* (1988) encontraron que aproximadamente 92% de los ureidos exportados de la raíz se metabolizan en las hojas. Cuando el abastecimiento de nitrógeno en frijol es principalmente a través de la

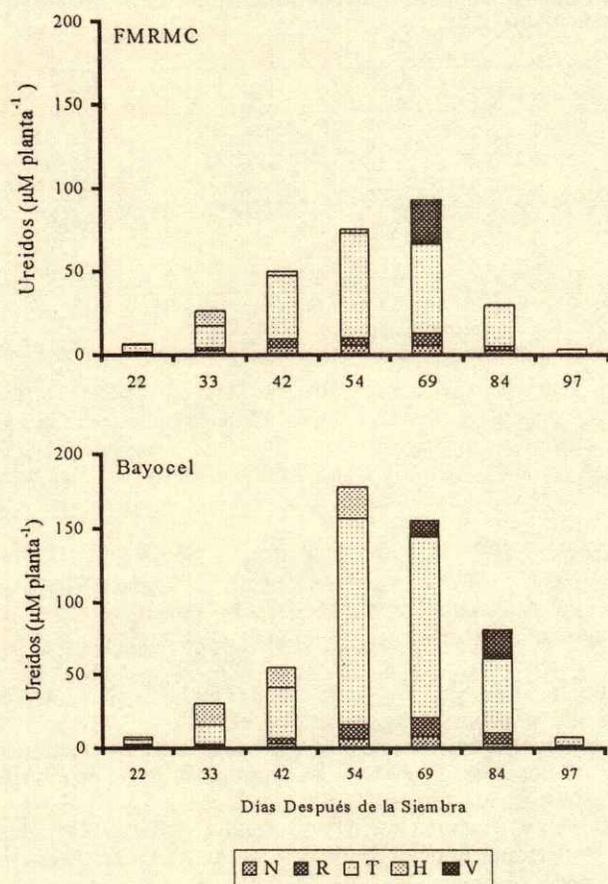


Figura 4. Fraccionamiento del contenido de ureidos en nódulos (N), raíces (R), tallos (T), hojas (H) y vainas (V) a lo largo del ciclo de desarrollo.

fijación, los ureidos pueden soportar directamente el crecimiento del embrión, ya que se metabolizan en las paredes de la vaina y la testa de las semillas (Meyer-Buthling *et al.*, 1987; Neves y Hungria, 1987).

Correlación entre Parámetros

Las matrices de coeficientes de correlación (r) entre los distintos métodos empleados para estimar la fijación de N₂, realizados a 69 y 97 dds, se presentan en los Cuadros 2 y 3, respectivamente. Se observa que la masa nodular, la ARA y el contenido de ureidos en nódulos mostraron correlación entre sí; sin embargo, sólo el contenido de ureidos en tallos correlacionó significativamente con el N₂ fijado estimado con la técnica isotópica de ¹⁵N.

Con respecto a la ARA, durante el ciclo de cultivo en muy pocas ocasiones correlacionó con la cantidad de nitrógeno estimado con la técnica de dilución isotópica de ¹⁵N, esto se debe a que la medición de la ARA es puntual e independiente en cada una de las etapas de muestreo y sólo es válida para el momento y las condiciones en que se realice, mientras que la determinación del N₂ fijado con la técnica de ¹⁵N es acumulativa a través del ciclo del cultivo (IAEA, 1990).

El contenido de ureidos en la parte aérea es una respuesta directa de la nodulación total. Patterson y LaRue (1983) sugirieron que la estimación del contenido de ureidos en tallos jóvenes en las etapas R5 ó R6 (floración y llenado de vaina) puede utilizarse para determinar el potencial de fijación de N₂ en soya. En la etapa R7 (70 dds), el contenido de ureidos en tallo fue alto en ambas variedades y existió correlación positiva ($r = 0.7304^{**}$) con el nitrógeno total fijado estimado con la técnica isotópica de ¹⁵N. McNeil y LaRue (1984) y Thomas *et al.* (1984) mencionaron que la concentración de estos compuestos muchas veces se ve afectada por las condiciones ambientales. Sin embargo, las condiciones ambientales pueden afectar todos los indicadores indirectos para estimar la fijación de N₂.

Cuadro 2. Matriz de coeficientes de correlación (r) entre diferentes parámetros analizados de fijación simbiótica de nitrógeno a 69 días después de la siembra en las variedades de frijol Flor de Mayo RMC y Bayocel.

	PSN [†]	ARA	UN	UT	UTL	¹⁵ NFT
PSN	1.0000	0.5052	0.9900 ^{**†}	0.2433	0.1590	0.2368
ARA	-	1.0000	0.5487	0.2033	0.0907	0.0977
UN	-	-	1.0000	0.3204	0.2455	0.2795
UT	-	-	-	1.0000	0.9677 ^{**}	0.7304 ^{**}
UTL	-	-	-	-	1.0000	0.6113 [*]
¹⁵ NFT	-	-	-	-	-	1.0000

[†] PSN = peso seco de nódulos, ARA = actividad de reducción de acetileno, UN = ureidos en nódulos, UT = ureidos en tallo, UTL = ureidos totales, ¹⁵NFT = nitrógeno fijado total determinado por la técnica isotópica. ^{*} Significancia a $P \leq 0.05$. ^{**} Significancia a $P \leq 0.01$.

Cuadro 3. Matriz de coeficientes de correlación (r) entre diferentes parámetros analizados de fijación simbiótica de nitrógeno a 97 días después de la siembra en las variedades de frijol Flor de Mayo RMC y Bayocel.

	PSN ^{a1}	ARA	UN	UT	UTL	¹⁵ NFT
PSN	1.0000	0.8335***†	0.9825**	0.2441	-0.0021	0.2883
ARA	-	1.0000	0.8536**	0.5345	0.3134	-0.0293
UN	-	-	1.0000	0.3659	0.0988	0.2859
UT	-	-	-	1.0000	0.8389**	-0.1667
UTL	-	-	-	-	1.0000	-0.3294
¹⁵ NFT	-	-	-	-	-	1.0000

† PSN = peso seco de nódulos, ARA = actividad de reducción de acetileno, UN = ureidos en nódulos, UT = ureidos en tallo, UTL = ureidos totales, ¹⁵NFT = nitrógeno fijado total determinado por la técnica isotópica. † Significancia a P ≤ 0.05. ** Significancia a P ≤ 0.01.

CONCLUSIONES

En el presente estudio, se compararon diferentes métodos para estimar la fijación de N₂ en frijol cultivado en condiciones de campo. La mayor actividad fijadora de N₂ se presentó durante el llenado de las vainas; sin embargo, en este período, tanto la masa nodular, como la ARA disminuyeron de manera considerable, por lo que las estimaciones de estos parámetros pueden subestimar el potencial de la fijación de N₂ en tales condiciones. Sólo la determinación del contenido de ureidos en tallo en la etapa R7 presentó correlación altamente significativa con el N₂ fijado, estimado con la técnica de dilución isotópica ¹⁵N. Por consiguiente, los autores lo consideran como un método indirecto efectivo para determinar el potencial de fijación de N₂ en frijol cultivado en condiciones de campo.

LITERATURA CITADA

- Atkins, C.A., J.S. Pate, A. Ritchie y M.B. Peoples. 1982. Metabolism and translocation of allantoin in ureide producing grain legumes. *Plant Physiol.* 70: 1-6.
- Danso, S.K.A. 1995. Assessment of biological nitrogen fixation. *Fert. Res.* 42: 33-41.
- Danso, S.K.A., G. Hardarson y F. Zapata. 1993. Misconceptions and practical problems in the use of ¹⁵N soil enrichment techniques for estimating N₂ fixation. *Plant Soil* 152: 25-52.
- Dart, P.J., J.M. Day y D. Harris. 1972. Assay of nitrogenase activity by acetylene reduction. pp. 85-100. *In: FAO/IAEA (ed.) Use of isotopes for study of fertilizer utilization by legume crops.* FAO. Vienna, Austria.
- Eady, R.R. y J.R. Postgate. 1974. Nitrogenase. *Nature* 249: 805-810.
- FAO. 1994. World reference base for soil resources. Wageningen, The Netherlands. Rome, Italy.
- Faust, H. 1986. ¹⁵N in biological nitrogen fixation studies: A bibliography. *Zfl-Mitteilungen* 114: 3-120.
- Fried, M. y V. Middelbue. 1977. Measurement of amount of nitrogen fixed by a legume crop. *Plant Soil* 47: 713-715.
- Ham, G.E. 1980. Isotope techniques in research on biological dinitrogen fixation by legumes. pp. 85-94. *In: IAEA International Atomic Energy Agency (ed.) Nuclear techniques in the development of management practices for multiple cropping systems.* IAEA. Vienna, Austria.
- Hardarson, G. y S.K.A. Danso. 1993. Methods for measuring biological nitrogen fixation in grain legumes. *Plant Soil* 152: 19-23.
- Hardarson, G., F.A. Bliss, M.R. Cigales-Rivero, R.A. Henson, J.A. Kipe-Nolt, L. Longeri, A. Manrique, J.J. Peña-Cabrales, P.A.A. Pereira, C.A. Sanabria y S.M. Tsai. 1993. Genotypic variation in biological nitrogen fixation by common bean. *Plant Soil* 152: 59-70.
- Havelka, U.D. M.G. Boyle y R.W.F. Hardy. 1982. Biological nitrogen fixation. *Agron.* 22: 366-422.
- Herridge, D.F. 1982. Relative abundance of ureides and nitrate in plant tissues of soybean as quantitative assay of nitrogen fixation. *Plant Physiol.* 70: 1-6.
- Hungria, M. y M.C.P. Neves. 1987. Cultivar and rhizobium strain effect on nitrogen fixation and transport in *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Soil* 103: 111-121.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. 1990. Nuclear techniques in the development of management practices for multiple cropping systems. A technical document. IAEA. Vienna, Austria.
- Klucas, R.V. y D. Arp. 1977. Physiological and biochemical studies on senescing tap root nodules of soybean. *Can. J. Microbiol.* 23: 1424-1432.
- Kosslak, R.M. y B.B. Bohlool. 1985. Influence of environmental factors on interstrain competition in *Rhizobium japonicum*. *Appl. Environ. Microbiol.* 49: 1128-1133.
- McAuliffe, C., D.S. Chamblee, H. Uribe-Arango y W. J. Woodhouse. 1957. Influence of inorganic nitrogen on nitrogen fixation by legumes as revealed by ¹⁵N. *Agron. J.* 15: 334-337.
- McClure, P.R. y D.W. Israel. 1979. Transport of nitrogen in the xylem of soybean plants. *Plant Physiol.* 64: 411-417.
- McNeil, D.L. y T.A. LaRue. 1984. Effect of nitrogen source on ureides in soybean. *Plant Physiol.* 74: 227-231.
- Meyer-Buthling, L.E., J.C. Polacco y S.R. Cianzio. 1987. Pleiotropic soybean mutants, defective in both urease isozymes. *Mol. Gen. Genet.* 209: 432-438.
- Minchin, F.R., R.J. Summerfield, P. Hadley, E.H. Roberts y S. Rawsthorne. 1981. Carbon and nitrogen nutrition of nodulated roots of grain legumes. *Plant Cell and Environ.* 4: 5-26.
- Neves, M.C.P. y M. Hungria. 1987. The physiology of nitrogen fixation in tropical grain legumes. *Crit. Rev. in Plant Sci.* 3: 267-321.

- Patterson, T.G. y T.A. LaRue. 1983. N₂ fixation (C₂H₂) and ureide content of soybean: Ureides as an index of fixation. *Crop Sci.* 23: 825-831.
- Patterson, T.G., R. Glenister y T.A. LaRue. 1982. Simple estimate of ureide in soybean tissue. *Anal. Biochem.* 119: 90-95.
- Peoples, M. 1993. Techniques for quantifying nitrogen fixation. pp: 164-171. *In*: J.M. Anderson y J.S.I. Ingram. *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. 2nd ed. C.A.B. International. Wallingford, UK.
- SAS Institute. 1988. SAS/STAT user's guide. Release 6.03 ed. SAS Institute. Cary, NC.
- Schubert, K.R. 1986. Products of biological nitrogen fixation in higher plants: Synthesis, transport and metabolism. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 37: 539-574.
- Somasegaran, P. y H.J. Hoben. 1985. *Methods in legume-Rhizobium technology*. Niftal. Hawaii.
- Streeter, J.G. 1979. Allantoin and allantoic acid in tissues and stem from field-grown soybean plants. *Plant Physiol.* 63: 478-488.
- Thomas, R.J., J.R. Mcferson, L.E. Schrader y F.A. Bliss. 1984. Composition of bleeding sap nitrogen from lines of field grown *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Soil* 79: 77-88.
- Westermann, D.T. y J.J. Kolar. 1978. Symbiotic N₂ (C₂H₂) fixation by bean. *Crop Sci.* 18: 986-990.
- Wilson, J.K. 1931. The shedding of nodules by beans. *J. Am. Soc. Agron.* 23: 670-674.
- Winkler, R.G., D.G. Blevins, J.C. Polacco y D.D. Randall. 1988. Ureide catabolism in nitrogen fixing-legumes. *TIBS* 147: 97-100.
- Wolyn, D.J., J. Attewell, P.W. Ludden y F.A. Bliss. 1989. Indirect measures of N₂ fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under field conditions: The role of lateral root nodules. *Plant Soil* 113: 181-187.
- Zapata, F., S.K.A. Danso, G. Hardarson y M. Fried. 1987. Nitrogen fixation and translocation in field-grown fababean. *Agron. J.* 79: 505-509.

ENZIMAS QUE PARTICIPAN EN EL PROCESO DE VERMICOMPOSTAJE

Enzymes Participating in the Vermicomposting Process

Roberto Quintero Lizaola^{1†}, Ronald Ferrera-Cerrato¹, Jorge D. Etchevers Barra¹,
Norma Eugenia García Calderón², Rodrigo Rodríguez Kabana³, Gabriel Alcántar González¹ y
Andrés Aguilar Santelises[†]

RESUMEN

Uno de los problemas que preocupa al hombre actual es el aprovechamiento, manejo y destino de los subproductos de los recursos naturales que emplean en su quehacer diario. Por la naturaleza biológica de la mayoría de ellos, se hace necesario conocer a profundidad los procesos de biotransformación enzimática, lo cual permitiría darle un manejo y destino más apropiados. El presente trabajo reporta los resultados de un estudio de la dinámica enzimática del proceso de compostaje y vermicompostaje (compostaje con incorporación de la lombriz *Eisenia andrei*) de paja de avena, molida y picada. Veintitrés, 46, 69, 92, 115 y 148 días después de adicionadas las lombrices, se tomaron muestras en todos los tratamientos para medir la actividad de las enzimas: proteasa, amidasa, ureasa y nitrogenasa. La actividad de esas enzimas fue mayor en los tratamientos con lombrices que en los que no se aplicó el anélido. La actividad enzimática disminuyó en relación directa con la madurez de la composta. La paja molida aceleró los procesos enzimáticos. El conocimiento adquirido acerca de la dinámica enzimática del proceso de compostaje puede emplearse para manejar de manera más sostenible y aún acelerar el proceso de biotransformación de los residuos de la paja y, quizás, de otros residuos similares, mediante la adición de enzimas en los tiempos apropiados.

Palabras clave: Proteasa, amidasa, ureasa, nitrogenasa, *Eisenia andrei*.

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

[†] quintero@colpos.colpos.mx

² Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

³ Auburn University, Auburn, AL.

⁴ Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.

Recibido: Marzo de 2001. Aceptado: Julio de 2002.
Publicado en Terra 21: 73-80.

SUMMARY

One of the main concerns of today's society is the use, management and final destination of residues from natural resources generated by human activities. Due to the biological nature of most of these residues, it is necessary to understand some basic aspects of the enzymatic biotransformation involved, in order to give them appropriate management and final destination. The present study reports the enzymatic dynamics of composting and "vermicomposting" (composting involving the earthworm *Eisenia andrei*) of ground or minced oat straw. Twenty-three, 46, 69, 92, 115, and 148 days after earthworms addition, protease, amidase, urease and nitrogenase activities were evaluated. The enzymatic activities were higher in the treatments with earthworms than in those without them. The activity of the enzymes decreased with time. The use of ground straw accelerated the enzymatic process. The addition of enzymes at the right time could accelerate the biotransformation processes involved. Vermicomposting made residue transformation a more sustainable process and the knowledge generated can be applied to other types of residues.

Index words: Protease, amidase, urease, nitrogenase, *Eisenia andrei*.

INTRODUCCIÓN

Todas las reacciones químicas de la célula son catalizadas por enzimas. Para que los sistemas químicos de las células funcionen de manera adecuada, deben presentar un equilibrio dinámico o estado estable. Las concentraciones de las sustancias en el estado estable que intervienen en las reacciones son reguladas por las enzimas. Estas enzimas no se destruyen ni se transforman durante las reacciones en las que intervienen, son tan potentes al principio de una reacción como al final, y bastan pequeñas cantidades de ellas para la transformación de cantidades elevadas de producto.

Las enzimas se definen como catalizadores solubles, de naturaleza orgánica y estado coloidal, elaboradas por las células vivas, que actúan independientemente de éstas. Tienen poder catalítico específico y se destruyen por el calor húmedo a 100 °C (Alef y Nannipieri, 1995).

En condiciones químicas, todas las enzimas conocidas son proteínas. Constan de una fracción proteínica y un grupo "prostético" adicional. Algunas veces, se ha conseguido separar reversiblemente el grupo prostético; en estos casos, la proteína recibe el nombre de apoenzima y el grupo prostético se le denomina coenzima. En el componente proteínico se localiza, en primer lugar, la especificidad de acción sobre un determinado sustrato, la cual determina qué sustancias serán transformadas y cuáles no. El grupo prostético también determina el curso de la reacción -especificidad de acción-, es decir, polariza su actividad para realizar una sola reacción entre las varias posibilidades que puede experimentar la molécula en el sustrato (Alef y Nannipieri, 1995).

La Comisión Internacional de Enzimas acordó reglas específicas para clasificar y denominar las enzimas, proponiendo seis clases principales basadas en el tipo de reacción catalizada, con posterior subdivisión según la naturaleza de la reacción catalizada y el tipo de enlace que se transforma o se rompe. Las clases principales de enzimas son: 1) oxidorreductasas, 2) transferasas, 3) hidrolasas, 4) isomerasas, 5) ligasas y 6) liasas (Alef y Nannipieri, 1995).

La eficiencia con la cual una enzima actúa sobre su sustrato es afectada por factores, como: contacto entre la enzima y el sustrato, concentración de la enzima y el sustrato, temperatura, pH, presencia de coenzimas o de activadores e inhibidores. Las enzimas del vermicomposteo y composteo pueden clasificarse en diferentes categorías según su localización en este microambiente. La medición de la actividad de una determinada enzima es, en general, una mezcla de actividades que pertenecen a dos o más categorías. Las enzimas pueden, por supuesto, pertenecer a más de una categoría y cambian de una clase a otra con el tiempo. Dentro de estas categorías se pueden distinguir:

1. Enzimas asociadas con células metabólicamente activadas, principalmente hidrolasas. Si el componente relevante de la población microbiana es identificado, debería haber buena correlación entre la actividad y el número de microorganismos.

2. Enzimas asociadas con células viables pero no proliferantes, como células vegetativas en reposo: endosporas bacterianas, esporas fúngicas, quistes de protozoarios e incluso semillas de plantas.

3. Enzimas asociadas, al menos brevemente, con sustratos en complejos enzima-sustrato.

4. Enzimas unidas a células muertas, a células en reposo o que se han difundido fuera de las células muertas o que se han lisado. Varias de estas enzimas pueden haber tenido una localización funcional original en la célula, sin embargo, pueden estar activas por un corto tiempo cuando son liberadas a la fase acuosa del suelo.

5. Enzimas están en forma temporal inmovilizadas o permanente sobre las superficies reactivas de los coloides húmicos de las vermicompostas y compostas (Burns, 1986).

Se han encontrado de 50 a 60 enzimas en la actividad de los procesos de mineralización de compostas, vermicompostas y el suelo, entre ellas están las oxidorreductasas, transferasas, hidrolasas y liasas. Ciertas investigaciones han demostrado una correlación entre el número microbiano y la actividad enzimática, pero algunas veces la actividad es independiente de la proliferación microbiana (Frankenberger y Dick, 1983; Nannipieri *et al.*, 1990; Serra-Wittling *et al.*, 1995).

Actividad de las Enzimas del Ciclo del Nitrógeno

La descomposición de los residuos vegetales y animales constituye un proceso biológico básico en el cual el carbono es reciclado a la atmósfera como bióxido de carbono; el nitrógeno se libera en forma disponible como amonio y nitrato y otros elementos asociados como fósforo, azufre y varios micronutrientes a igual que otros requeridos por las plantas superiores. La geoquímica del carbono tiene un especial significado, en razón del papel clave en la estructura protoplasmática y de su esencialidad en el metabolismo energético de los heterótrofos. El ciclo conlleva el intercambio del elemento entre las partes vivientes y no vivientes del ecosistema. Dentro de este proceso, parte de los nutrientes es asimilada por los microorganismos e incorporada a la biomasa microbiana de las compostas y vermicompostas.

Proteasa (EC 3.4.23.2.) acetil-L-fenilalanil-L-diiodotirosina. Las proteasas son las moléculas más abundantes en las células y constituyen 50 % o más de

su peso seco (Bremner, 1967; Alexander, 1977; Burns, 1978; Warman e Isnor, 1989). La actividad de la proteasa detectada en microorganismos, plantas y animales, cataliza la hidrólisis de proteínas a polipéptidos y de oligopéptidos a aminoácidos.

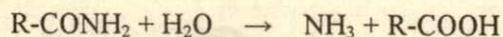
Al ser las proteínas sustancias de alto peso molecular, el primer paso enzimático de la degradación ocurre fuera de la célula microbiana. Así, compuestos con bajo peso molecular como los aminoácidos pueden ser transportados dentro de las células por sistemas específicos de transporte y después deaminados (Lähdesmäki y Püspanen, 1989).

Todos los microorganismos de las compostas y del suelo son capaces de degradar la proteína para ser acoplada a amonio liberado (Alef y Kleiner, 1986; Morra y Freeborn, 1989). En compostas, vermicompostas y suelo, las proteasas están presentes en células vivas y muertas, las enzimas pueden encontrarse en forma libre y adsorbida a partículas orgánicas e inorgánicas y en complejos organominerales (Sarkar *et al.*, 1980, 1989; Loll y Bollag, 1983). La actividad óptima de la proteasa se realiza en un pH y temperatura de 8.0 y 55 °C, respectivamente. A una temperatura de 60 °C, la enzima es desnaturalizada (Mayaudon *et al.*, 1975).

Sin embargo, las correlaciones significativas se encuentran entre la actividad de la proteasa y ciertos parámetros microbianos estimados en condiciones de laboratorio; parecido a la amonificación de la arginina, el sustrato induce la respiración energía suministrada por calentamiento, mineralización de nitrógeno y ATP (Suttner y Alef, 1988).

La proteasa puede obtenerse de extractos crudos para estimar su actividad (Loll y Bollag, 1983). Algunos ensayos difieren en el tipo de sustrato, procedimiento usado, productos y condiciones disponibles de incubación para estimar la actividad de la proteasa en composta, vermicomposta y suelo. La caseína, azocaseína, gelatina, péptidos y albúmina se han utilizado como sustratos entre 2 y 16 h de incubación (Ladd y Butler, 1972).

Amidasa (EC 3.5.1.4) amida amidohidrolasa. La amidasa es la enzima que cataliza la hidrólisis de las amidas y produce amoníaco y el correspondiente ácido carboxílico.



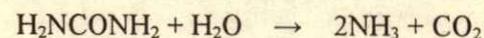
La amidasa actúa sobre los enlaces carbono-nitrógeno que unen los péptidos con las amidas lineales. Esto es específico para amidas alifáticas, en oxilamidinas no

actúa como sustrato (Florkin y Stotz, 1964). Esta enzima está distribuida en la naturaleza, se ha detectado en animales y microorganismos (Clarke, 1970). Está presente en hojas de maíz, sorgo, alfalfa, soya, bacterias, levaduras y hongos (Frankenberger y Tabatabai, 1982, 1985).

Las propiedades cinéticas de la amidasa son importantes en compostas y vermicompostas por el sustrato (amidinas), debido a su potencial como recursos nitrogenados. Los compuestos nitrogenados que pueden utilizarse como sustratos para producir amidas son la oxamida y la formamida soluble, que se han evaluado como fertilizantes nitrogenados (Frankenberger y Tabatabai, 1981a,b).

Análisis estadísticos indicaron que la actividad de esta enzima correlaciona de forma significativa con el nitrógeno total ($r = 0.74^{***}$) y la actividad de la ureasa ($r = 0.73^{***}$). No hay relación significativa entre la amidasa y el pH. La actividad y los conteos microbianos obtenidos con acetamida o propionamida como sustrato, en ausencia de tolueno, indican la producción de esta enzima por los microorganismos (Frankenberger y Tabatabai, 1981b).

Ureasa (EC 3.5.1.5) urea amidohidrolasa. La enzima ureasa cataliza la hidrólisis de la urea formando CO_2 y NH_3 con el mecanismo de reacción basado en la formación de carbonato como intermediario (Tabatabai, 1982).



Esta enzima está ampliamente distribuida y se encuentra en microorganismos, animales y vegetales. Además, cataliza la hidrólisis de la hidroxurea, dihidroxurea y los semicarbazidos. Las ureasas contienen níquel y su peso molecular varía de 151 000 a 480 000 Daltons (Blakeley y Zerner, 1984).

Se ha utilizado una variedad de métodos para evaluar la actividad de la ureasa (McCarty *et al.*, 1989). La mayoría de esos métodos incluye la determinación de amoníaco liberado en la incubación de muestras tratadas con tolueno, en presencia de una solución amortiguadora de urea. Otros métodos estiman la hidrólisis de la urea mediante la determinación residual de urea o con el $^{14}CO_2$ liberado después de la incubación (Mulvaney y Bremner, 1979). Los métodos utilizados no incluyen el uso de amortiguadores para controlar el pH, ni la adición de tolueno para inhibir los microorganismos de las muestras estudiadas (Frankenberger y Johanson, 1986; Kandeler y Gerber, 1988).

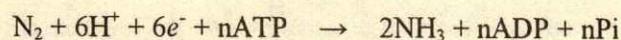
Hoffman y Schmidt (1953) mencionaron que el pH óptimo para la actividad enzimática de la ureasa es entre 6 y 7. Pérez-Mateos y González-Carcedo (1988) y Tabatabai y Bremner (1972) demostraron que el pH óptimo oscila entre 8.8 y 10. Por otro lado, en suelos minerales y orgánicos el intervalo de pH es entre 8.6 y 10.2. Los valores de la constante máxima (k_m) (Michaelles-Menten) presentan un intervalo de 1.3 a 2.03 mM (Lai y Tabatabai, 1992).

Esta enzima presenta actividad a una temperatura de 60 °C y se desnaturaliza a 70 °C. La temperatura de incubación varía entre 15 y 42 °C. La temperatura que se emplea es de 30 °C (Kissel y Cabrera, 1988; Moyo *et al.*, 1989). La temperatura de la ureasa en compostas y suelos es muy estable y es afectada por el secado de las muestras al ambiente o por el almacenamiento a temperaturas entre -60 y 22 °C (Fenn *et al.*, 1992).

La actividad de la ureasa no correlaciona de manera significativa con la biomasa microbiana y es afectada en forma diferente por las concentraciones variables de metales pesados, concentración de oxígeno y disponibilidad de nitrógeno en suelo (McCarty y Bremner, 1991; McCarty *et al.*, 1992).

Los inhibidores de la ureasa se han utilizado con frecuencia en suelos agrícolas para prevenir la hidrólisis rápida de la urea (Xiaoyan *et al.*, 1992).

Nitrogenasa (EC 1.7.99.2) La nitrogenasa es la enzima responsable del proceso de fijación de nitrógeno atmosférico (Quintero, 1998).



Es muy sensible al oxígeno, causándole una rápida inactivación. Se ha protegido al sistema multienzimático nitrogenasa del oxígeno con células que contienen una pared compleja que priva al fotosistema productor de oxígeno. Una de las técnicas más utilizadas que sirven como indicador de la actividad de la nitrogenasa es la reducción de acetileno, se cuantifica por cromatografía de gases, el que asume una relación de electrones de 4:1 (acetileno:nitrógeno fijado) (Quintero, 1998).

El presente trabajo se efectuó para evaluar las cinéticas de las enzimas hidrolasas involucradas en los procesos de mineralización dentro del ciclo del nitrógeno (proteasa, amidasa, ureasa y nitrogenasa) en paja picada y molida, subproducto del cultivo de *Pleurotus ostreatus* con o sin lombriz *Eisenia andrei*.

MATERIALES Y MÉTODOS

En cajas de plástico de 20 x 31 x 13 cm, se colocó paja de avena en la que se había cultivado *Pleurotus ostreatus*, picada a un tamaño de 2 a 3 cm de longitud vs molida, y se humedeció hasta 80% (peso/volumen). Al día siguiente se colocaron 200 lombrices (*Eisenia andrei* Bouché) cliteladas por caja (vermicomposta). Posterior, se tomaron muestras a 23, 46, 69, 92, 115 y 148 días después de la incubación de las lombrices para realizar las actividades enzimáticas de proteasa, amidasa, ureasa y nitrogenasa. A la par, se colocaron tratamientos en los que no se agregó lombriz (composta).

En los períodos de muestreo, la humedad de la caja se mantuvo entre 75 y 85%, controlada en forma gravimétrica con temperatura entre 25 y 30 °C. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones y su análisis estadístico de varianza correspondiente.

Se evaluó la actividad enzimática de proteasa, amidasa, ureasa y nitrogenasa.

Las metodologías para la determinación de la actividad de las enzimas evaluadas se presentan en el Cuadro 1. Los detalles de cada procedimiento se encuentran en Quintero *et al.* (2002).

Proteasa

El método consiste en la determinación de los aminoácidos resultantes después de la incubación de las compostas y vermicompostas con el caseinato de sodio por 2 h a 50 °C utilizando el reactivo de Ciocalteu (Ladd y Butler, 1972).

Amidasa

Esta metodología incluye la determinación del N-NH₄ resultante de la actividad de la amidasa cuando las muestras se incuban con la solución de formamida y el amortiguador [0.1 M Tris (hidroxido-metil) amonio metano (THAM); pH 8.5 y tolueno a 37 °C (Frankenberger y Tabatabai, 1980).

Ureasa

El método se basa en la determinación del amonio resultante de la incubación de las muestras de

Cuadro 1. Metodologías empleadas para determinar la actividad de las enzimas, medidas a 23, 46, 69, 92, 115 y 148 días de la incorporación de lombrices para vermicompostas preparadas con paja de avena.

Enzima	Condiciones de incubación				Producto	Referencia
	Sustrato	Amortiguador	Temperatura	Tiempo		
			°C	h		
Proteasa	Caseinato de sodio	Tris 50 mM, pH 8.1	50	2	Tirosina	Ladd y Butler (1972)
Amidasa	Formamida	Tris H ₂ SO ₄ 0.1M, pH 8.5	37	2	N-NH ₄	Frankenberger y Tabatabai (1980)
Ureasa	Solución de urea 200 mM	Tris hidroximetil Amino, metano 50 mM pH 9.0	37	2	N-NH ₄	Tabatabai (1994)
Nitrogenasa	Acetileno		25 a 30	24	Etileno	Quintero (1998)

composta o vermicomposta con una solución de urea durante 2 h a 37 °C. (Tabatabai, 1994).

Nitrogenasa

Se midió la actividad de esta enzima por el método de la reducción de acetileno (C₂H₂) a etileno (C₂H₄) y se cuantificó esta reducción con un cromatógrafo de gases (Quintero, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2, se presenta la actividad de las enzimas: proteasa, amidasa, ureasa y nitrogenasa. Es evidente la diferencia entre las distintas enzimas evaluadas debido a la interacción de los tres factores (presencia y ausencia de lombrices, tamaño de sustrato y fecha de muestreo), lo que indicó que la

dinámica enzimática es una función del efecto combinado de estos factores.

La actividad de las enzimas proteasa, amidasa, ureasa y nitrogenasa presentó una caída conforme aumentó el tiempo de muestreo. La proteasa presentó una actividad máxima a 23 días. También se observó que los tratamientos con mayor actividad de proteasa fueron los que tenían lombriz. El valor medio de la paja molida (PM) fue de 126.17 µg eq. Tirosina g⁻¹ MS 2 h⁻¹ y de la paja picada (PP) de 102.5 µg eq. Tirosina g⁻¹ MS 2 h⁻¹, en comparación con las mismas formas y tamaños de la paja sin lombriz de 87.17 µg eq. Tirosina g⁻¹ MS 2 h⁻¹ y 79.17 µg eq. Tirosina g⁻¹ MS 2 h⁻¹. Este corresponde a 31 y 23% menos, respectivamente, y la media general de los tratamientos con lombriz. Esta actividad enzimática por las condiciones que se mantuvieron en el transcurso del experimento, entre 25 y 30 °C y

Cuadro 2. Actividad de proteasa, amidasa, ureasa y nitrogenasa a 23, 46, 69, 92, 115 y 148 días de la incorporación de lombrices en vermicompostas de avena, subproducto de la producción comercial del hongo *Pleurotus ostreatus*, comparadas con sus compostas correspondientes sin lombrices.

Paja	Con lombrices						Sin lombrices					
	Días de muestreo (ddi)						Días de muestreo (ddi)					
	23	46	69	92	115	148	23	46	69	92	115	148
Proteasa [µg equivalente de tirosina g ⁻¹ materia seca (MS) 2 h ⁻¹]												
Molida (PM)	373	165	80	55	43	41	214	124	60	53	41	31
Picada (PP)	265	154	70	51	39	36	204	112	54	44	32	29
Amidasa [mg N-NH ₄ g ⁻¹ materia seca (MS) 2 h ⁻¹]												
Molida	2.06	2.01	1.98	1.77	1.65	1.56	1.64	1.62	1.58	1.53	1.40	1.20
Picada	1.96	1.84	1.82	1.60	1.54	1.48	1.34	1.28	1.17	1.10	1.08	1.02
Ureasa [mg N-NH ₄ g ⁻¹ materia seca (MS) 2 h ⁻¹]												
Molida	0.52	0.50	0.49	0.44	0.41	0.39	0.41	0.40	0.39	0.38	0.35	0.30
Picada	0.49	0.46	0.45	0.40	0.38	0.37	0.33	0.32	0.29	0.27	0.27	0.25
Nitrogenasa [pMol C ₂ H ₄ g ⁻¹ materia seca (MS) 24 h ⁻¹]												
Molida	107.23	263.45	176.79	17.28	10.53	6.85	84.19	143.12	197.73	8.40	21.80	13.36
Picada	36.78	106.94	239.35	9.59	34.96	14.21	24.25	114.54	100.51	63.20	53.07	1.32

pH de 8.4, parecidos a los óptimos (Mayaudon *et al.*, 1975). Se observó que conforme aumentó el periodo de muestreo en las compostas y vermicompostas, disminuyó la proteasa, lo cual está de acuerdo con los resultados obtenidos por Perucci (1990, 1992) y Nannipieri *et al.* (1990).

La amidasa presentó una disminución de actividad menos drástica, fue más alta en los tratamientos con lombrices *versus* sin lombrices, con una actividad media en los primeros tratamientos para PM de 1.84 y PP de 1.71 mg de N-NH₄ g⁻¹ MS 2 h⁻¹. De acuerdo con el tamaño de la paja empleada de 1.50 y 1.17 mg de N-NH₄ g⁻¹ MS 2 h⁻¹ difieren en 18 y 32% menos, respectivamente, en comparación con los resultados de Frankenberger y Tabatabai (1981a, b) en cuanto a comportamiento de actividad enzimática.

La ureasa también presentó una disminución pequeña de acuerdo con los tiempos de muestreo, obteniéndose el valor menor que 148 días en los tratamientos con lombriz, comparados con aquéllos sin lombriz.

La actividad enzimática de la ureasa en los tratamientos con lombriz fue para PM de 0.46 y para PP de 0.43 en los tratamientos sin lombriz, mientras que con el mismo tamaño de paja fue de 0.37 y 0.29 mg de N-NH₄ g⁻¹ MS 2 h⁻¹, respectivamente, equivalente a 19 y 32% menor de actividad enzimática. Es importante señalar que la ureasa fue muy estable en este tipo de sustrato (Fenn *et al.*, 1992), de ahí el comportamiento que tuvo en relación con aquéllos en que se agregó lombriz. Asimismo, la asociación entre lombrices y microorganismos favorecen la descomposición de la materia orgánica sobre la mineralización de ésta. En los procesos anteriores están involucradas enzimas como las amilasas, proteasas, quitinasas, celulasas, amidasas y ureasas (Edwards y Fletcher, 1988).

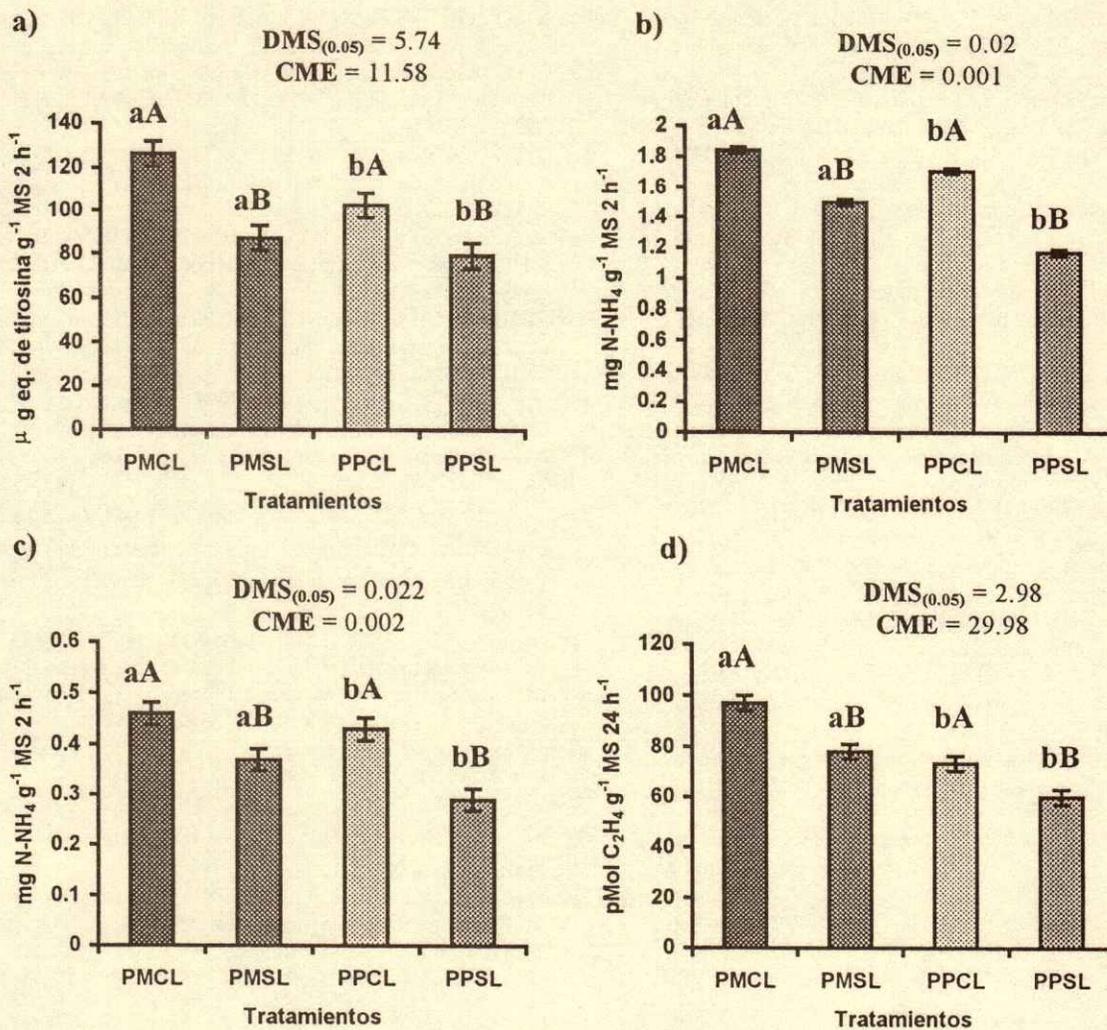
La actividad de la proteasa disminuyó fuertemente conforme las compostas y vermicompostas tuvieron mayor tiempo de incubación, mientras que la amidasa y la ureasa están incluidas en el último estado de la degradación de los compuestos nitrogenados en el rompimiento de los enlaces C-N, más que los enlaces peptídicos. Una gran proporción de este tipo de enzimas es de origen microbiano y del tracto digestivo de la lombriz (Frankenberger y Tabatabai, 1981a, b; Serra-Wittling *et al.*, 1995). Los resultados evaluados estadísticamente son diferentes ($\alpha = 0.05$) en los tratamientos con lombriz y tamaño de paja (Figura 1).

CONCLUSIONES

- La presencia de la lombriz *Eisenia andrei* en la paja de avena molida o picada estimuló la actividad enzimática de las enzimas: proteasa, amidasa, ureasa y nitrogenasa, evaluadas a 23, 46, 69, 92, 115 y 148 días después de inoculada la lombriz.
- La paja molida influyó en acelerar los procesos enzimáticos y, por consiguiente, contribuyó en la biotecnología de transformación de desechos orgánicos que se acumulan sin ningún valor agregado, obteniéndose biofertilizantes en menor tiempo, útiles en la agricultura sostenible.

LITERATURA CITADA

- Alef, K. y P. Nannipieri. 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press. London, UK.
- Alef, K. y D. Kleiner. 1986. Arginine ammonification in soil samples. Veröff. Landwirtsch-Chem. Bundesanstalt Linz/Donau 18: 163-168.
- Alexander, M. 1977. Soil microbiology. Wiley. New York.
- Blakeley, R.L. y B. Zerner. 1984. Jack bean urease: The first nickel enzyme. J. Mol. Catal. 23: 263-292.
- Bremner, J.M. 1967. Nitrogenous compounds. pp. 19-66. In: A.D. McLaren y G.H. Peterson (eds.). Soil biochemistry. Dekker. New York.
- Burns, R.G. 1978. Enzyme activity in soil, some theoretical and practical considerations. pp. 73-75, 295-326. In: R.G. Burns (ed.). Soil enzymes. Academic Press. New York.
- Burns, R.G. 1986. Interaction of enzymes with soil mineral and organic colloids. pp. 429-445. In: P.M. Huang y M. Schnitzer (eds.). Interactions of soil minerals with natural, organics and microbes. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Clarke, P.H. 1970. The aliphatic amidases of *Pseudomonas aeruginosa*. Adv. Microb. Physiol. 4: 179-222.
- Edwards, C.A. y K.E. Fletcher. 1988. Interactions between earthworms and microorganisms in organic-matter-breakdown. Agric. Ecosyst. Environ. 24: 235-247.
- Fenn, L.B., J.L. Tipton y G. Tatum. 1992. Urease activity in two cultivated and non-cultivated arid soils. Biol. Fertil. Soils 13: 152-154.
- Florkin, M. y E.H. Stotz. 1964. Comprehensive biochemistry 13. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Frankenberger, W.T. Jr. y W. Dick. 1983. Relationships between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 945-951.
- Frankenberger, W.T. Jr. y J.B. Johanson. 1986. Use of plasmolytic agents and antiseptics in soil enzyme assay. Soil Biol. Biochem. 18: 209-213.
- Frankenberger, W.T. Jr. y M.A. Tabatabai. 1980. Amidase activity in soil: I. Method of assay. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 282-287.
- Frankenberger, W.T. Jr. y M.A. Tabatabai. 1981a. Fate of amide nitrogen added to soils. Agric. Food Chem. 29: 152-155.



Las letras minúsculas iguales en las diferentes columnas no son significativamente diferentes entre sí ($\alpha = 0.05$), en el tamaño de paja utilizada. Las letras mayúsculas iguales en las diferentes columnas no son significativamente diferentes entre sí ($\alpha = 0.05$), en los tratamientos con o sin lombriz. PMCL = paja molida con lombriz; PMSL = paja molida sin lombriz; PPCL = paja picada con lombriz; PPSL = paja picada sin lombriz.

Figura 1. Actividad de las enzimas: a) proteasa, b) amidasa, c) ureasa y d) nitrogenasa y su análisis estadístico.

Frankenberger, W.T. Jr. y M.A. Tabatabai. 1981b. Amidase activity in soils: III. Stability and distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 333-338.

Frankenberger, W.T. Jr. y M.A. Tabatabai. 1982. Amidase and urease activity in plants. *Plant Soil* 64: 153-166.

Frankenberger, W.T. Jr. y M.A. Tabatabai. 1985. Characteristics of an amidase isolated from a soil bacteria. *Soil Biol. Biochem.* 17: 303-308.

Hoffman, E. y W. Schmidt. 1953. Über das Enzym-system unserer Kulturböden. II. Urease. *Biochem Z.* 323: 125-127.

Kandeler, E. y H. Gerber. 1988. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Biol. Fertil. Soils* 6: 68-72.

Kissel, D.E. y M.L. Cabrera. 1988. Factors affecting urease activity. pp. 53-66. *In*: B.R. Bock y D.E. Kissel (eds.). Ammonia volatilization from urea fertilizer. TVA National Fertilizer Development Center. Muscle Shoals, AL.

Ladd, J.N. y J.H.A. Butler. 1972. Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates. *Soil Biol. Biochem.* 4: 19-30.

Lähdesmäki, P. y R. Püspanen. 1989. Changes in concentrations of free amino acids during humification of spruce and aspen leaf litter. *Soil Biol. Biochem.* 21: 975-978.

Lai, C.M. y M.A. Tabatabai. 1992. Kinetic parameters of immobilized urease. *Soil Biol. Biochem.* 24: 225-228.

Loll, M.J. y J.M. Bollag. 1983. Protein transformation in soil. *Adv. Agron.* 36: 351-382.

Mayaudon, J., L. Batistic y J.M. Sarkar. 1975. Properties of proteolytically active extracts from fresh soils. *Soil Biol. Biochem.* 7: 281-286.

- McCarty, G.W. y J.M. Bremner. 1991. Production of urease by microbial activity in soils under aerobic and anaerobic conditions. *Biol. Fertil. Soils* 11: 228-230.
- McCarty, G.W., D.R. Shogern y J.M. Bremner. 1992. Regulation of urease production in soil by microbial assimilation of nitrogen. *Biol. Fertil. Soils* 12: 261-264.
- McCarty, G.W., J.M. Bremner y H.S. Chac. 1989. Effects of *N*-(*n*-butyl) thiophosphorictriamide on hydrolysis of urea by plant, microbial, and soil urease. *Biol. Fertil. Soils* 8: 123-127.
- Morra, M.J. y L.L. Freeborn. 1989. Catalysis of amino acid deamination in soils by pyridoxal-5-phosphate. *Soil Biol. Biochem.* 21: 645-650.
- Moyo, C.C., D.E. Kissel y M.L. Cabrera. 1989. Temperature effects on soil urease activity. *Soil Biol. Biochem.* 21: 935-938.
- Mulvaney, R.L. y J.M. Bremner. 1979. A modified diacetyl monoxime method for colorimetric determination of urea in soil extracts. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 10: 1163-1170.
- Nannipieri, P., S. Grego y B. Ceccanti. 1990. Ecological significance of the biological activity in soil. *Soil Biochem.* 6: 293-355.
- Pérez-Mateos, M. y S. González-Carcedo. 1988. Assay of urease activity in soil columns. *Soil Biol. Biochem.* 20: 567-572.
- Perucci, P. 1990. Effect of the addition of municipal solid-waste compost on microbial biomass and enzyme activities in soil. *Biol. Fertil. Soils* 10: 221-226.
- Perucci, P. 1992. Enzyme activity and microbial biomass in a field soil amended with municipal refuse. *Biol. Fertil. Soils* 14: 54-60.
- Quintero L., R. 1998. Potencial agropecuario de Azolla en los trópicos. pp. 71-91. *In*: R. Ferrera-Cerrato y J. Pérez-Moreno (eds.). Manejo de agroecosistemas sostenibles. Textos universitarios. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México.
- Quintero L., R., R. Ferrera-Cerrato y J.D. Etchevers B. 2002. Manual para la medición de actividades enzimáticas en vermicompostas y compuestos afines. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México. México.
- Sarkar, J.M., A. Leonowicz y J.M. Bollag. 1989. Immobilization of enzymes on clays and soils. *Soil Biol. Biochem.* 21: 223-230.
- Sarkar, J.M., L. Batistic y J. Mayaudon. 1980. Les hydrolases du sol et leur association avec les hydrates de carbone. *Soil Biol. Biochem.* 12: 325-328.
- Serra-Wittling, C., S. Houot y E. Barriuso. 1995. Soil enzymatic response to addition of municipal solid-waste compost. *Biol. Fertil. Soils* 20: 226-236.
- Suttner, T. y K. Alef. 1988. Correlation between arginine amination, enzyme activities, microbial biomass, physical and chemical properties of different soils. *Zentralbl. Mikrobiol.* 143: 569-573.
- Tabatabai, M.A. 1982. Soil enzymes. pp. 903-947. *In*: A.L. Page, E.M. Miller y D.R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Tabatabai, M.A. 1994. Soil enzymes. pp. 775-833. *In*: R.W. Weaver *et al.* (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties.* Book Ser. 5. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Tabatabai, M.A. y J.M. Bremner. 1972. Assay of urease activity in soil. *Soil Biol. Biochem.* 4: 479-487.
- Warman, P.R. y R.A. Isnor. 1989. Evidence of peptides in low-molecular-weight fractions of soil organic matter. *Biol. Fertil. Soils* 8: 25-28.
- Xiaoyan, Z., Z. Likai y Wu Guanyun. 1992. Urea hydrolysis in a brown soil: Effect of hydroquinone. *Soil Biol. Biochem.* 24: 165-170.

BACTERIAS DE VIDA LIBRE FIJADORAS DE NITRÓGENO ATMOSFÉRICO EN RIZOSFERA DE FRIJOL CONTAMINADA CON QUEROSENO

Nitrogen-Fixing Free-Living Bacteria in Bean Rhizosphere Polluted with Kerosene

E. Hernández A.^{1†}, R. Ferrera-Cerrato¹ y R. Rodríguez V.²

RESUMEN

Pocos informes muestran el comportamiento de poblaciones de bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico de vida libre (BFNA) en suelos contaminados por combustibles como el queroseno. Se desconoce si el hidrocarburo afecta la actividad de este grupo bacteriano y, por lo tanto, la incorporación de N atmosférico. En esta investigación, se evaluó la influencia del queroseno sobre la capacidad de fijar N atmosférico por BFNA y BFNA hidrocbonoclastas (HC's) establecidas en *Phaseolus vulgaris* L. Se consideraron dos factores: presencia de planta (con y sin planta) y cuatro concentraciones de queroseno (0, 500, 2500 y 5000 mg kg⁻¹). En invernadero, se estableció un diseño experimental completamente al azar que consistió de ocho tratamientos con seis repeticiones. Se analizaron muestras de raíz (para evaluar poblaciones del rizoplane) y muestras de suelo (para evaluar poblaciones de rizósfera y suelo sin planta) 19, 47 y 83 días después del trasplante. Se estimó la actividad de reducción de acetileno en BFNA-HC's para conocer su potencial en la fijación de N atmosférico. La presencia del queroseno no afectó drásticamente las poblaciones de BFNA y BFNA-HC's; al evaluar la fijación de N atmosférico, se encontró que las bacterias podían llevar a cabo esta función. Las mayores poblaciones fueron: para BFNA (410 x 10⁴ UFC g⁻¹ raíz) en el rizoplane en la concentración 2500 mg kg⁻¹ de queroseno y para BFNA-HC's (299 x 10⁴ UFC g⁻¹ suelo) en la rizósfera, en la concentración 500 mg kg⁻¹ de queroseno. Se aislaron 21 cepas de BFNA-HC's de las cuales

29% mostró actividad de la enzima nitrogenasa. Estos resultados muestran que las BFNA-HC's pueden ser una opción para biorremediar suelos contaminados por queroseno y que su aplicación inducirá la incorporación de N en los suelos afectados.

Palabras clave: Suelos contaminados, hidrocbonoclastas, *Phaseolus vulgaris* L., biorremediación.

SUMMARY

There are only few reports on free-living bacteria population in soils polluted by fuels like kerosene. At present, it is unknown whether the presence of hydrocarbon affects the activity of this group of soil microorganisms, and consequently, the incorporation of atmospheric nitrogen to the soil. In the present research, the effect of kerosene on the N fixing ability by this bacterial group, including free-living (FLB) and free-living hydrocarbonoclast bacteria (FLHB) in *Phaseolus vulgaris* L. was evaluated. Two factors were considered: presence of plant (with and without plant) and four concentrations of kerosene (0, 500, 2500, and 5000 mg kg⁻¹). In greenhouse, the experiment involved eight treatments completely randomized with six replications. Roots and soils were sampled 19, 47, and 83 days after transplanting to evaluate the populations in the rhizoplane, rhizosphere and soil without plant. The acetylene reduction of FLHB was also evaluated in order to have an estimation of the possible atmospheric N fixation. The presence of kerosene did not dramatically affect either the growth of FLB and FLHB or the atmospheric nitrogen fixation. The highest population of FLB, 410 x 10⁴ CFU g⁻¹ root, was present in the rhizoplane with 2500 mg kg⁻¹ of kerosene, while the highest population of FLHB, 299 x 10⁴ CFU g⁻¹ soil, was recorded in the rhizosphere, with 500 mg kg⁻¹ kerosene. Twenty-one FLHB strains were isolated and 29% of the isolates showed nitrogenase enzyme activity. These

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, km 36.5. 56230 Montecillo, estado de México.

[†] (elizahac@yahoo.com.mx); (ronaldfc@colpos.colpos.mx)

² Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. (rrodrig@mail.cinvestav.mx)

results show that FLHB could be an option for the bioremediation of polluted soils by kerosene and induce the incorporation of N in the soil.

Index words: *Polluted soils, hydrocarbonoclast, Phaseolus vulgaris L., bioremediation.*

INTRODUCCIÓN

En México, la contaminación del suelo por compuestos derivados del petróleo como el queroseno, ocurre durante su transporte y por rupturas de los ductos; los derrames de estos combustibles ocasionan graves problemas sobre todo si el suelo es permeable porque la contaminación puede extenderse rápidamente (Saval, 1997, 1998). Como alternativa de limpieza de los suelos contaminados, la fitorremediación utiliza microorganismos y plantas eficientes en la degradación de compuestos orgánicos. Se ha señalado (Fletcher, 1994) que las bacterias fijadoras de N atmosférico de vida libre pueden utilizarse para este fin; en cuanto a las plantas, algunos autores utilizan al frijol (Anderson *et al.*, 1993).

Se conoce que la degradación de materiales orgánicos en ambientes naturales es mediada, principalmente, por dos grupos de microorganismos: bacterias y hongos. Las bacterias representan el grupo de microorganismos con mayor diversidad y se encuentran en todos los ambientes vivos (Walton *et al.*, 1994). Además, tienen un crecimiento y metabolismo rápido, plasticidad genética y se ajustan rápidamente a una gran variedad de ambientes, características que hacen que sea éste el grupo microbiano más utilizado en los procesos de biorremediación (Baker y Herson, 1994).

Entre los géneros bacterianos más conocidos en cuanto a su eficiencia en la degradación de combustibles derivados del petróleo se encuentran *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Agrobacterium*, *Flavobacterium*, *Arthrobacter* (Riser-Roberts, 1998), *Aeromonas*, *Corynebacterium* y *Bacillus* (Atlas, 1984). De éstos, *Pseudomonas*, *Agrobacterium* y *Bacillus* se caracterizan, además, por tener la capacidad de fijar N atmosférico (Rodríguez, 1995). Estos géneros se estudian como microorganismos biodegradadores de petróleo o sus derivados, o como bacterias fijadoras de N atmosférico (BFNA), pero son pocos los informes que los refieren como microorganismos que realizan ambas funciones al

mismo tiempo. Es importante conocer si este grupo de bacterias puede fijar N atmosférico en suelos contaminados por productos derivados de petróleo, ya que la incorporación de este elemento al suelo serviría como nutrimento para otros microorganismos degradadores y, en el caso de presencia de plantas, también les sería útil (Frick *et al.*, 1999).

En relación con lo anterior, Perez-Vargas *et al.* (2000) estudiaron la capacidad de las BFNA en la utilización de queroseno como única fuente de carbono y encontraron que éstas lograban reducir hasta en 75% el total de los hidrocarburos del queroseno. Supieron que este grupo de bacterias fijaba de 4 a 183 nmol N₂ 3E09⁻¹ bacteria⁻¹ d⁻¹ (nanomoles de N atmosférico fijado por un exponencial de bacterias 1 x 10⁹ por día). Algunos reportes indican que las BFNA de vida libre se encuentran ampliamente distribuidas en muchos ecosistemas de suelo (Knowles y Barriquio, 1999). Años atrás, Bossert y Bartha (1984) reportaron que los suelos crónicamente contaminados con petróleo crudo son capaces de sostener abundantes poblaciones de bacterias fijadoras de N atmosférico de vida libre.

Para obtener más datos sobre el comportamiento de las BFNA de vida libre en un suelo contaminado y conocer si su facultad de fijar N atmosférico no es impedida, el presente trabajo estudió el efecto que el queroseno (un complejo de hidrocarburo derivado del petróleo) tiene sobre la actividad de las poblaciones de BFNA de vida libre en la rizósfera de frijol.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sustrato y Macetas Utilizadas e Incorporación del Queroseno al Suelo

El suelo utilizado presentó las siguientes características físicas y químicas: pH, 8.3; conductividad eléctrica, 0.18 dS m⁻¹; materia orgánica, 0.41%; N total, 0.04%; P Olsen, 16 mg kg⁻¹; K intercambiable, 0.55 meq/100 g suelo; y textura franco-arcilloso-arenosa. Se utilizaron macetas de plástico con capacidad de 4 kg de suelo, las cuales no se perforaron para evitar la pérdida del queroseno en el momento del riego. El suelo no se esterilizó para asegurar la presencia de los microorganismos que se encuentran de manera natural. Al mismo, se le aplicó un complejo de hidrocarburos (queroseno) en concentraciones de 0, 500, 2500 y 5000 mg kg⁻¹ de suelo, el cual se mezcló con agua (el queroseno y el

agua se sometieron a agitación rápida para lograr una mezcla homogénea y formar una emulsión). Las diferentes concentraciones de queroseno se aplicaron con la finalidad de observar si éste afectaba en número a las poblaciones de las bacterias en estudio, así como la cantidad del mismo.

Trasplante y Riego

Se utilizó la variedad de frijol Michoacán 12-A3, caracterizada por su resistencia a la sequía y por ser una variedad rendidora (Benitez y Ferrera-Cerrato, 1990). Las plántulas de frijol se trasplantaron a ocho días de edad, al centro de la maceta. El riego se aplicó cada tercer día, durante 83 días que permanecieron las plantas en invernadero.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

El experimento consistió de ocho tratamientos. En los primeros cuatro, se evaluaron poblaciones de BFNA y BFNA-HC's en la zona del rizoplano y la rizósfera; en los cuatro restantes, se evaluaron poblaciones de BFNA y BFNA-HC's en suelo sin planta (Cuadro 1). Para cuantificar los microorganismos del rizoplano, se tomaron muestras de las raíces de las plantas junto con el suelo fuertemente adherido a ella; en tanto que para la cuantificación de microorganismos de la rizósfera se tomó una muestra del suelo cercano a la raíz de la planta de frijol. Cada tratamiento tuvo seis repeticiones.

El diseño experimental fue completamente al azar. Durante el experimento se realizaron tres muestreos: para evaluar BFNA de vida libre a 19, 47 y 83 días después del trasplante (ddt), y para evaluar BFNA-HC's a 47 y 83 ddt. Los muestreos se realizaron de la siguiente manera: en las macetas que presentaron planta, primero se tomó suelo circundante a la raíz para determinar en éste las poblaciones de bacterias de la rizósfera. Posteriormente, se cosecharon las plantas de frijol y después se separó la raíz del tallo, evitando la pérdida del suelo fuertemente adherido a la misma (en esta raíz se determinaron las poblaciones del rizoplano). Por último, en las macetas sin planta, se tomó suelo para determinar poblaciones de bacterias no rizosféricas. Para la realización del análisis estadístico y la comparación de medias, se

Cuadro 1. Tratamientos y repeticiones establecidos para el experimento.

Descripción del tratamiento	Repeticiones
1. Sin queroseno con planta	6
2. 500 mg kg ⁻¹ de queroseno con planta	6
3. 2500 mg kg ⁻¹ de queroseno con planta	6
4. 5000 mg kg ⁻¹ de queroseno con planta	6
5. Sin queroseno sin planta	6
6. 500 mg kg ⁻¹ de queroseno sin planta	6
7. 2500 mg kg ⁻¹ de queroseno sin planta	6
8. 5000 mg kg ⁻¹ de queroseno sin planta	6

utilizó el programa Statistical Analysis System (SAS Institute, 1989).

Determinación de Poblaciones de BFNA y BFNA-HC's.

Las evaluaciones se realizaron cuantificando el número de unidades formadoras de colonias por gramo de raíz (UFC g⁻¹ raíz) para el caso de poblaciones de bacterias del rizoplano, y por gramo de suelo (UFC g⁻¹ suelo) para el caso de poblaciones de bacterias de la rizósfera y suelo sin planta, de acuerdo con la técnica de dilución y conteo en placa, propuesta por Clark (1965) y Parkinson (1982). Para el crecimiento de BFNA, se utilizó el medio de cultivo Rennie (1981) y para el crecimiento de BFNA-HC's, el medio de cultivo modificado Rennie (1981), cuya fuente de carbono se sustituyó por queroseno (Cuadro 2).

La incorporación del queroseno (como fuente de carbono) a la caja de Petri que ya contenía medio de cultivo Rennie modificado, se realizó impregnando un disco de papel filtro con 2.5 mL de queroseno, después se colocó en la tapa de la caja de Petri y se procedió a colocar la tapa de la caja de Petri sobre la contratapa (Figura 1). La siembra se realizó por triplicado; al centro de cada una de las cajas de Petri se agregó 0.1 mL de las diluciones 10⁻⁴, 10⁻⁵ y 10⁻⁶ y se dispersó con un triángulo de vidrio estéril. El conteo de poblaciones de BFNA se hizo a cuatro días y el de BFNA-HC's a ocho días de incubación de las cajas Petri a 28 °C. Posteriormente, las colonias de bacterias que presentaron mejor crecimiento se aislaron y purificaron hasta obtener la presencia de colonias multiplicadas procedentes de una sola célula (Granados y Villaverde, 1997; Velázquez, 1998).

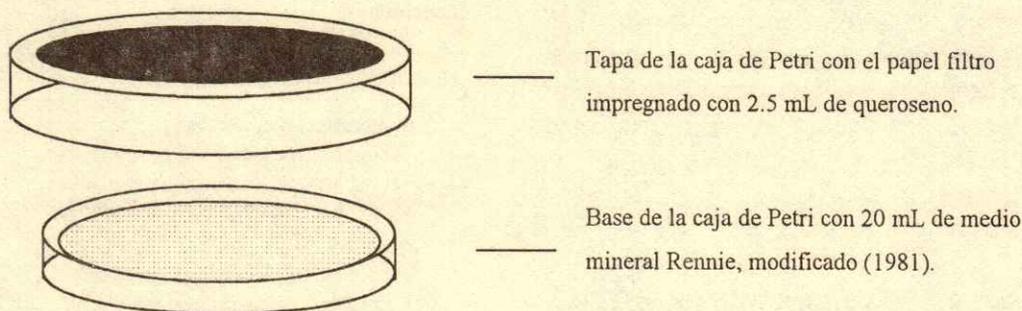


Figura 1. Incorporación del queroseno a la caja de Petri que contenía el medio de Rennie modificado (1981).

Cuadro 2. Medios de cultivo utilizados para evaluar poblaciones de BFNA y BFNA-HC's.

Medio de cultivo Rennie (1981) BFNA		Medio de cultivo Rennie modificado (1981) BFNA-HC's	
Solución A		Solución A	
K ₂ HPO ₄	0.8 g	K ₂ HPO ₄	0.8 g
KH ₂ PO ₄	0.2 g	KH ₂ PO ₄	0.2 g
NaCl ₂	0.1 g	NaCl ₂	0.1 g
NaFeEDTA	0.028 g	NaFeEDTA	0.028 g
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.025 g	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.025 g
Extracto de levadura [†]	0.025 g	Agua destilada	900 mL
Manitol [†]	5.0 g	Agar	15 g
Sacarosa [†]	5.0 g		
Lactato de sodio (60% v/v) [†]	0.5 mL		
Agua destilada	900 mL		
Agar	15 g		
Solución B		Solución B	
MgSO ₄ H ₂ O	0.2 g	MgSO ₄ H ₂ O	0.2 g
CaCl ₂	0.06 g	CaCl ₂	0.06 g
Agua destilada	100 mL	Agua destilada	100 mL
pH del medio de cultivo	7.0	pH del medio de cultivo	7.0

[†] Fuente de carbono en el medio de cultivo.

Incorporar como fuente de carbono 2.5 mL de queroseno impregnado en papel filtro (Ver Figura 1).

Estimación de la Actividad Nitrogenasa por el Método de Reducción de Acetileno *in vitro* en los Aislamientos de Bacterias

La estimación de la actividad de la enzima nitrogenasa por el método de reducción de acetileno se realizó de la siguiente manera: en tubos que contenían 2 mL de medio líquido de carbón combinado, se introdujo una asada de las cepas aisladas y purificadas, luego, los tubos se incubaron a 28 °C durante 24 a 48 h en agitación constante a 240 rpm. A continuación, se ajustó el número de bacterias a una concentración de 1.2×10^9 bacterias mL⁻¹ de acuerdo con la escala de McFarland (Campbell *et al.*, 1970).

Después, se prepararon viales de 30 mL de capacidad con 5 mL de medio de cultivo semisólido de carbón combinado. Se inocularon tres viales por cepa (representando tres repeticiones) que se taparon con tapones de algodón e hilaza, cada uno con 0.2 mL de la suspensión bacteriana obtenida en el cultivo anterior; después, se incubaron a 28 °C por 48 h. A continuación, se cambió el tapón de algodón por uno de hule, sellado a presión con un anillo de aluminio, y con una jeringa se extrajo 10% del volumen de aire interno, el cual se reemplazó con acetileno.

Los viales se incubaron a la misma temperatura por 24 h y, finalmente, se extrajo de cada vial una muestra de 5 cm³ del gas, el cual se depositó en tubos

al vacío (vacutainer) (Hardy *et al.*, 1973). Las muestras obtenidas (por cada cepa tres repeticiones) se analizaron inyectando 0.5 mL de éstas a un cromatógrafo de gases "Varian" modelo 1440, con detector de ionización de flama de hidrógeno y columna de acero inoxidable de 2 m de largo y 1/8 pulgadas de diámetro, empacada con Porapak N, para medir la cantidad de acetileno reducido y, de esta forma, estimar la actividad y presencia de la enzima nitrogenasa. Para conocer cuál aislamiento presentó mayor actividad y presencia de la enzima, se analizaron estadísticamente los resultados obtenidos de cada cepa mediante una comparación de medias, utilizando el programa Statistical Analysis System (SAS Institute, 1989).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Poblaciones de Bacterias Fijadoras de N Atmosférico de vida libre (BFNA)

El análisis estadístico mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos (Tukey, $P = 0.05$). De las cuatro concentraciones de queroseno incorporadas al suelo, la de 2500 mg kg^{-1} presentó las mayores poblaciones de BFNA en los tres muestreos evaluados y fueron las zonas del rizoplano y la rizósfera las que presentaron las más altas poblaciones de este grupo microbiano (Figura 2). Esta conducta es muy conocida; Darrah (1991), mediante una simulación, realizó un modelo de la rizósfera para conocer la dinámica de poblaciones alrededor de las raíces y la liberación de exudados solubles. Dicho autor encontró que las poblaciones en la rizósfera de una raíz en crecimiento podían variar considerablemente con la distancia a lo largo de la misma, dependiendo de la liberación de los exudados radicales. Brimecombe *et al.* (2001) mencionaron que, por efecto de los exudados radicales, las poblaciones microbianas tienden a habitar en mayor número cerca de la raíz, ya que favorecen a que todas las sustancias que excreta la raíz sean utilizadas por los microorganismos en el suelo para su crecimiento.

En cuanto a los muestreos realizados, se supo que a 19 ddt las poblaciones de BFNA eran mayores en las tres zonas de la raíz estudiadas, respecto a las obtenidas en los muestreos realizados a 47 y 83 ddt en las mismas zonas de la raíz; y que al paso del tiempo disminuían de manera considerable al aumentar la

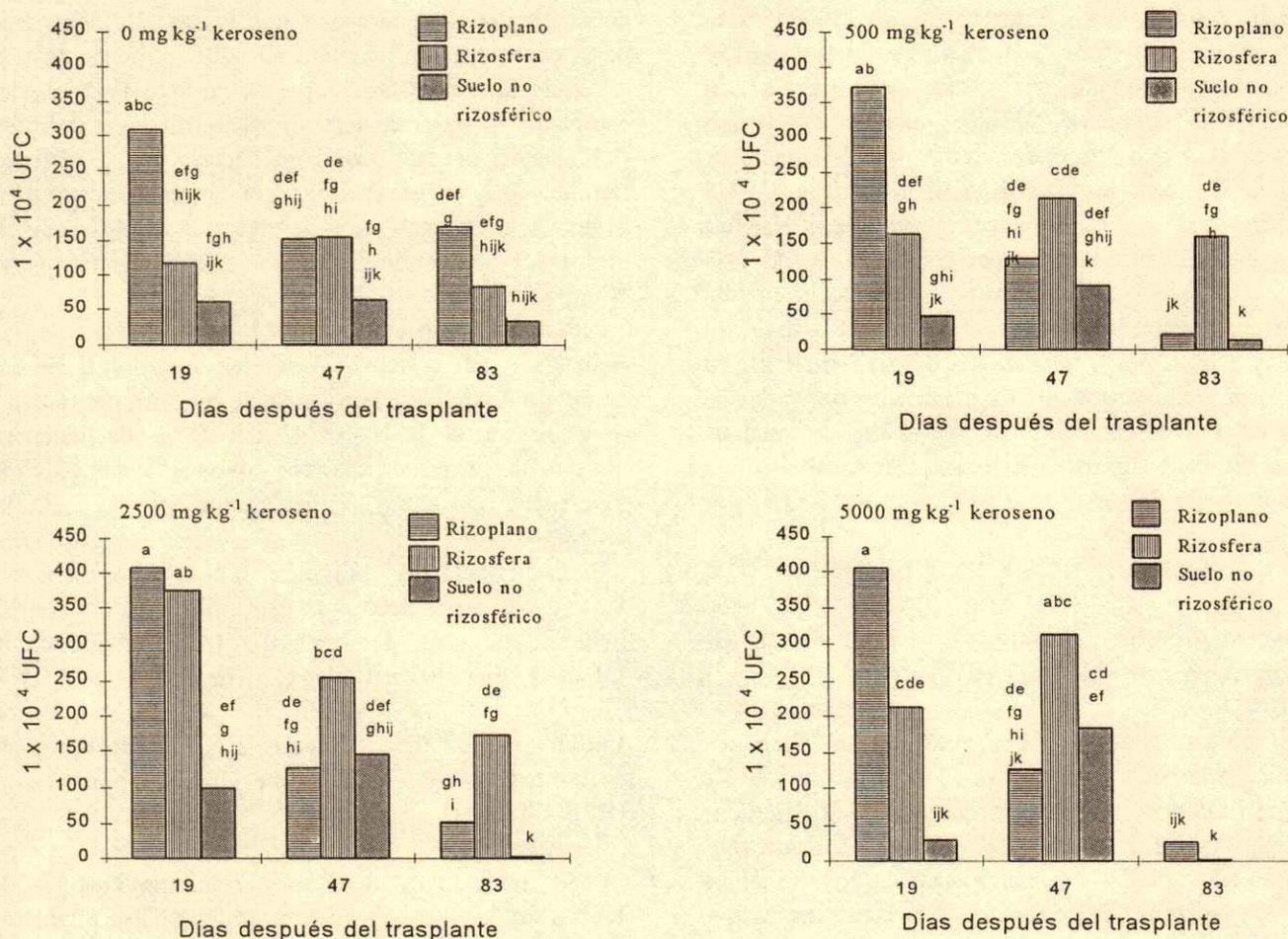
concentración del queroseno, hasta llegar a desaparecer en la concentración más alta 83 ddt. Con respecto a la zona de la raíz estudiada, se notó que la zona del rizoplano y la rizósfera presentaron las mayores poblaciones de este grupo de bacterias y se observó también que, en general, las poblaciones aumentaban al crecer la concentración de queroseno, sobre todo en el primer muestreo para la zona del rizoplano (Figura 2).

Por el número de unidades formadoras de colonias obtenidas, se concluye que la incorporación del complejo de hidrocarburo al suelo no limitó el número de población de BFNA, a 19 ddt. Esta conclusión se obtuvo después de analizar algunos resultados de investigadores como Tuhzxlacut *et al.* (2000), quienes al evaluar poblaciones microbianas hidrocarbonoclastas obtuvieron 6.6×10^3 a 1.2×10^5 UFC g^{-1} de suelo seco y en este trabajo se obtuvieron poblaciones hasta de 4×10^6 (representado en la Figura 2 como 409×10^4 UFC g^{-1} de suelo).

Poblaciones de Bacterias Fijadoras de N Atmosférico de Vida Libre Hidrocarbonoclastas (BFNA-HC's)

Al analizar estadísticamente las poblaciones de BFNA-HC's, se obtuvieron diferencias altamente significativas entre tratamientos (Tukey, $P = 0.05$). Al igual que con el grupo de BFNA, el análisis estadístico mostró que la concentración de 500 mg kg^{-1} del complejo de hidrocarburos presentó las mayores poblaciones de BFNA-HC's en los dos muestreos. Con respecto al tiempo, a 47 ddt las poblaciones fueron mayores que las obtenidas a 83 ddt donde éstas disminuyeron considerablemente, en el suelo sin planta.

Referente a la zona de la raíz estudiada, la zona del rizoplano y la rizósfera presentaron mayores poblaciones de BFNA-HC's con respecto a la zona del suelo sin planta. Las poblaciones de este grupo de bacterias se incrementaron con la incorporación del complejo de hidrocarburos a 47 ddt en la zona del rizoplano y la rizósfera (Figura 3). Al respecto, Perez-Vargas *et al.* (2000) mencionaron que las BFNA tienen la característica de fijar N atmosférico y de utilizar el complejo de hidrocarburos como única fuente de carbono. Estos investigadores encontraron que las BFNA-HC's reducían hasta 75% del total de los hidrocarburos que forman al queroseno.



Diferencia mínima significativa = 131. Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P = 0.05$). UFC = unidades formadoras de colonias.

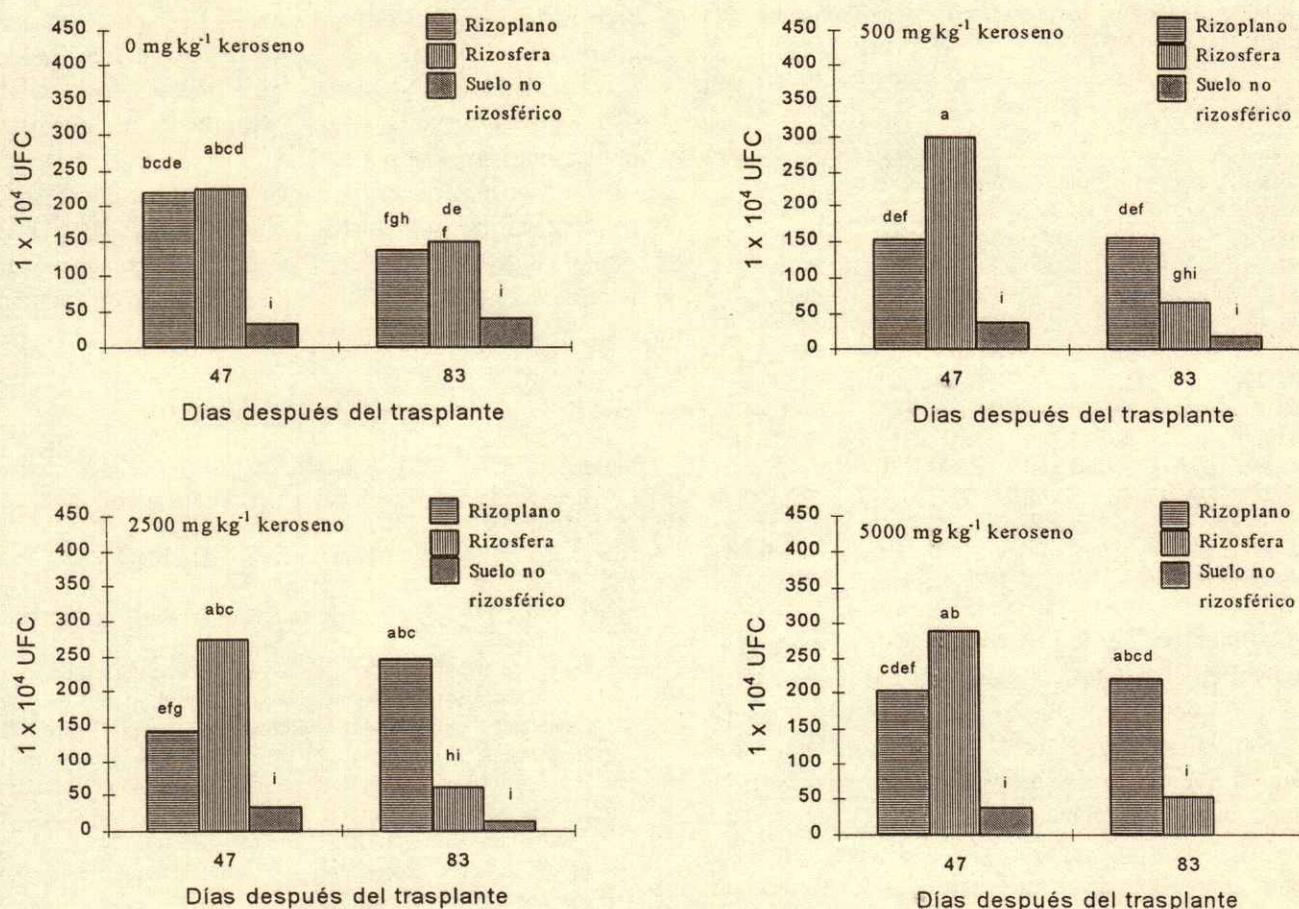
Figura 2. Bacterias fijadoras de N atmosférico de vida libre en un suelo contaminado con queroseno.

Se sabe que las BFNA-HC's logran vivir en suelos contaminados con hidrocarburos más tóxicos que el queroseno; así, Hernández *et al.* (2000a), al estudiar las poblaciones de BFNA-HC's en suelos que presentaron 2500 mg kg⁻¹ de petróleo crudo, encontraron poblaciones hasta de 65×10^6 UFC g⁻¹ de suelo, superiores a las reportadas en este ensayo. Al respecto, Bossert y Bartha (1984) mencionaron que suelos de Nigeria contaminados con petróleo crudo deficientes en N, son capaces de sostener abundantes poblaciones de microorganismos asimbióticos fijadores de N atmosférico. Esta conclusión la obtuvieron después de realizar conteos y aislamientos de poblaciones microbianas en dos suelos agrícolas: uno contaminado crónicamente y el segundo recientemente

contaminado; en el primero encontraron 83% de colonias de BFNA y en el segundo 40% de colonias de BFNA. Los autores también citaron que el establecimiento de este grupo microbiano en los suelos afectados por petróleo mejora significativamente la cantidad de N presente en el suelo.

En general, se obtuvieron mayores poblaciones de BFNA que de BFNA-HC's; sin duda una de las causas fue que las BFNA-HC's se sometieron a mayores cantidades de queroseno, principalmente cuando se evaluaron las poblaciones en el medio de cultivo Rennie modificado (1981), donde la única fuente de carbono fue el complejo de hidrocarburos.

En comparación con el suelo sin planta, la zona del rizoplano y la rizósfera presentaron las mayores



Diferencia mínima significativa = 78. Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey, P = 0.05). UFC = unidades formadoras de colonias.

Figura 3. Bacterias fijadoras de N atmosférico de vida libre hidrocarbonoclastas en un suelo contaminado con queroseno.

poblaciones, tanto de BFNA como de BFNA-HC's. Lo anterior ocurre porque en las zonas más cercanas a la raíz, los microorganismos aprovechan eficientemente los compuestos orgánicos producidos en los exudados radicales, entre los que se encuentran carbohidratos, vitaminas, enzimas y aminoácidos (Schnoor *et al.*, 1995), los cuales proporcionan el carbono suficiente para mantener poblaciones microbianas hasta de $1 \times 10^9 \text{ g}^{-1}$ en el suelo rizosférico (Paul y Clark, 1989). Cuando se evalúan poblaciones microbianas en las zonas de influencia de la raíz (rizoplano, rizósfera y suelo sin planta) contaminadas por compuestos orgánicos, los resultados muestran que las zonas más cercanas a la misma son las que presentan poblaciones más altas (Lee y Banks, 1993; Haby y Crowley, 1996).

Actividad de la Nitrogenasa de los Aislamientos de las BFNA Hidrocarbonoclastas

El análisis estadístico mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos (Tukey, P = 0.05). A 21 cepas se les aplicó la actividad de la enzima nitrogenasa; de ellas, 29% presentó actividad en la fijación de N con una alta variabilidad entre cepas, desde 0.0033 hasta 19.106 nmol de etileno producido por día (Cuadro 3).

Perez-Vargas *et al.* (2000) obtuvieron resultados superiores cuando estudiaron la capacidad de BFNA, aisladas de rizósfera de frijol, al utilizar queroseno (complejo de hidrocarburos) como única fuente de carbono; dichos autores encontraron una actividad de la enzima nitrogenasa que fluctuaba de

Cuadro 3. Actividad de la nitrogenasa de aislamientos de BFNA hidrocarbonoclastas.

Cepas	nmoles C ₂ H ₄ 24 h ⁻¹ vial ⁻¹	Cepas	nmoles C ₂ H ₄ 24 h ⁻¹ vial ⁻¹
BFNAH5 a	19.1060	BFNAH9 d	INSIG.
BFNAH6 b	15.1335	BFNAH12 d	INSIG.
BFNAH7 c	12.2064	BFNAH14 d	INSIG.
BFNAH10 d	0.1024	BFNAH15 d	INSIG.
BFNAH11 d	0.1346	BFNAH16 d	INSIG.
BFNAH13 d	0.0033	BFNAH17 d	INSIG.
BFNAH1 d	INSIG.	BFNAH18 d	INSIG.
BFNAH2 d	INSIG.	BFNAH19 d	INSIG.
BFNAH3 d	INSIG.	BFNAH20 d	INSIG.
BFNAH4 d	INSIG.	BFNAH21 d	INSIG.
BFNAH8 d	INSIG.		

Medias con igual letra en columna no difieren estadísticamente (Tukey, P = 0.05). DMS = 0.9344, C₂H₄ = etileno

BFNA HC's = bacteria fijadora de nitrógeno atmosférico hidrocarbonoclastas. INSIG. = insignificante (menor que 0.0033 nmoles).

4 a 183 nmol N₂ 3E09⁻¹ bacteria⁻¹ d⁻¹. La diferencia que existió en el estudio realizado por Perez-Vargas *et al.* (2000), con respecto a este ensayo, fue que calcularon la actividad de la nitrogenasa de ocho consorcios microbianos y en este trabajo se valoró la actividad de la nitrogenasa por cepas, es decir, por especie; lo anterior sugiere que los consorcios de bacterias fijan con mayor eficiencia N atmosférico que una sola especie de bacteria.

La importancia de estas cepas estudiadas en el presente trabajo es, que tienen un alto potencial para utilizar a los hidrocarburos como fuente de carbono, por lo cual son muy útiles en los programas de biorremediación. En relación con este tema, Bossert y Bartha (1984) mencionaron que las bacterias fijadoras de N atmosférico de vida libre presentes en los suelos contaminados proveen significantes cantidades de N a suelos que carecen de este nutrimento y, como consecuencia, provocan incrementos en las poblaciones de otros microorganismos biodegradadores, lo cual favorece la biorremediación del suelo contaminado.

CONCLUSIONES

- Las bacterias fijadoras de N atmosférico hidrocarbonoclastas son capaces de fijar N atmosférico en suelos contaminados con queroseno, por lo que se sugiere incorporar a este grupo microbiano en los suelos afectados por este hidrocarburo.

- Las poblaciones de bacterias fijadoras de N atmosférico y bacterias fijadoras de N atmosférico

hidrocarbonoclastas son mayores en la zona rizosférica que en el suelo sin planta. Esto indica que, en suelos contaminados por queroseno, es importante incorporar plantas al sistema para estimular a mayores poblaciones en el sitio afectado.

- En la rizósfera de frijol contaminada con queroseno, se encuentran numerosas poblaciones de bacterias fijadoras de N atmosférico y bacterias fijadoras de N atmosférico hidrocarbonoclastas, mismas que actúan como microorganismos biodegradadores.

LITERATURA CITADA

- Anderson, T.A., E.A. Guthrie y B.T. Walton. 1993. Bioremediation in the rhizosphere. *Environ. Sci. Tech.* 27: 2630-2636.
- Atlas, R.M. 1984. *Petroleum microbiology*. MacMillan. New York.
- Baker, K.H. y D.S. Herson. 1994. *Bioremediation*. McGraw-Hill, New York.
- Benítez L., J.M. y R. Ferrera-Cerrato. 1990. Inoculación de frijol con *Rhizobium leguminosarum* boivar phaseoli de alta capacidad competitiva y tolerancia a sequía, bajo dos condiciones de humedad. pp. 111-128. *In: J. Acosta G. (ed.). Informe de investigación sobre frijol. Proyecto colaborativo INIFAP-Michigan State University. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Durango, Durango, México.*
- Bossert, I. y R. Bartha. 1984. The fate of petroleum in soil ecosystems. pp. 435-473. *In: R.M. Atlas (ed.). Petroleum microbiology. MacMillan. New York.*
- Brimecombe, M.J., F.A. De Leij y J.M. Lynch. 2001. The effect of root exudates on rhizosphere microbial populations. pp. 95-140. *In: R. Pinton, Z. Varanini y P. Nannipieri (eds.). The rhizosphere. Marcel Dekker. New York.*
- Campbell, D.H., F.S. Garvey, N.E. Cremer y D.H. Sussdorf. 1970. pp. 435-436. *In: W.A. Benjamin (ed.). Methods in immunology. 2nd ed. MacMillan. New York.*
- Clark, F.E. 1965. Agar plate method for total microbial count. pp. 1460-1466. *In: C.A. Black (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy No. 9. Part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI.*
- Darrah, P.R. 1991. Models of the rhizosphere. *Plant Soil* 138: 147-158.
- Fletcher, D.R. 1994. Practical considerations during bioremediation. pp. 39-55. *In: D.L. Wise y D.J. Trantolo (eds.). Remediation of hazardous waste contaminated soils. Environmental Science and Pollution Control Series. Marcel Dekker. New York.*
- Frick, C.M., R.E. Farrell y J.J. Germida. 1999. Assessment of phytoremediation as an *in situ* technique for cleaning oil-contaminated sites. Report prepared by Petroleum Technology Alliance of Canada. Calgary, Canada.
- Granados P., R. y M.C. Villaverde P. 1997. *Microbiología. Editorial Paraninfo. Magallanes, Madrid, España.*

- Haby, P.A. y D.E. Crowley. 1996. Biodegradation of 3-chlorobenzoate as affected by rhizodeposition and selected carbon substrates. *J. Environ. Qual.* 25: 304-310.
- Hardy, R.W.F., R.C. Burns y R.D. Holsten. 1973. Applications of the acetylene-ethylene assay for measurement of nitrogen fixation. *Soil Biol. Biochem.* 5: 47-81.
- Hernández A., E., R. Ferrera-Cerrato, L. Fernández L. y R. Rodríguez V. 2000a. Efecto del petróleo sobre poblaciones de bacterias hidrocarbonoclastas rizosféricas y no rizosféricas de *Chamaecrista nictitans*. pp. 745-749. *In*: R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibañez-Huerta y N.E. García-Calderón (eds.). La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo II. Investigación y educación hacia la sostenibilidad edáfica para el tercer milenio. Universidad Nacional Autónoma de México-Colegio de Postgraduados-Universidad Autónoma Chapingo. México, D.F.
- Knowles, R. y W.L. Barriquio. 1999. Free-living dinitrogen-fixing bacteria. pp. 179-195. *In*: S.H. Mickelson (managing editor). *Methods of soil analysis*. SSSA Series 5. Part. 2. Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Lee, E. y M.K. Banks. 1993. Bioremediation of petroleum contaminated soil using vegetation: A microbial study. *J. Environ. Sci. Health* 10: 2187-2198.
- Parkinson, D. 1982. Filamentous fungi. pp. 949-953. *In*: A.L. Page (ed.). *Methods of soil analysis*. Agronomy 9. Part 2. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Paul, E.A. y F.E. Clark. 1989. *Soil microbiology and biochemistry*. Academic Press. San Diego, CA.
- Perez-Vargas J., H.M. Poggi-Varaldo, G. Calva-Calva, E. Ríos-Leal, R. Rodríguez-Vázquez, R. Ferrera-Cerrato y F. Esparza-García. 2000. Nitrogen fixing bacteria capable of utilizing kerosene hydrocarbons as a sole carbon source. *J. Water Sci. Tech.* 5-6: 407-411.
- Rennie, R.J. 1981. A single medium for the isolation of acetylene-reducing (dinitrogen-fixing) bacteria from soils. *Can. J. Microbiol.* 27: 8-14.
- Riser-Roberts, E. 1998. Monitoring bioremediation. p. 542. *In*: *Remediation of petroleum contaminated soils*. Biological, physical and chemical processes. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.
- Rodríguez M., M.N. 1995. Microorganismos libres de nitrógeno. pp. 105-126. *In*: R. Ferrera-Cerrato y J. Pérez-Morreno (eds.). *Agromicrobiología, elemento útil en la agricultura sustentable*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- SAS Institute Inc. 1989. *SAS/IML Software: Usage and reference*. Version 6. 1st ed. SAS Institute. Cary, NC.
- Saval, S. 1997. Biorremediación de un suelo contaminado con diesel. *Ingeniería y Ciencias Ambientales* 33: 24-30.
- Saval, S. 1998. Biorremediación: Alternativa para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos. *Ingeniería y Ciencias Ambientales* 34: 6-9.
- Schnoor, J.L., L.A. Licht, S.C. McCutcheon, N.L. Wolfe y L.H. Carreira. 1995. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environ. Sci. Tech.* 29: 318-323.
- Tuhzlaacute, J., C. Kovzlaacute, T. Cajthaml, K. Novzlaacute, C. Novotnzlyacute, J. Mertelzliacute y V. Sasek. 2000. Hydrocarbon deposition and soil microflora as affected by highway traffic. *Environ. Pollut.* 113: 225-262.
- Velázquez M., O. 1998. Aislamiento de microorganismos. pp. 123-133. *In*: G.R.M. Ramírez (ed.). *Manual de Prácticas de Microbiología General*. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Walton, B.T., A.M. Hoyleman, M.M. Perez, T.A. Anderson, T.R. Johnson, E.A. Guthrie y R.F. Christman. 1994. Rhizosphere microbial communities as a plant defense against toxic substances in soils. pp. 82-92. *In*: T.A. Anderson y J.R. Coast (eds.). *Bioremediation through rhizosphere technology*. American Chemical Society. Washington, DC.

APLICACIÓN DE FÓSFORO E INOCULACIÓN DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN EL CRECIMIENTO Y ESTADO NUTRICIONAL DE *Citrus volkameriana* Tan & Pasq

Phosphorus Application and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on Growth and Nutritional Status of *Citrus volkameriana* Tan & Pasq

Alejandro Alarcón¹ y Ronald Ferrera-Cerrato¹

RESUMEN

En la actualidad, se ha dado especial interés al uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la agricultura de México. Sin embargo, es importante considerar algunos aspectos que pueden influir en el efecto benéfico de estos micosimbiontes, como lo es la fertilización fosfatada aplicada a frutales. Se evaluó el efecto de la aplicación de fósforo sobre el crecimiento y la nutrición de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq, inoculado con el consorcio *Glomus* Zac-19. Plántulas de 25 días de edad, obtenidas a partir de semillas, se inocularon, o no, con el consorcio micorrízico *Glomus* Zac-19 (*Gl. claroides* Schenck & Smith, *Gl. diaphanum* Morton & Walker y *Gl. albidum* Walker & Rhodes) y se fertilizaron con 0, 20, 40, 60, 80 y 100 mg P kg⁻¹ de suelo, utilizando KH₂PO₄ como fuente fertilizante. Se planteó un experimento factorial (2 x 6) con 12 tratamientos y ocho repeticiones, en un diseño completamente al azar. La inoculación con el consorcio *Glomus* Zac-19 incrementó de manera significativa la altura, el diámetro y la tasa de crecimiento acumulado del tallo, así como la materia seca total, en comparación con la aplicación de las dosis de P y su combinación con el consorcio. La aplicación de P, en plantas inoculadas, incrementó la concentración de N y P en raíces, así como la concentración de K en hojas y raíces. Se destaca el efecto de la micorriza arbuscular en la absorción de K por la planta. La combinación micorriza*dosis de P favoreció la concentración de N y P en raíces. La aplicación de P no disminuyó significativamente la colonización micorrízica.

Palabras clave: *Glomus*, micorriza arbuscular, micotrofia, nutrición, manejo en vivero, cítricos.

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

Recibido: Septiembre de 2001. Aceptado: Agosto de 2002. Publicado en Terra 21: 91-99.

SUMMARY

Application of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in agricultural systems, such as fruit nurseries, is of special interest in many regions. In order to use these fungi, it is important to consider management practices, such as phosphate fertilizers applied to fruit crops, which may influence the effectiveness of fungi. This research evaluated the effect of phosphate fertilization on the symbiosis between *Citrus volkameriana* Tan & Pasq and *Glomus* Zac-19, regarding growth and plant nutrition (NPK). Seedlings (25 days old) were inoculated with the mycorrhizal consortium *Glomus* Zac-19 (*Gl. claroides* Schenck & Smith, *Gl. diaphanum* Morton & Walker y *Gl. albidum* Walker & Rhodes) and fertilized with 0, 20, 40, 60, 80, and 100 mg P kg⁻¹ soil; KH₂PO₄ was used as fertilizer source. A factorial experiment (2 x 6) was established with 12 treatments and eight replicates in a randomized design. Mycorrhizal inoculation significantly increased plant height, stem diameter, accumulated stem growth rate, and total dry matter relative to fertilized plants. In mycorrhizal plants, N and P root concentration and K shoot and root concentrations were significantly increased by P-application. Arbuscular mycorrhizal inoculation had a relevant role in K uptake by the plant. The combination of mycorrhizal fungi and P showed significant effects on N and P root concentration. P-application did not negatively affect mycorrhizal colonization.

Index words: *Glomus*, arbuscular mycorrhiza, mycotrophy, plant nutrition, nursery management, citrus.

INTRODUCCIÓN

La efectividad de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), entendida como la capacidad de estimular mayor crecimiento en la planta (Sylvia, 1999), al inocularlos en frutales obtenidos por

diferentes sistemas de propagación, se ha demostrado en diversos estudios (Lovato *et al.*, 1996; Alarcón y Ferrera-Cerrato, 1999). En el caso de cítricos, la inoculación de estos endófitos produce efectos significativos en el crecimiento de diversos portainjertos, así como en algunos aspectos fisiológicos, como la fotosíntesis y distribución de carbohidratos (Alarcón *et al.*, 1998; Ferrera-Cerrato y González-Chávez, 1998).

Ante la inminente llegada del vector del virus de la tristeza de los cítricos (VTC) a México, se ha iniciado la investigación con portainjertos tolerantes a esta enfermedad. Se sabe que material infectado con el virus se encuentra en algunas regiones de los estados de Veracruz y Tamaulipas, lo que originó que se implementara un plan de emergencia contra esta enfermedad desde 1993 (SARH, 1993). Esta problemática ha llevado a investigar los portainjertos alternativos al naranjo agrio (*Citrus aurantium* L.), entre los que destacan algunos citranges [(Troyer y Carrizo) Hernández-Meza *et al.*, 1998], así como el limón volkameriano (Alarcón *et al.*, 1998) y, con ellos, a diversificar el uso de portainjertos en plantaciones comerciales de cítricos. No obstante, en muchos de estos portainjertos alternativos se desconoce el micotrofismo hacia los HMA y su comportamiento de crecimiento por la aplicación de fertilizantes.

A pesar de la importancia de los HMA, su inoculación aún no se generaliza en México, por lo que se requiere de investigar los efectos de estos endófitos en diversos portainjertos, así como conocer el impacto de la fertilización en la efectividad de los HMA. Como antecedente, Sieverding (1991), Alarcón *et al.* (1993) y Smith y Read (1997) mencionaron que la aplicación de fósforo reduce la colonización micorrízica y el beneficio de los HMA en algunas plantas de consistencia herbácea. Sin embargo, con respecto a cítricos, como *C. volkameriana* y otros tolerantes al VTC, poco se sabe de este efecto negativo de la fertilización. Es posible inferir que la inoculación con HMA favorece el crecimiento de portainjertos tolerantes al VTC. Por otra parte, la combinación de los HMA con fertilizantes fosfatados puede repercutir también en el desarrollo de los portainjertos alternativos al naranjo agrio. Sin embargo, se requiere de investigaciones que permitan definir el efecto de los HMA y de la aplicación de fertilizantes fosfatados no sólo en el crecimiento, sino también en el estado nutricional de los portainjertos tolerantes al VTC.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de fósforo sobre el crecimiento y la nutrición del portainjerto *Citrus volkameriana* Tan & Pasq inoculado con el consorcio micorrízico *Glomus* Zac-19.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente experimento se llevó a cabo en condiciones de invernadero del Área de Microbiología del Suelo, Colegio de Postgraduados, Montecillo, estado de México.

Las semillas del portainjerto *Citrus volkameriana* Tan & Pasq (proporcionadas por el Dr. Ángel Villegas Monter, Especialidad de Fruticultura, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados) se desinfectaron con solución de captan y benomil a 1%. La aplicación de los fungicidas a la semilla se hizo para evitar la presencia de otros organismos fitopatógenos y, con ello, asegurar la sanidad de las plántulas, previo a la inoculación del consorcio micorrízico. La germinación de las semillas se llevó a cabo en cámara de incubación a 28 °C, utilizando arena de río esterilizada con calor húmedo, aplicando una presión de vapor de 1.26 kg cm⁻³, durante tres horas. Después de 25 días de la emergencia, las plántulas se transplantaron a bolsas de polietileno negro que contenían 7 kg de sustrato, el cual consistió de una mezcla de suelo agrícola de la región de San Mateo Atenco, estado de México (seleccionado por presentar bajo contenido en fósforo), y arena de río, en proporción 2:1 v/v. La mezcla se esterilizó con calor húmedo (1.26 kg cm⁻³ de presión de vapor, 3 h). Las características del sustrato fueron las siguientes: materia orgánica, 0.40%; N-total, 0.17%; P-Olsen, 6.26 µg g⁻¹ de sustrato; K-disponible, 1.8 meq 100 g⁻¹ de sustrato; conductividad eléctrica, 0.2 dS m⁻¹; pH 7.5 y textura franco-arenosa (60.9% de arena, 16.4% de arcilla y 22.7% de limo).

El consorcio micorrízico *Glomus* Zac-19, integrado por *Gl. claroides* Schenck & Smith, *Gl. diaphanum* Morton & Walker y *Gl. albidum* Walker & Rhodes (Chamizo *et al.*, 1998) se inoculó en cada plántula, en los tratamientos correspondientes. La inoculación se realizó en el momento del trasplante, aplicando 10 g de suelo inóculo que incluía 250 esporas, hifas y fragmentos de raíces de sorgo colonizadas en 65.6%. El fósforo se aplicó una

semana después del trasplante y de la inoculación. La cantidad estimada de fertilizante fosfatado a aplicar a cada planta, utilizando como fuente K_2HPO_4 , se diluyó en 100 mL de agua, misma que se aplicó alrededor del tallo.

Se tuvieron 12 tratamientos, con ocho repeticiones, consistentes de plantas inoculadas y no inoculadas, con aplicación de fósforo en seis dosis (0, 20, 40, 60, 80 y 100 mg kg^{-1} de suelo). Los tratamientos tuvieron un arreglo factorial 2 x 6 en un diseño completamente al azar. Las variables consideradas, a 210 días después del trasplante, fueron: altura de planta, diámetro y tasa de crecimiento acumulado del tallo (Hurtado y Sieverding, 1986), área foliar (Areometer LI-COR modelo LI-3100), materia seca total, relación raíz:parte aérea, área foliar específica (área foliar/materia seca de hojas) y colonización micorrízica en raíces (Phillips y Hayman, 1970; Biermann y Linderman, 1981). Se realizó la determinación de nitrógeno, fósforo y potasio, tanto en hojas y raíces, mediante los métodos descritos por Etchevers (1989). Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (SAS Institute, 1995) y se utilizó la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respuesta en Crecimiento de Plantas

La inoculación con *Glomus* Zac-19 indujo incrementos significativos en altura, diámetro de tallo y materia seca total de las plantas (Cuadro 1). En el caso de la altura y el diámetro del tallo, se estableció un sinergismo de la micorriza con las dosis de P aplicado, sobresaliendo las de 20 mg y 80 mg, respectivamente. Por otra parte, el contenido de materia seca total presentó diferencias no significativas, en el tratamiento donde se combinó el consorcio con 80 mg de P. En las tres variables mencionadas, la interacción micorriza*fósforo no fue significativa por lo que el principal efecto se atribuyó a la presencia de la micorriza, como factor principal (Cuadro 1). No obstante, la aplicación de P en plantas inoculadas produjo mayores respuestas que la sola inoculación del consorcio micorrízico (Cuadro 1).

No se demostró un efecto significativo en la relación raíz:parte aérea y área foliar específica, entre tratamientos (Cuadro 1). En plantas no inoculadas, la mayor proporción de crecimiento hacia la raíz se observó con la aplicación de 40, 60 y 80 mg de P; mientras que en plantas inoculadas, el mayor valor

Cuadro 1. Efecto de la inoculación con *Glomus* Zac-19 y la aplicación de fósforo en el crecimiento y desarrollo de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq, a 210 días después del trasplante.

Inoculación	Fósforo aplicado mg kg^{-1}	Altura	Diámetro de tallo cm	Materia seca total g	Relación raíz:parte aérea g g^{-1}	Área foliar específica cm ² g ⁻¹
Sin micorriza	0	17.5 c [†]	0.23 d	2.27 b	0.36 a	101.8 a
	20	18.3 c	0.23 d	1.38 b	0.33 a	141.5 a
	40	19.7 c	0.25 d	1.83 b	0.72 a	178.2 a
	60	41.8 abc	0.30 cd	2.68 b	0.69 a	215.4 a
	80	20.7 c	0.27 d	1.98 b	0.69 a	151.0 a
	100	27.5 bc	0.34 bcd	3.60 b	0.40 a	197.5 a
Con micorriza	0	44.8 abc	0.45 abc	11.53 a	0.45 a	145.8 a
	20	63.7 a	0.52 a	12.93 a	0.49 a	140.8 a
	40	60.4 ab	0.52 a	12.67 a	0.49 a	386.9 a
	60	60.5 ab	0.49 ab	13.05 a	0.53 a	251.3 a
	80	60.7 ab	0.53 a	14.71 a	0.42 a	142.6 a
	100	58.4 ab	0.52 a	13.58 a	0.44 a	161.9 a
DMS		33.8	0.16	3.58	0.90	346.4
Significancia:						
Micorriza		0.01	0.01	0.01	NS	NS
Fósforo		NS	NS	NS	NS	NS
Micorriza*Fósforo		NS	NS	NS	NS	NS

[†] Medias con letras idénticas en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$). NS = no significativo. n = 8.

se obtuvo con la combinación de 60 mg de P (Cuadro 1). La presencia de la simbiosis micorrízica favoreció la distribución homogénea del crecimiento de las plantas de cítricos, tanto hacia la parte aérea, como hacia la raíz. Es decir, de cada gramo de materia seca producido por una planta inoculada, 500 mg se distribuyen tanto a la parte aérea, como al sistema radical; mientras que en plantas no inoculadas, el crecimiento se da en mayor proporción hacia la parte aérea, en especial cuando se tiene limitación por fósforo. Aguilera-Gómez *et al.* (1999) establecieron que los HMA contribuyen en la disminución de la relación raíz:parte aérea de *Capsicum annuum* en comparación con plantas sin HMA y sin aplicación de P, cuyo valor fue mayor, situación contraria a lo obtenido en el presente experimento. Azcón-Bieto y Talón (2000) reportaron que la respuesta de la relación raíz:parte aérea es modificada por factores de estrés, ya que éstos limitan la división celular y expansión de las hojas. En este caso, el factor limitativo del crecimiento de las plantas no inoculadas es la ausencia de la simbiosis micorrízica. De este modo, las plantas sin HMA y sin aplicación de P tuvieron menor crecimiento (Cuadro 1,) debido a que estaban en una condición de limitación nutricional, en particular por P.

Con respecto a la producción de área foliar específica, a pesar de no encontrarse un efecto significativo entre tratamientos, las plantas inoculadas con aplicación de 40 mg de P presentaron mayor superficie foliar por gramo de hoja en comparación con los tratamientos restantes (Cuadro 1). Aguilera-Gómez *et al.* (1999) mencionaron que el aumento del área foliar específica tiene correlación con la producción de materia seca por efecto de la fotosíntesis, la cual es mejorada por los HMA en cítricos (Alarcón *et al.*, 1998).

La tasa de crecimiento acumulado del tallo fue significativamente mayor en plantas inoculadas más la aplicación de P, en comparación con las plantas no inoculadas aún con la aplicación de este nutrimento (Figura 1). En sí, la fertilización con las dosis 20, 40, 60 y 80 mg de P en plantas inoculadas, produjo mayor respuesta que la sola inoculación del consorcio micorrízico (Figura 1).

Los HMA propiciaron mayor crecimiento y desarrollo de *C. volkameriana* Tan & Pasq, cuya dependencia hacia estos endófitos es mayor que otros frutales (González-Chávez *et al.*, 1998), por lo que es recomendable inocularlos en portainjertos de cítricos, aun cuando se obtengan por diferentes sistemas de

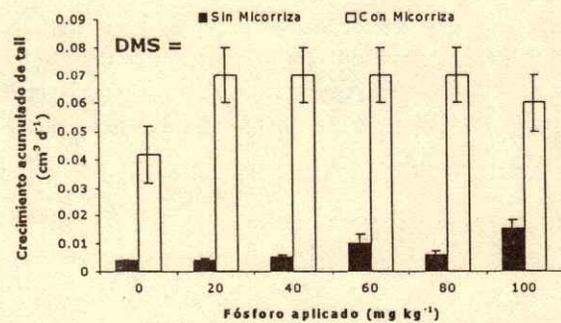


Figura 1. Tasa de crecimiento acumulado del tallo de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq, con inoculación de *Glomus Zac-19* y aplicación de seis dosis de fósforo, a 210 días después del transplante. Letras idénticas sobre las barras son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$). I = Error estándar. n = 8.

propagación (González-Chávez y Ferrera-Cerrato, 1993; Hernández-Meza *et al.*, 1998; Alarcón y Ferrera-Cerrato, 1999).

La fertilización con fósforo en plantas no inoculadas, al compararlas con la sola inoculación de los HMA, no produjo efectos significativos en el crecimiento, incluso con 100 mg de P (Cuadro 1). Al hacer una comparación entre las plantas inoculadas, la aplicación de 20 mg de P produjo ligeros incrementos en altura (42.1%) y en el diámetro de tallo (15.5%). En el caso de la combinación de los HMA con 80 mg de P, la materia seca tuvo un incremento de 27.5%, con respecto a las plantas inoculadas y sin aplicación de P. No obstante el ligero efecto sinérgico observado, es posible combinar el uso de este tipo de fertilizantes en plantas inoculadas y, con ello, hacer más eficiente el uso de los fertilizantes, lo que repercute directamente en el vigor y crecimiento de las plantas. Además, al aplicar menor cantidad de fertilizante, o incluso no aplicarlo, en plantas inoculadas, es posible reducir los costos de producción de las plantas en el vivero. Estos resultados denotan el carácter micotrófico del portainjerto cuya dependencia de los HMA es tal que, a pesar de encontrarse en disponibilidad de P, no son capaces de incrementar su crecimiento. En este caso, la tasa de crecimiento acumulado del tallo tuvo mayor respuesta por la inoculación del consorcio micorrízico, mientras que en plantas sin HMA, el mayor valor se observó con 100 mg de P (Figura 1). La aplicación de P en plantas inoculadas, en cualquiera de sus dosis, es posible evitarla ya que no mostró efectos significativos con la sola inoculación del consorcio (0 mg de P kg⁻¹ de suelo). De este modo, puede establecerse que en las condiciones de fertilidad del sustrato utilizado, la sola

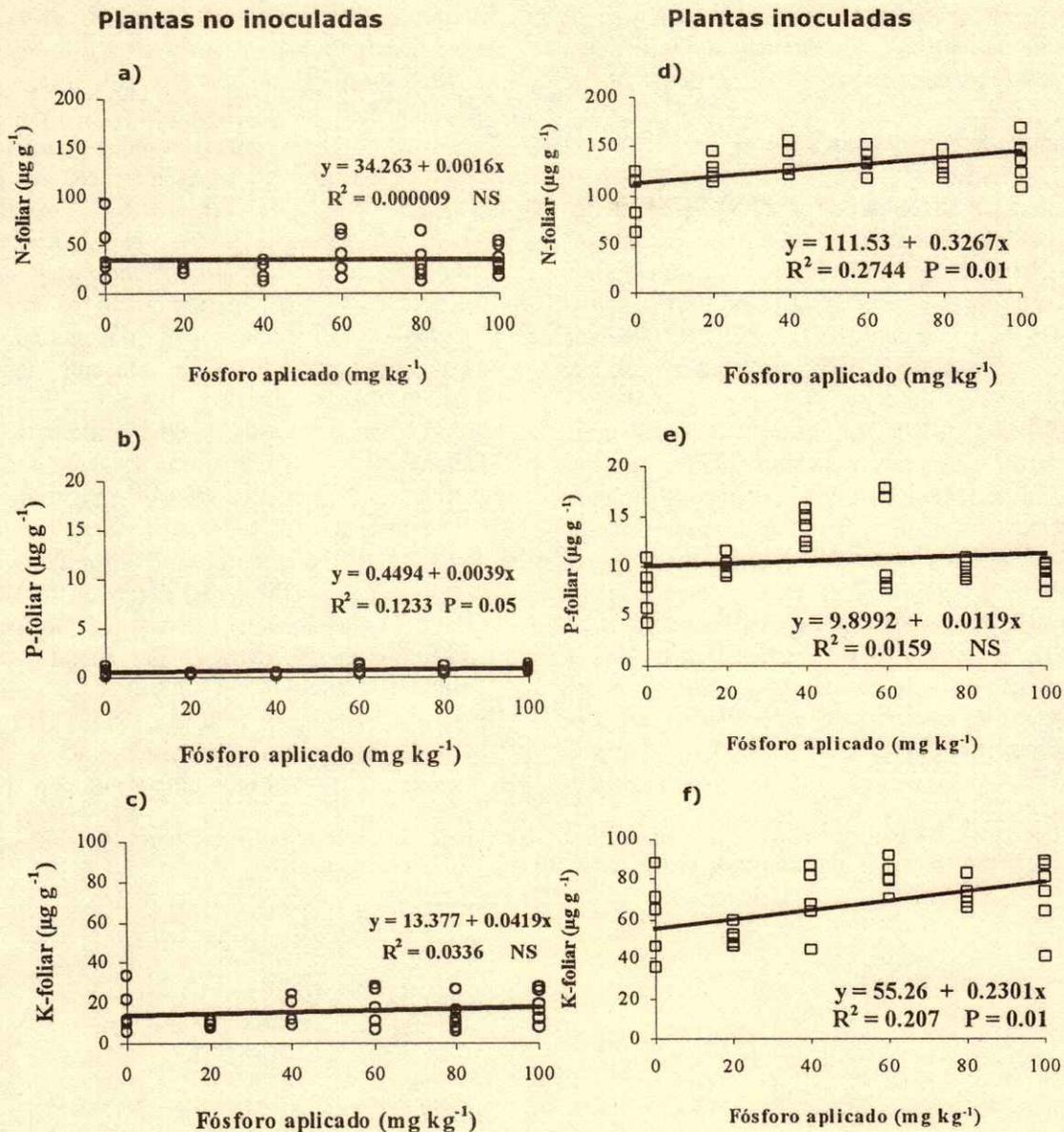


Figura 2. Relaciones entre la absorción de N, P y K en hojas de plantas de *Citrus volkameriana* con la aplicación de P. Plantas sin micorriza (a, b y c) y plantas con micorriza (d, e y f), a 210 días después del transplante. NS = no significativo.

inoculadas; sin embargo, la condición micorrizada de las plantas favoreció el aprovechamiento de los nutrientes.

Las concentraciones foliares de N, P y K de plantas inoculadas fueron inferiores a las reportadas como satisfactorias para árboles de cítricos en producción (Sauls y Pennington, 1999). Aunque no pueden realizarse comparaciones, las concentraciones obtenidas pueden corresponder a valores óptimos en

plantas de 210 días, ya que no se tienen datos del contenido nutricional de plantas de un año.

En la Figura 2, puede apreciarse la relación que se presentó en la capacidad de absorción de N, P y K con respecto a la aplicación de las dosis de P, tanto en plantas no inoculadas (Figura 2a, b y c) como en plantas inoculadas (Figura 2d, e y f). Con base en la ecuación de regresión lineal, la absorción de los macronutrientes tuvo limitada relación con la

aplicación de P, aún en presencia de los HMA. En plantas inoculadas, la concentración foliar de N presentó una relación (R^2) de 0.27, mientras que para P y K foliar fue de 0.01 y 0.20, respectivamente (Figura 2c, d y f). Estas relaciones fueron ligeramente mayores al compararlas con las relaciones de la concentración de N, P y K foliar de plantas no inoculadas (Figura 2a, b y c). En plantas no inoculadas, la aplicación de P no tuvo efecto significativo en la absorción de N y K, mientras que en el P absorbido, se obtuvo significancia a 0.05%. Esto denota que las plantas sin inoculación de HMA respondieron a la aplicación de P, como se observa en el Cuadro 1. En el caso de plantas inoculadas, la aplicación de P presentó significancia en el N y K. En el caso de la absorción de P, el efecto no fue significativo (Figura 2e). Por otra parte, la colonización de los HMA tuvo mayor relación (R^2) con la absorción de los tres nutrientes en tejido foliar (Figura 3). La relación (R^2) de la concentración foliar de N con la colonización micorrízica fue de 0.52 (Figura 3a), en tanto que la relación de la concentración de P y K en follaje con la colonización micorrízica fue de 0.52 y 0.42, respectivamente (Figura 3b y c). Estos valores denotan que la colonización del sistema radical por los HMA, es un factor que influye significativamente en la absorción y el mejoramiento del estado nutricional del portainjerto.

Por lo anterior, es posible aseverar que la condición micotrófica obligada de *C. volkameriana* no permite que la adición de fertilizantes fosfatados aporte mayor beneficio en su crecimiento, a menos que se inoculen HMA. Sin embargo, se requiere mayor información sobre la aplicación de fertilizaciones balanceadas en combinación con HMA, con el fin de obtener mayor vigor, sanidad y calidad de portainjertos de cítricos.

Efecto de la Aplicación de Fósforo sobre la Colonización Micorrízica

No se observaron efectos significativos de la aplicación de P en la colonización micorrízica. El porcentaje de colonización total promedio de los tratamientos inoculados fue de 55.8%, mientras que para arbuscúlos fue de 47.9%. No obstante, la dosis de 100 mg de P en plantas inoculadas mostró una colonización total de 22.1% y arbuscúlos de 21.5%. Este efecto del P se traduce en una disminución del 60% para colonización total y 55.% para arbuscúlos

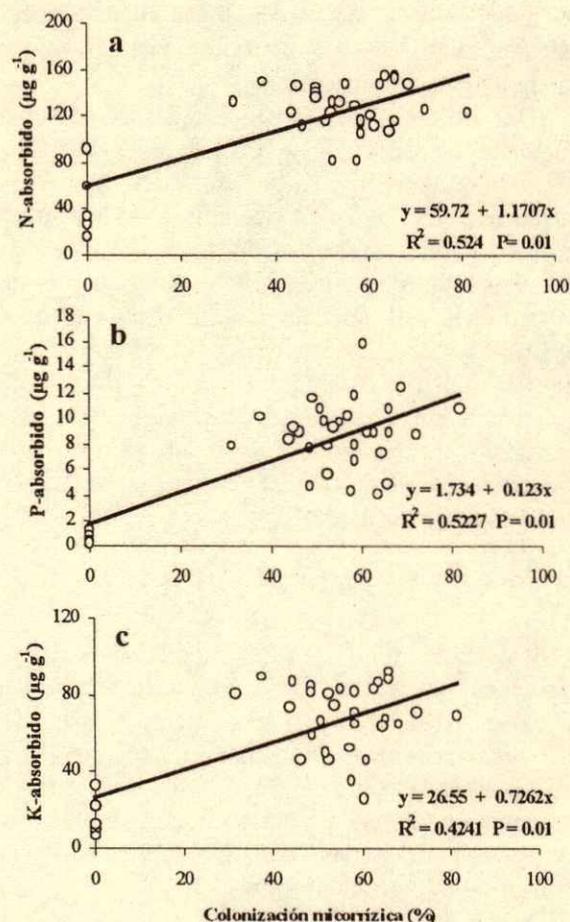


Figura 3. Relaciones entre la absorción de N, (a) P (b) y K (c) en hojas de plantas de *Citrus volkameriana* con la colonización micorrízica, a 210 días después del transplante.

(con respecto a la media de los tratamientos inoculados considerada como 100%). Esta reducción en la colonización total y en los arbuscúlos puede tener repercusión en el beneficio que aporta la simbiosis a las plantas, ya que se reducen de manera considerable las interfases de intercambio nutrimental entre el hongo y las células corticales (Smith y Read, 1997; Bago *et al.*, 2000). Con esta reducción de la colonización micorrízica, se justifica la disminución de los efectos en el crecimiento y nutrición que tuvieron las plantas inoculadas en combinación con las dosis 80 y 100 mg de P (Cuadros 1 y 2). Sin embargo, con base en la ecuación de regresión lineal estimada para la colonización total ($y = 60.30 - 0.08x$, $R^2 = 0.072$; $P = 0.01$ para colonización total) y para arbuscúlos ($y = 34.16 + 0.16x$, $R^2 = 0.096$; $P = 0.01$), puede establecerse que la fertilización con P no afectó la colonización micorrízica. No se observaron

vesículas en todas las raíces de las plantas inoculadas. Además, tampoco se apreció colonización micorrízica en las plantas no inoculadas.

De acuerdo con los valores de colonización micorrízica encontrada y con los resultados obtenidos en el crecimiento y en la nutrición de las plantas, puede establecerse que el beneficio de la simbiosis se expresó aún en presencia de dosis elevadas de P. Se ha demostrado que los HMA son, por lo general, susceptibles a la aplicación de P (Smith *et al.*, 1994; Sylvia, 1999). En este caso, el consorcio *Glomus* Zac 19 puede catalogarse como tolerante a la aplicación de fertilizantes fosfatados, sin dejar de considerar la fertilidad basal del sustrato utilizado, cualidad que puede tomarse en cuenta en las prácticas de fertilización utilizadas por los viveristas.

CONCLUSIONES

- La aplicación de las dosis de fósforo tuvo efecto diferencial en el beneficio del consorcio micorrízico *Glomus* Zac-19 sobre el crecimiento y la nutrición de *C. volkameriana*. La aplicación de fósforo, en plantas no inoculadas, no influyó en las variables de crecimiento de las plantas, en comparación con las respuestas obtenidas con la sola inoculación del consorcio micorrízico arbuscular.

- La concentración de N, P y K en hojas fue mayor en plantas inoculadas, en las que la aplicación de 60 mg de P kg⁻¹ produjo la mayor concentración de N y K foliar, así como mayor concentración de P en raíces. La simbiosis micorrízica favoreció la capacidad de absorción y aprovechamiento de K, tanto en hojas, como en raíces de este portainjerto.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto CONACYT 31947-B. Expresamos nuestro agradecimiento a la Dra. Carmen González por sus observaciones y sugerencias para el mejoramiento del escrito. Al Dr. Jorge A. Santizo Rincón por sus comentarios y apoyo en la revisión del análisis estadístico del experimento. Al personal técnico de apoyo del Área de Microbiología cuya ayuda es invaluable en el desarrollo de las investigaciones.

LITERATURA CITADA

Aguilera-Gómez, L., F.T., Davies Jr., V. Olalde-Portugal, S.A. Duray y L. Phavaphutanon. 1999. Influence of

phosphorus and endomycorrhiza (*Glomus intraradices*) on gas exchange and plant growth of chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis). *Photosynthetica* 36: 441-449.

- Alarcón, A. y R. Ferrera-Cerrato. 1999. Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Terra* 17: 179-191.
- Alarcón, A., M.C. González-Chávez, R. Ferrera-Cerrato y A. Villegas-Monter. 1993. Influencia de tres hongos micorrízicos vesículo-arbusculares en fresa (*Fragaria x annanassa* Duch.) cv. Fern y su interacción con fertilización fosfórica. pp. 62-76. In: J. Pérez-Moreno y R. Ferrera-Cerrato (eds.). Avances de investigación, Área de Microbiología de Suelos. PROEDAF-Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Alarcón, A., R. Ferrera-Cerrato, J.J. Almaraz y A. Villegas-Monter. 1998. Efecto de la simbiosis en la fotosíntesis de *Citrus volkameriana* Tan & Pasq. pp. 119-126. In: R. Zulueta R., M.A. Escalona A. y D. Trejo A. (eds.). Avances de la investigación micorrízica en México. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz.
- Alarcón, A., M.C. González-Chávez, R. Ferrera-Cerrato y A. Villegas-Monter. 2000. Efecto de hongos micorrízicos arbusculares en la dinámica de aparición de estolones y nutrición de plantas de fresa cv. Fern obtenidas por cultivo *in vitro*. *Terra* 18: 211-218.
- Azcón-Bieto, J. y M. Talón. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Mc Graw-Hill Interamericana. Edicions Universitat de Barcelona. Barcelona, España.
- Bago, B., C. Azcón-Aguilar, Y. Shachar-Hill y P.E. Pfeffer. 2000. El micelio externo de las micorrizas arbusculares como puente simbiótico entre la raíz y su entorno. pp. 71-86. In: A. Alarcón y R. Ferrera-Cerrato (eds.). Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular. Mundi Prensa. México, D.F.
- Bago, B., P. Pfeffer y Y. Shachar-Hill. 2001. Could the urea cycle be translocating nitrogen in the arbuscular mycorrhizal symbiosis? *New Phytol.* 149: 4-8.
- Biermann, B. y R.G. Linderman. 1981. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae. A proposed method towards standardization. *New Phytol.* 87: 423-432.
- Brown, R.W., R.C. Schultz y P.P. Kormanik. 1981. Response of vesicular arbuscular endomycorrhizal sweetgum seedlings to three nitrogen fertilizers. *Forest Sci.* 27: 413-420.
- Chamizo, A., R. Ferrera-Cerrato y L. Varela. 1998. Identificación de especies de un consorcio del género *Glomus*. *Rev. Mex. Micol.* 14: 37-40.
- Etchevers B., J.D. 1989. Análisis químico de suelos y plantas. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Ferrera-Cerrato, R. y M.C. González-Chávez. 1998. La simbiosis micorrízica en el manejo de vivero de los cítricos. pp. 37-63. In: R. Ferrera-Cerrato y J. Pérez-Moreno (eds.). Manejo de agroecosistemas sostenibles. Textos Universitarios. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz. México.
- González-Chávez, M.C. y R. Ferrera-Cerrato. 1993. Manejo de la endomicorriza vesículo-arbuscular en cinco portainjertos de cítricos. pp. 77-90. In: J. Pérez-Moreno y R. Ferrera-Cerrato (eds.). Avances de Investigación. Área de Microbiología de Suelos. Programa de Edafología. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.

- González-Chávez, M.C., R. Ferrera-Cerrato y J. Pérez-Moreno. 1998. Biotecnología de la micorriza arbuscular en frutales. Universidad Autónoma de Tlaxcala-Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Hernández-Meza, V., M.C. González-Chávez, R. Ferrera-Cerrato y A. Villegas-Monter. 1998. Inoculación con hongos endomicorrízicos durante el establecimiento de portainjertos de cítricos micropropagados. pp. 231-240. *In*: R. Zulueta R., M.A. Escalona A. y D. Trejo A. (eds.). Avances de la investigación micorrízica en México. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz.
- Hurtado, T. y E. Sieverding. 1986. Estudio del efecto de hongos formadores de micorriza vesículo-arbuscular (MVA) en cinco especies latifoliadas regionales en la zona geográfica del Valle de Cauca, Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 16: 109-115.
- Lovato, P.E., V. Gianinazzi-Pearson, A. Trouvelot y S. Gianinazzi. 1996. The state of art of mycorrhizas and micropropagation. *Adv. Hort. Sci.* 10: 46-52.
- Phillips, J.M. y D.S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment to infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55: 158-161.
- SAS Institute Inc. 1995. SAS/STAT User's guide, Version 6.03. SAS Institute. Cary, NC.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1993. Norma oficial de emergencia 001-1993 por la que se establece con carácter de obligatorio el Plan de emergencia contra el virus de la tristeza de los cítricos. *Diario Oficial de la Federación*, 2 de junio 1993.
- Sauls, J.W. y D. Pennington. 1999. Texas citrus-nutrition and fertilization. Texas Agricultural Extension Service. <http://aggiehorticulture/citrus/> Texas A&M University.
- Sieverding, E. 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems. *Schriftenreihe der GTZ* 224. Eschborn. Technical Cooperation-Federal Republic of Germany. Schborn, Germany.
- Smith, S.E. y D.J. Read. 1997. *Mycorrhizal symbiosis*. 2nd ed. Academic Press, Hortcourt Brace & Co. Publishers. London, UK.
- Smith, S.E., S. Dickson, C. Morris y F.A. Smith. 1994. Transfer of phosphate from fungus to plant in VA mycorrhizas: Calculation of the area of symbiotic interface and fluxes of P from two different fungi to *Allium porrum* L. *New Phytol.* 127: 93-99.
- Sylvia, D.M. 1999. Mycorrhizal symbioses. pp. 408-426. *In*: D.M. Sylvia, J.J. Fuhrmann, P.G. Hartel y D.A. Zuberer (eds.). Principles and applications of soil microbiology. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- Vázquez A., A. y N. Bautista A. 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.

FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y PATRÓN DE ABSORCIÓN NUTRIMENTAL DEL APIO EN FERTIRRIEGO

Nitrogen Fertilization and Nutrient-Uptake Pattern of Celery under Fertirrigation

P. Ramírez-Moreles^{1‡}, J. Z. Castellanos^{2§}, P. Sánchez G.¹, A. Galvis S.¹, A. Martínez G.³ y L. Tijerina Ch.¹

RESUMEN

El objetivo de optimizar la fertilización nitrogenada en *Apium graveolens* var. Dulce es obtener altos rendimientos y reducir el efecto residual al final del ciclo de N-NO₃⁻; para ello se requiere de la selección adecuada de un programa de fertilización, basado en el estudio sobre el patrón de absorción del nutrimento en el cultivo del apio. El experimento se llevó a cabo en el Lote 28 Unidad 4 del Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias en Celaya, Guanajuato, México, de enero a junio de 2000. Se estudiaron cuatro dosis de fertilización nitrogenada (0, 150, 300 y 500 kg N ha⁻¹) para evaluar la respuesta del apio a dicha fertilización y establecer el patrón de absorción de este nutrimento por el cultivo. La dosis de N afectó significativamente al rendimiento total y comercial, materia seca de biomasa aérea y extracción de N. El rendimiento total máximo fue 190 Mg ha⁻¹ con 500 kg N ha⁻¹, en tanto, que el rendimiento comercial máximo de 123 Mg ha⁻¹ se alcanzó con 300 kg N ha⁻¹. La extracción de N por la biomasa aérea se incrementó con la dosis de la fertilización nitrogenada. Por último, el modelo de regresión que mejor se ajustó al patrón de absorción de N fue del tipo exponencial: $\text{kg N ha}^{-1} = \exp(-1.37 + 0.10x - 0.0004x^2)$, donde x son los días grado de desarrollo.

Palabras clave: *Apium graveolens* var. Dulce, extracción de nitrógeno.

¹ Instituto de Recursos Naturales, ³ Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Texcoco, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Apartado Postal 112, 38010 Celaya, Guanajuato.

[§] Autor responsable. (casteja@attglobal.net)

Recibido: Mayo de 2001. Aceptado: Febrero de 2002.

Publicado en Terra 21: 101-108.

SUMMARY

The goal of optimizing nitrogen fertilization in *Apium graveolens* var. Dulce, is to obtain high crop yields and to reduce environmental risk at the end of the NO₃-N cycle. Therefore, it is necessary to select a proper fertilization program, based on studies of the pattern of nutrient absorption by celery. A field experiment was conducted from January to June 2000 in Plot 28 Unit 4 of the Experimental Station of the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias in Celaya, Guanajuato, Mexico. Four levels of N were studied (0, 150, 300, and 500 kg ha⁻¹) to assess the response of celery to N and to establish the crop uptake pattern for this nutrient. The N dose significantly affected total and marketable yield, dry matter and N extraction. Maximum total yield was 190 Mg ha⁻¹ with the quantity of 500 kg N ha⁻¹, while the highest marketable yield of 123 Mg ha⁻¹ was obtained with 300 kg N ha⁻¹. N extraction by shoot increased with increasing N fertilization. Finally, the regression model that best adjusted to the N uptake pattern was the exponential function: $\text{kg N ha}^{-1} = \exp(-1.37 + 0.10x - 0.0004x^2)$, where x is the growing degree-days.

Index words: *Apium graveolens* var. Dulce, nitrogen extraction.

INTRODUCCIÓN

Mediante el fertirriego es posible aplicar, en forma oportuna y precisa, los nutrimentos que requieren las plantas para alcanzar altos rendimientos, es decir, los fertilizantes pueden aplicarse durante el ciclo del cultivo en las cantidades que las plantas los requieran en cada etapa fenológica. Esto permite incrementar la eficiencia del uso de los fertilizantes, además de reducir el riesgo potencial de contaminación de los acuíferos por la lixiviación de los nitratos provenientes de los fertilizantes nitrogenados

(Hochmuth y Clark, 1991). Los cultivos hortícolas difieren ampliamente en sus requerimientos nutrimentales, así como en sus patrones de absorción nutrimental a través de su ciclo de crecimiento. Por ejemplo, cultivos como el apio que no fructifican, tienden a presentar absorciones bajas de N durante la primera mitad del ciclo de crecimiento, incrementando su demanda por dicho nutrimento hasta un poco antes de realizarse la cosecha (Hartz, 1994), de hecho, el apio acumula alrededor de 80 % de N en su biomasa total aérea (BTA) durante la segunda mitad de su ciclo vegetativo (Zink, 1963), en tanto que el jitomate que fructifica, acumula alrededor de 40 % del N en su BTA durante la primera mitad de su ciclo (Bar-Yosef *et al.*, 1980). Por lo tanto, para planear los programas de aplicación de fertilizantes en fertirriego, es fundamental contar con la información adecuada sobre la cantidad de nutrimentos requerida por el cultivo en cada etapa de su crecimiento (Castellanos, 1997). En este sentido, algunos estudios relacionados con la nutrición en el cultivo de apio indican que aproximadamente 50 % del peso fresco total aéreo (PFTA) se produce durante 21 días previos a la cosecha (Zink, 1963). Espinosa *et al.* (1993) observaron que aproximadamente 70 % del PFTA del cultivo de apio se alcanzó en dos a tres semanas previas a la cosecha y esto se acompañó por una máxima absorción de nutrimentos (Zink, 1963; Espinosa *et al.*, 1993), lo que puede deberse a las condiciones más frescas o cálidas del ambiente (Cannell *et al.*, 1963). Feigin *et al.* (1982) indicaron que las dosis altas, e.g. 500 kg N ha⁻¹, no producen los más altos rendimientos, aunque la absorción de N sí se incrementa con el aumento de la dosis de la fertilización nitrogenada (Stark *et al.*, 1982; Zheng *et al.*, 1995). Estas observaciones concuerdan con las de Engels y Marschner (1995), quienes observaron que un excesivo suministro de N puede reducir el crecimiento de la planta. Stark *et al.* (1982) indicaron que dosis de 400 kg N ha⁻¹ disminuyeron el ciclo vegetativo en el cultivo del apio. Dado lo anterior, en el presente trabajo se planteó evaluar la respuesta del apio a la fertilización nitrogenada y establecer el patrón de absorción de N en este cultivo. Hay que mencionar que Guanajuato es uno de los cuatro estados en México que participan con más de 90 % de la superficie total sembrada de apio (SAGAR, 1999) y, de acuerdo con Contijoch (1998), este cultivo se encuentra dentro de los 20 cultivos que se exportan; además, no se cuenta con información local para el manejo de la fertilización nitrogenada. Al cumplirse

con los objetivos planteados en el presente experimento, se contará con información preliminar acerca del patrón de absorción nutrimental en fertirriego para este cultivo, la cual deberá confirmarse posteriormente. Esta información proveerá el medio para aplicar el fertilizante nitrogenado al cultivo del apio basado en sus necesidades reales en un tiempo dado, obteniéndose con ello un alto rendimiento con poco o ningún impacto sobre el ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP), Celaya, Guanajuato, México, de enero a junio de 2000. Se ubica a 20° 37' N y 101° 24' O, a una altitud de 1750 m. El clima de la zona es seco con lluvias en verano y, de acuerdo con García (1988), es del tipo BS1hw(w)(e), con una precipitación media de 600 a 700 mm y una temperatura media anual de 19 °C. El experimento se estableció en un Vertisol, en el cual los primeros 30 cm de profundidad se caracterizaron por tener 44.8 % de arcilla del tipo expandible; una densidad aparente de 1.28 Mg m⁻³; pH de 7.7; conductividad eléctrica de 0.91 S m⁻¹; 1.6 % de materia orgánica; 4.8 mg kg⁻¹ de P asimilable Bray-1; 2.2, 29.0, 4.8 y 2.5 cmol kg⁻¹ de K, Ca, Mg y Na intercambiables (en acetato de amonio); 6.9, 1.2, 13.5 y 3.2 mg kg⁻¹ de Fe, Cu, Mn y Zn, respectivamente, extractables con DTPA, y 32. mg kg⁻¹ de N-NO₃; además, se incorporaron un mes previo al trasplante 15.7 Mg ha⁻¹ de rastrojo de maíz en los primeros 20 cm de profundidad. Se usó semilla de apio de la variedad Starlet (*Apium graveolens* var. Dulce L.) usada en la zona del Bajío, la cual en su estado de plántula acumuló 787 grados día de desarrollo (GDD) y en su estado vegetativo 1398 GDD; para su cálculo se tomó como temperatura base 7 °C (Lorenz y Maynard, 1988) y el método para su cálculo fue el propuesto por Stegman (1988). La temperatura media mensual en campo osciló entre 17.5, 20.7, 21.4 y 19.9 °C, en marzo, abril, mayo y junio, respectivamente. Como tratamientos se incluyeron cuatro dosis de fertilización nitrogenada (0, 150, 300 y 500 kg de N ha⁻¹, denominados N0, N1, N2 y N3, respectivamente) con dosis fijas de P y K (80 y 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y K₂O, respectivamente); para su distribución en campo, se empleó un diseño experimental de bloques completamente al azar con

cuatro repeticiones. Cada unidad experimental total tuvo una superficie de 48 m² y la parcela útil 4 m². Como fuentes de fertilizantes, se emplearon superfosfato de calcio triple (46 % P₂O₅), sulfato de potasio (50 % K₂O) y nitrato de amonio (33.5 % de N). El P se incorporó en banda antes del trasplante, el K en cantidades iguales semanalmente y el N también semanalmente de acuerdo con el patrón de absorción encontrado por Feigin *et al.* (1982); estos dos últimos dejaron de aplicarse dos semanas antes de la cosecha. Antes del trasplante, se dio un riego de humedecimiento con una lámina de 62 mm y, una vez transplantado el apio, se aplicó otro riego con una lámina de 16 mm para asegurar el establecimiento de la plántula. El trasplante se realizó a doble hilera, el 28 de febrero del 2000, con una densidad de población de 100 000 plantas ha⁻¹, con un arreglo topológico de 20 cm entre plantas y 20 cm entre hileras (tres bolillo); la cosecha de la parcela útil se realizó el 15 de junio de 2000. A lo largo del experimento, se manejó una tensión de humedad entre 10 a 20 kPa, con una lámina final acumulada de 423, 445, 445 y 459 mm, para N₀, N₁, N₂ y N₃, respectivamente. Las variables evaluadas incluyeron: rendimiento total (peso fresco total de biomasa aérea), rendimiento comercial, materia seca total de biomasa aérea (MSBA), peso fresco por planta a la cosecha, extracción de nutrimentos por la MSBA e índice de área foliar. Con la MSBA y la concentración de nutrimentos en ésta (N_{total}, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn), se calculó el patrón de absorción nutrimental y la cantidad total de nutrimentos extraídos por la MSBA producida por el cultivo. Para la determinación del patrón de absorción, el muestreo de la MSBA se realizó a 29, 59, 78, 92 y 109 días después del trasplante (DDT), en el Tratamiento N₂; para ello, se cosechó un área de 1 m² y para evaluar el rendimiento total y comercial y la MSBA, se cosechó un área de 4 m². Las plantas cosechadas se lavaron por 30 s, se secaron a 70 °C hasta peso constante, se molieron en un molino de cuchillas de acero inoxidable con un tamiz de malla número 40 y se determinó la concentración de los nutrimentos ya mencionados. La determinación de N_{total} se realizó mediante digestión semi-microkjeldahl modificada para incluir NO₃⁻ (Bremner, 1982). La determinación de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn se realizó mediante una digestión húmeda con una mezcla de HNO₃ y HClO₄ (CSTPA, 1980). El análisis de varianza de las variables rendimiento total y comercial, peso fresco por planta, MSBA y extracción de N se realizó con el empleo de

un diseño estadístico de bloques al azar con cuatro repeticiones y para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey; además, el patrón de absorción de N (con referencia a DDT y GDD) se obtuvo a partir de probar varios modelos (exponencial, Cate-Nelson, cuadrático y raíz cuadrada) y, finalmente, se ajustó un modelo exponencial con el método de Gauss por el procedimiento no lineal (NLIN) del programa SAS (Statistical Analysis System, 1996). El criterio de bondad para seleccionar el mejor modelo fue con base en el menor cuadrado medio del error (CME). El modelo de regresión con referencia a los GDD, se genera primeramente dividiendo éstos entre 10; por lo que, al usar este modelo, se dividen los GDD entre 10 para hacer los cálculos respectivos de la absorción de N.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados indican que el cultivo respondió favorablemente a la fertilización nitrogenada. Esto concuerda con las diferencias significativas ($P < 0.05$), encontradas entre tratamientos (Cuadro 1) y lo reportado por Stark *et al.* (1982). En el Cuadro 1, se observa que el rendimiento comercial en el Tratamiento N₀ supera la media nacional del rendimiento promedio de 30 Mg ha⁻¹ (SAGAR, 1999), aunque las plantas de este tratamiento no tenían la calidad que debe tener una planta de apio para el mercado de acuerdo con el criterio de Post (1986). Este rendimiento es el resultado de la incorporación de 15.7 Mg ha⁻¹ rastrojo de maíz, responsables de la inmovilización del N mineral del suelo [32.6 mg N-NO₃ kg⁻¹, equivalentes a 85.5 kg N mineral ha⁻¹, tomando en consideración una eficiencia de uso de 0.7 (Tisdale *et al.*, 1993)], el cual no fue suficiente para que se llevara a cabo la mineralización de este residuo agrícola sin la inmovilización del N mineral. De acuerdo con Galvis (comunicación personal), con la cantidad de N mineral presente, no deberían de haberse incorporado más de 8.8 Mg ha⁻¹ de rastrojo de maíz, por lo que al aplicar 15.7 Mg ha⁻¹ hubo un déficit de N mineral y, por lo tanto, inmovilización de éste. Esto está respaldado por el hecho de que las bacterias construyen su protoplasma celular con ocho a 10 moléculas de carbono por cada molécula de N; por lo tanto, al no existir suficiente N para el proceso de síntesis celular, los microorganismos recurren al N del suelo reduciendo las reservas de éste (Tisdale *et al.*, 1993). La cantidad inicial de 32.6 mg N-NO₃ kg⁻¹

Cuadro 1. Rendimiento total y comercial, materia seca total en biomasa aérea, extracción de N y peso fresco por planta, en los diferentes tratamientos de fertilización evaluados en el cultivo del apio (*Apium graveolens* var. Dulce) de la variedad Starlet en fertirriego (ciclo primavera 2000).

Variable	kg N ha ⁻¹			
	0	150	300	500
	----- Mg ha ⁻¹ -----			
Rendimiento total	106.65 c ^a	160.55 b	182.45 ab	189.85 a
Rendimiento comercial	38.82 b	110.12 a	124.25 a	123.50 a
Materia seca total de biomasa aérea	6.52 b	13.36 a	14.03 a	13.37 a
	----- kg ha ⁻¹ -----			
Extracción de N	144.23 c	323.62 b	365.78 a	396.81 a
	----- kg planta ⁻¹ -----			
Peso fresco por planta	0.388 b	1.101 a	1.242 a	1.235 a

^a Medias dentro de filas con la misma letra, son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

en los primeros 30 cm de profundidad, donde se desarrolla el sistema radical del cultivo de apio (Espinosa *et al.*, 1993), equivaldría a 122 kg ha⁻¹ de N mineral y la cantidad de N incorporada por la aplicación del rastrojo de maíz equivaldría alrededor de 110 kg de N, lo que da un total de 232 kg ha⁻¹, considerando una eficiencia de uso de 0.8, bajaría a 186 kg de N ha⁻¹ que al parecer estuvieron disponibles al final del ciclo vegetativo del cultivo, esto de acuerdo con el crecimiento que tuvo el Tratamiento N0 en este tiempo.

El experimento se condujo con fertirriego, donde se aplican los fertilizantes a través de riego por goteo; los agricultores con sólo la adopción del riego por goteo aumentaron su producción (Hochmuth y Clark, 1991). Stark *et al.* (1982) observaron que conforme el cultivo de apio contó con una cantidad mayor de N, éste aceleraba su crecimiento y lograba más rápido su madurez, en tanto que las plantas que tenían acceso a una cantidad menor de N retrasaron su ciclo. Estos autores recomendaron que donde los ciclos de cultivo fueran más largos, podría aplicarse menor cantidad de fertilizante nitrogenado, evitando con ello gastos innecesarios y daños al ambiente por la contaminación de los acuíferos por la lixiviación de nitratos. El N-NO₃⁻ residual fue de 9.9, 25.2 y 41.0, para N1, N2 y N3, respectivamente, aumento que corrobora la importancia de no aplicar cantidades superiores a las demandadas por el cultivo.

El rendimiento total aumentó con la dosis de fertilización nitrogenada (Cuadro 1); en contraste, no sucedió lo mismo con el rendimiento comercial, la producción de MSBA y el peso fresco por planta a la cosecha; al parecer, el Tratamiento N3 representó un suministro excesivo de N, afectando estas variables (Stark *et al.*, 1982; Engels y Marschner, 1995). La

extracción de N fue ascendente con el incremento de la dosis de fertilización nitrogenada, por el mayor contenido de N en la MSBA (Feigin *et al.*, 1982); esta misma situación se observó en los micronutrientes Cu, Mn y Zn (Cuadro 2). Al analizar la eficiencia del uso del fertilizante nitrogenado [método de la diferencia (Van Cleemput y Hera, 1996)] se encontraron eficiencias de 119.6, 73.9 y 50.5 %, para los Tratamientos N1, N2 y N3, respectivamente. Fue notorio que al aumentar la dosis de N, disminuyó la eficiencia del uso del fertilizante; esto concordó con los resultados de Russelle *et al.* (1981), quienes reportaron que cuando la dosis de fertilización nitrogenada se aproxima al óptimo para el buen desarrollo del cultivo, los efectos sobre el rendimiento son menores, ya que con las dosis más bajas se obtienen las eficiencias de recuperación más altas.

Osaki *et al.* (1993) mencionaron que el incremento en N aumentó la cantidad de N absorbido, pero no la acumulación de biomasa, situación que se observó también en el presente experimento

Cuadro 2. Extracción de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn, en los tratamientos de fertilización evaluados en el cultivo del apio (*Apium graveolens* var. Dulce) de la variedad Starlet en fertirriego (ciclo primavera 2000).

Nutriente	kg N ha ⁻¹			
	0	150	300	500
	----- kg ha ⁻¹ -----			
P	25.58	56.30	66.03	57.55
K	223.66	486.64	642.02	526.01
Ca	316.14	608.63	637.81	618.36
Mg	35.42	89.82	95.53	85.66
Fe	2.30	6.11	7.01	6.40
Cu	0.45	1.30	1.29	1.56
Mn	0.62	1.49	1.52	1.97
Zn	0.26	0.60	0.57	0.59

Cuadro 3. Índice de área foliar en los diferentes tratamientos de fertilización evaluados en el cultivo de apio (*Apium graveolens* var. Dulce) de la variedad Starlet en fertirriego (ciclo primavera 2000).

Tratamiento	DDT/GDD [†]		
	57/663	78/976	95/1218
kg N ha ⁻¹			
0	1.08	1.27	2.26
150	1.34	2.24	3.09
300	1.55	2.39	3.33
500	1.65	2.67	3.37

[†] DDT = días después del transplante; GDD = grados día de desarrollo.

(Cuadro 1). En cuanto a los nutrientes P, K, Ca y Mg, su concentración fue mayor en N2 que en N3 (Cuadro 2); al parecer, el suministro de N en N3 promovió la deficiencia de estos nutrientes, limitando el crecimiento del cultivo (Engels y Marschner, 1995), esto con relación al rendimiento comercial y MSBA.

La medición del índice del área alrededor de la mitad del ciclo vegetativo indica una diferencia notoria entre los tratamientos de fertilización, diferencia que disminuye con el tiempo, en los Tratamientos N1, N2 y N3 a 95 DDT (Cuadro 3), lo cual corroboró que las plantas con mayor fertilización

de N se desarrollaron más rápido (Stark *et al.*, 1982). Finalmente, respecto al patrón de absorción de N encontrado en el presente experimento, se observó una baja absorción de este nutriente en la primera mitad del ciclo vegetativo, así como de los demás nutrientes (analizados sólo como un punto de referencia).

De hecho, a la mitad del ciclo vegetativo del cultivo, la absorción de N fue del orden de 13 %, a partir del cual empezó a incrementarse su absorción, de tal forma que aproximadamente en los últimos 30 días previos a la cosecha (últimos 407 GDD acumulados), se alcanzó 50 % de la absorción (Figuras 1 y 2). Esto concuerda con Hartz (1994), quien señaló que cultivos como el apio, que no fructifican, mostraron baja absorción de N durante la primera mitad del ciclo de desarrollo y, a partir de ella, se incrementa la demanda por este nutriente hasta poco antes de realizarse la cosecha; esto mismo se observó en el presente experimento, alcanzándose sólo 13 % de la absorción de N en la primera mitad del ciclo vegetativo y sólo 2 % de N se absorbió en los últimos cuatro días del ciclo de cultivo. Lo encontrado en el presente experimento difiere de lo observado por Zink (1963), quien encontró que 50 % del peso fresco

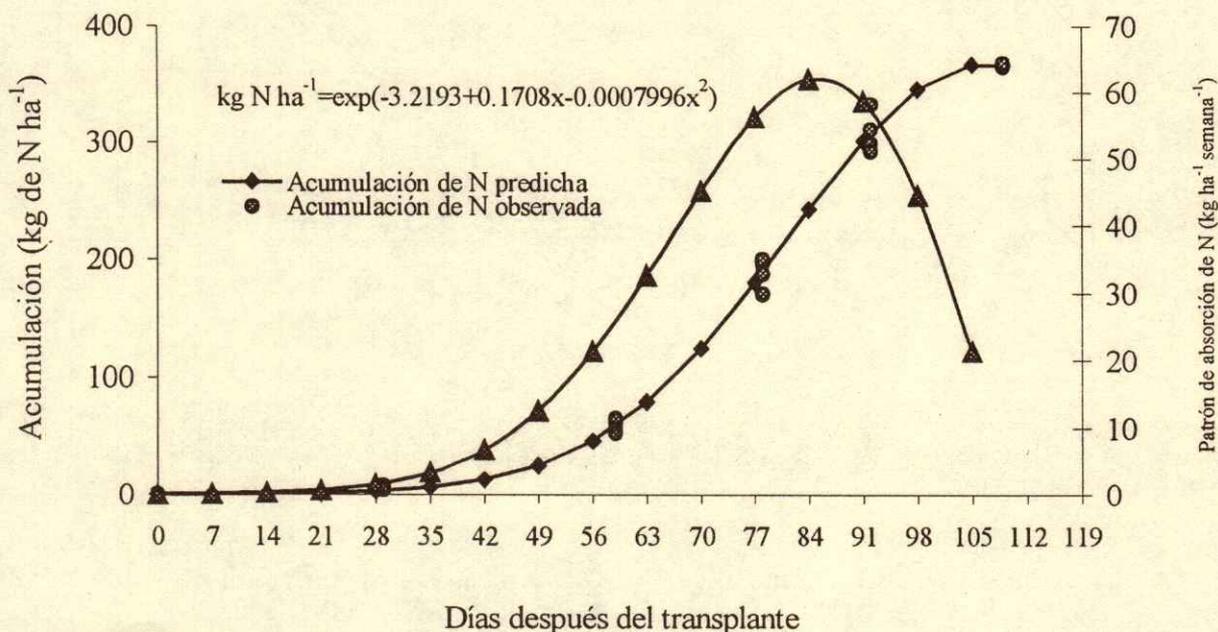


Figura 1. Acumulación y patrón de absorción de nitrógeno en apio (*Apium graveolens* var. Dulce) de la variedad Starlet en fertirriego (ciclo primavera 2000), con base en días después del transplante.

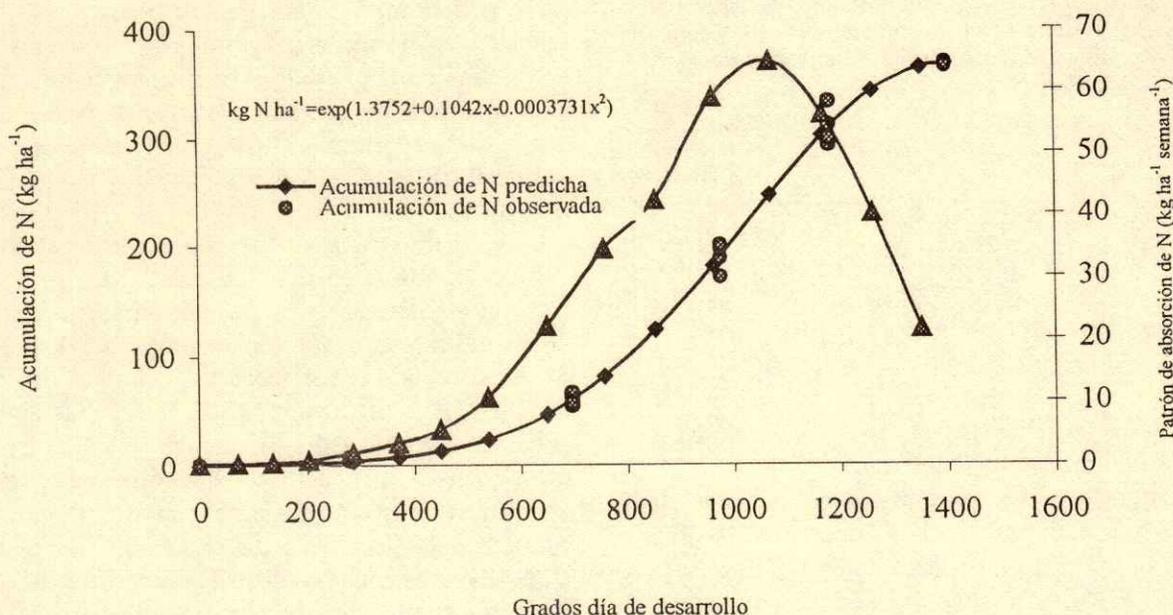


Figura 2. Acumulación y patrón de absorción de nitrógeno en apio (*Apium graveolens* var. Dulce) de la variedad Starlet en fertirriego (ciclo primavera 2000), con base en Grados día de desarrollo.

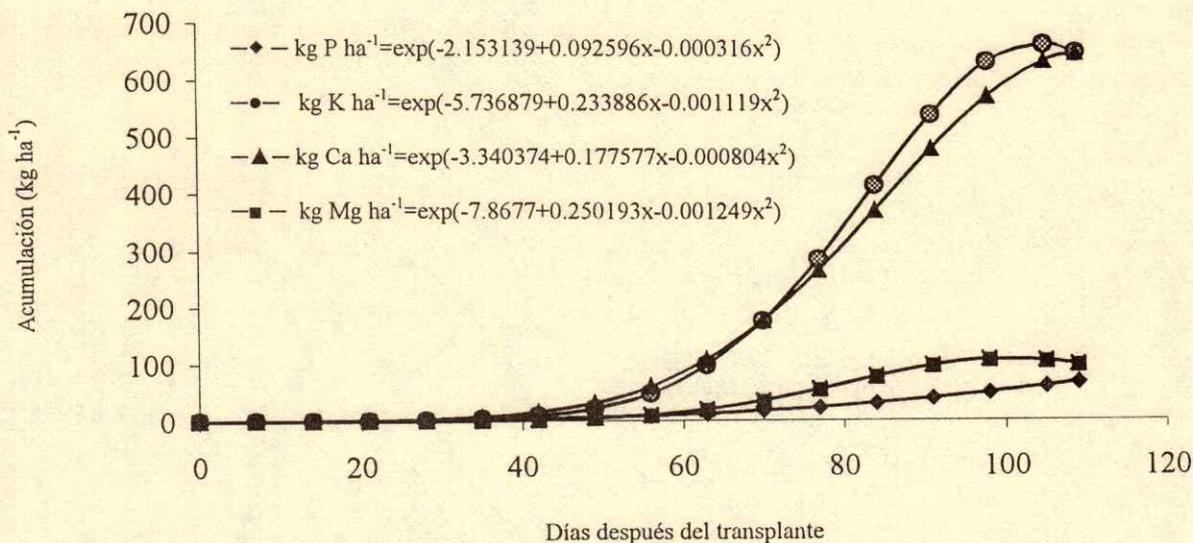


Figura 3. Acumulación de P, K, Ca y Mg en el cultivo de apio (*Apium graveolens* var. Dulce) de la variedad Starlet en fertirriego (ciclo primavera 2000).

del cultivo (PFC) se produjo en 21 días previos a la cosecha, en tanto que Espinosa *et al.* (1993) observaron que aproximadamente 70 % del PFC se alcanza en dos a tres semanas previas a la cosecha. Estas diferencias pudieran deberse a condiciones

ambientales diferentes, esto referido a la acumulación de las unidades calor (Cannell *et al.*, 1963) o GDD por el cultivo, por lo que la adopción de los GDD podría ser una opción al considerarse las variaciones de temperatura en el tiempo y en el espacio. La Figura 1

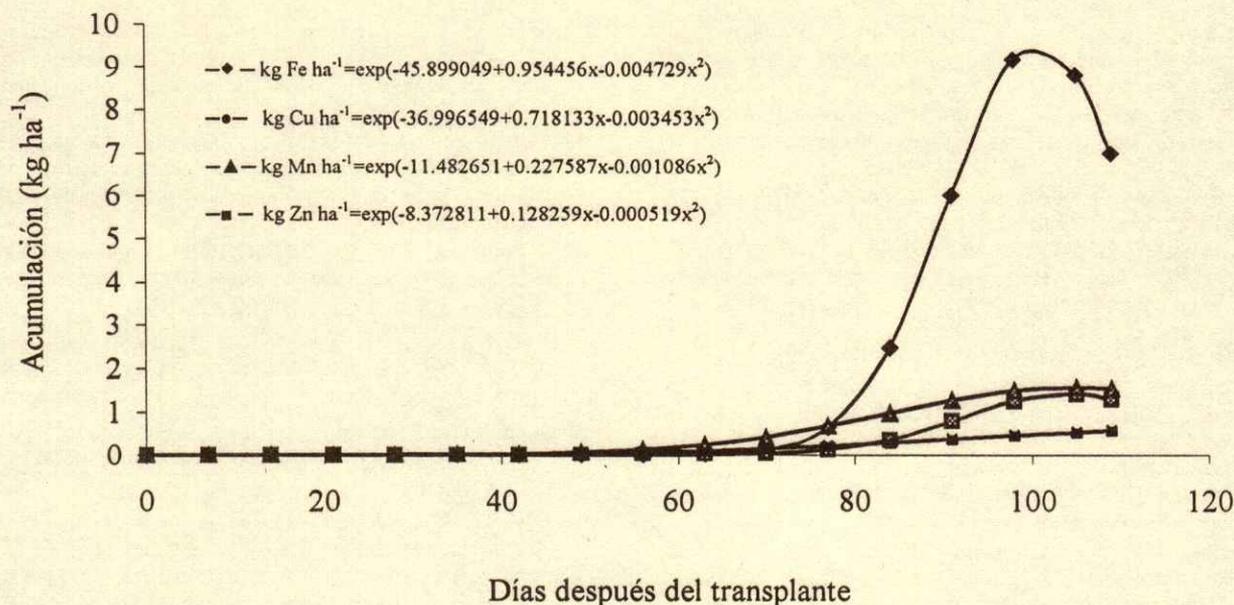


Figura 4. Acumulación de Fe, Cu, Mn y Zn en el cultivo de apio (*Apium graveolens* var. Dulce) de la variedad Starlet en fertirriego (ciclo primavera 2000).

muestra el mejor modelo de regresión que se ajustó a la acumulación de N encontrado en el presente experimento, tomando como referencia a los DDT y en la Figura 2 tomando como referencia a los GDD. Ambos modelos generados con DDT y GDD tuvieron el menor CME que los otros modelos probados, aunque el modelo generado a través de los GDD tuvo aún un menor CME y valores predichos más cercanos a los observados, por lo que de manera preliminar este modelo pudiera ser adoptado para planear los programas de aplicación de fertilizantes nitrogenados a través del fertirriego, al considerar que los GDD están con base en la temperatura media, la cual varía en tiempo y espacio (Stegman, 1988). En las Figuras 3 y 4, se presentan las curvas de acumulación y los modelos de regresión que mejor se ajustaron a dichas curvas de los diferentes nutrientes analizados, los cuales pudieran, como en el caso del N, considerarse en forma preliminar como referencia en el cultivo de apio en fertirriego. Además, debe tenerse presente la eficiencia de recuperación del N y la cantidad de N mineral presente en el suelo (Neeteson, 1995) al inicio del cultivo.

CONCLUSIONES

Los programas de aplicación de fertilizantes nitrogenados a través del fertirriego en apio (*Apium*

graveolens var. Dulce) de la variedad Starlet, deben considerar que la mayor parte de la absorción del N se da en 30 días previos a la cosecha o después de 990 GDD. Además, el modelo de regresión que se ajustó a la acumulación de este nutriente (tomando en consideración los DDT o los GDD), encontrado en el presente experimento y a través del cual se obtuvo el patrón de absorción de N, en forma preliminar puede tomarse como referencia para planear los programas de fertirriego para la aplicación de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de apio, tomando en consideración el coeficiente de eficiencia de recuperación del N y la cantidad de N mineral presente en el suelo antes del cultivo.

LITERATURA CITADA

- Bar-Yosef, B., C. Stammers y B. Sagiv. 1980. Growth of tomato as related to rooting volume and uptake of N and water. *Agron. J.* 72: 815-822.
- Bremner, J.M. 1982. Total nitrogen. pp. 1149-1178. In: C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part. 2. Agronomy 9.* American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Cannell, G.H., K.B. Tyler y F.H. Takatori. 1963. Growth measurements of celery in relation to yield. *Am. Soc. Hort. Sci.* 83: 511-518.
- CSTPA. 1980. Handbook on reference method for soil testing. The Council on Soil Testing and Plant Analysis. Athens, GA.
- Engels, C. y H. Marschner. 1995. Plant uptake and utilization of nitrogen. pp. 41-82. In: P.E. Bacon (ed.). *Nitrogen*

- fertilization in the environment. Woodlots & Wetlands Pty. Sydney, New Wales, Australia.
- Espinosa, L., C.A. Sánchez y T.J. Schueneman. 1993. Celery yield response to phosphorus rate but not phosphorus placement on Histosols. *HortScience* 28(12): 1168-1170.
- Feigin, A., J. Letey y W.M. Jauver. 1982. Nitrogen utilization efficiency by drip irrigated celery receiving preplant or water applied N-fertilizer. *Agron. J.* 74: 978-983.
- García, E. 1988. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. 3a ed. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Hartz, T.K. 1994. Drip irrigation and fertigation management of vegetable crops. Fertilizer Research and Education Program. Calif. Dept. of Food and Agriculture. Sacramento, CA.
- Hochmuth, G.J. y G.A. Clark. 1991. Fertilizer application and management for micro (or drip) irrigated vegetables in Florida. Florida Cooperative Extension, Special Series Report. Ss-VEC-45 April, 1991. University of Florida. Gainesville, FL.
- Lorenz, O.A. y D.N. Maynard. 1988. Handbook for vegetable growers. 3th ed. John Wiley. New York.
- Neeteson, J.J. 1995. Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables. pp. 295-325. *In*: P.E. Bacon (ed.). Nitrogen fertilization in the environment. Woodlots & Wetlands Pty. Ltd. Sydney, New Wales, Australia.
- Osaki, M., T. Shimano y T. Tadano. 1993. Effect on nitrogen application on the accumulation of ribulose-1,5 biphosphate carboxylase/oxygenase and chlorophyll in several field crops. *Soil Sci. Plant Nutr.* 39(3): 427-456.
- Post, S.E.C. 1986. Influence of phosphorus and nitrogen on celery. *California Agric.* 40(9-10): 15-16.
- Russelle, M.P., E.J. Deibert, R.D. Hauck, M.S. Stevanovic y R.A. Olsen. 1981. Effects of water N management on yield and ¹⁵N-depleted fertilizer use efficiency of irrigated corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 553-558.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1999. Centro de Estadística Agropecuario. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola (Anuario Agrícola). México, D.F.
- SAS. Statistical Analysis System. 1996. Proprietary Software Release 6.04. Licenced to Colegio de Postgraduados, site 1339 6001. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Stark, J.C., W.M. Jarrel y J. Letey. 1982. Relationships between growth and nitrogen fertilization of celery. *HortScience* 17(5): 754-755.
- Stegman, E.C. 1988. Corn crop curve comparisons for the Central and Northern Plains of the US. *Appl. Eng. in Agric., Am. Soc. Agric. Eng.* 4(3): 226-233.
- Tisdale, S.L. W.L. Nelson, J.D. Beaton y J.H. Havlin. 1993. Soil fertility and fertilizers. 5th ed. MacMillan. New York.
- Van Cleemput, O. y Ch. Hera. 1996. Fertilizer nitrogen use and efficiency in different cropping systems. *Terra* 14: 40-58.
- Zheng, G.S., G.Y. Peng y Q.G. Zhang. 1995. Study on nitrate accumulation in celery with ¹⁵N tracing techniques. *Acta Horticulturae Nucleatae Sinica* 9: 42-46.
- Zink, F.W. 1963. Rate of growth and nutrient absorption of celery. *Am. Soc. Hort. Sci.* 82: 351-357.

IMPACTO DE LA ROTURACIÓN Y DEL MANEJO AGRONÓMICO DE UN TEPETATE SOBRE SU ESTRUCTURA

Impact of Mechanical Fragmentation and Agronomical Management on the Structure of Tepetate

Ch. Prat¹, V. Ordaz Ch.² y J.A. Rugama U.³

RESUMEN

La presión existente sobre la ampliación de la frontera agrícola y los problemas sociales que se presentan en áreas donde los tepetates afloran a la superficie del suelo, aunado a sus limitaciones físicas para uso agropecuario y forestal, han impuesto la necesidad de rehabilitar los tepetates. El presente estudio consistió en un experimento sobre el mejoramiento de las propiedades de un tepetate recién roturado para uso agrícola, en el marco de un programa conjunto entre ORSTOM (ahora IRD) de Francia y el Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, iniciado en 1992 en la comunidad de San Miguel Tlaixpan, municipio de Texcoco, estado de México. El diseño experimental usado fue completamente al azar con tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en: 1) tepetate natural aflorado, 2) tepetate roturado a 60 cm con asociación de cultivos, 3) tepetate roturado a 40 cm con monocultivo, 4) tepetate roturado a 40 cm con asociación de cultivos y 20 t ha⁻¹ año⁻¹ de estiércol, 5) tepetate roturado a 40 cm con asociación de cultivos, 6) tepetate roturado a 40 cm con asociación de cultivos y labranza mínima y 7) un suelo agrícola. Las variables fueron algunas características físicas que permitieron evaluar la evolución de la estructura y otras variables las condiciones biológicas a través de la producción de CO₂. Los resultados mostraron que después de cuatro años de roturado el tepetate, se producen condiciones favorables de estructuración debido a la formación de agregados y fragmentos que aglutinándose aumentan la porosidad. La producción de CO₂ fue mucho mayor en los tepetates trabajados que en los inalterados, esto prueba el desarrollo de las actividades biológicas.

¹ IRD (ex-ORSTOM). BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5, Francia. (prat@mpl.ird.fr)

² Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, México. (ordaz@colpos.colpos.mx)

³ Instituto Nicaraguense de Tecnología Agropecuaria. Esteli-Nicaragua.

Recibido: Julio de 1997. Aceptado: Marzo de 2002.

Publicado en Terra 21: 109-115.

Palabras clave: Evolución estructural, agregados.

SUMMARY

Pressure to open up land to agriculture and the social problems existing in areas where 'tepetates' protrude to the surface of the soil, plus the physical limitations to its use in agriculture and forestry, have made it necessary to rehabilitate these areas. An experiment was conducted to test methods of improving the properties of recently fragmented tepetate for agricultural use. Mechanical fragmentation has been done since 1992 by the French institution ORSTOM (now IRD) and the Colegio de Postgraduados, Montecillo, Mexico, in the community of San Miguel Tlaixpan, municipality of Texcoco, state of Mexico. The experimental design used was completely random with three replications. The treatments were 1) natural, protruded tepetate, 2) tepetate mechanically fragmented at a depth of 60 cm and cultivated with crops in association, 3) tepetate mechanically fragmented at 40 cm cultivated with a single crop, 4) tepetate mechanically fragmented at 40 cm with monoculture in association and fertilized with manure 20 t ha⁻¹ yr⁻¹, 5) tepetate mechanically fragmented at 40 cm cultivated under crops in association, 6) tepetate mechanically fragmented at 40 cm cultivated with crops in association with minimum tillage, and 7) farm land. The variables used were physical characteristics and production of CO₂. The results showed that after four years of mechanical fragmentation, bulk density was reduced by aggregate formation and improved porosity resulting from agglutination of fragments. The production of CO₂ was higher in worked tepetates than in those that were unaltered, thus making biological activity evident.

Index words: Structural evolution, aggregates.

INTRODUCCIÓN

En el centro de México, existen horizontes endurecidos de origen volcánico llamados "tepetates",

de la raíz Náhuatl tepetlatl; tetl: piedra y petatl: petate, connotativo etimológico de cama o petate de piedra (Simeon, 1887). Se encuentran desde la superficie hasta varios metros de profundidad, con un espesor de unos centímetros hasta varios metros. Están presentes en varios países de América Latina, en zonas de laderas de sierras volcánicas, pero se conocen con otros nombres (talpetate en Nicaragua, cangahua en Colombia y Ecuador).

En México, se estima que existen aproximadamente 4 millones de ha de tepetates (Zebrowski, 1992). Estos afloran principalmente en las faldas de la Sierra Nevada, en los estados de México, Tlaxcala y Puebla, y otra parte en los estados circunvecinos de Hidalgo, Querétaro y Morelos (Servenay y Prat, 2000). En estas áreas también se presenta la mayor densidad poblacional del país y, por consecuencia, ocurren graves conflictos sociales por la escasez de tierras de cultivo. Los usuarios de estos suelos frecuentemente abandonan sus parcelas agrícolas y emigran a las ciudades en busca de otras alternativas de empleo.

Desde el punto de vista agrícola, los tepetates presentan diversas limitantes edafológicas, en las que destacan su dureza, la baja cantidad de poros de tamaño medio y grandes, el bajo contenido de materia orgánica y de N, así como la baja actividad biológica que limitan su capacidad agropecuaria y forestal (Peña y Zebrowski, 1992a). Sin embargo, durante las dos últimas décadas, organismos nacionales e internacionales han implementado diversas prácticas de recuperación de tepetates con el fin de incorporarlos a las actividades productivas.

El presente estudio es parte de un experimento de conservación y mejoramiento de las condiciones agrícolas de un tepetate recién roturado para el control de la erosión con terrazas de "dimensión campesina". Dicha experimentación se llevó a cabo de 1992 hasta 1996, en el marco del programa "Rehabilitación y conservación de los suelos volcánicos de América Latina (Chile, Ecuador, México)" que fue co-financiado por la Unión Europea. El ORSTOM (ahora, IRD), Francia y el Colegio de Postgraduados, México, fueron las dos principales instituciones involucradas en este programa para el valle oriental de México.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la transformación de algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de un tepetate, después de cuatro años de roturación y de diferentes prácticas agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la parte este de la cuenca del río Coxacoaco, en tierras prestadas por la comunidad de San Miguel Tlaixpan, municipio de Texcoco, estado de México, entre los paralelos 19° 29' 53" N y 98° 47' 55" O, a una altitud de 2555 m. El clima es templado sub-húmedo, con un régimen higro-térmico ustic-isomesic, de tipo C(w1)(w) según la clasificación de Köppen, modificada por García (1981). La temporada de lluvia se extiende de mayo a octubre. La precipitación media anual es de 650 mm, el régimen de lluvias es altamente variable de 400 a 750 mm año⁻¹ (Prat, 1997). La temperatura promedio es de 10 °C.

El sitio experimental es una zona erosionada con afloramientos de varios tipos de tepetates. Las secuencias y perfiles, estudiados por Miehlich (1984) y Peña y Zebrowski (1992b), mostraron que se trata de una sobreposición de depósitos volcánicos de edad y composición diferentes. El horizonte superficial (0 a 30 cm) que constituye el suelo cultivado y de referencia en nuestras experimentaciones (Tratamiento 7) es un depósito eólico-coluvial arenoso-limoso del Holoceno, cubriendo un Paleosuelo vértico (30 a 70 cm) del Holoceno inferior de la serie T2 (30 a 200 cm), el cual cubre, a su vez, las series T3 (200 a 460 cm) y T4 (> 460 cm). El tepetate estudiado aquí es el t3 de la serie T3 y es el que cubre la mayor superficie de la región. Este tepetate corresponde a una toba andesítica que localmente puede presentar depositaciones de carbonatos en las fisuras (Oleschko *et al.*, 1992).

Desde un punto de vista edáfico, el suelo es un Phaeozem vertic o haplic, mientras que el tepetate t3 es un fragipan a tendencia calcárica, clasificado como Leptosol lítico, según el sistema propuesto por la FAO-UNESCO (1988), (Peña y Zebrowsky, 1992b). Localmente se conoce como tepetate amarillo, su textura es migajón arenoso, con estructura columnar fuertemente desarrollada que al romperse origina bloques gruesos extremadamente duros (Ortiz y Cuanalo, 1977).

Diseño Experimental y Diseño de Tratamientos

En 1996, cuatro años después del inicio de la habilitación agrícola del tepetate t3, se realizaron las mediciones del impacto de las prácticas de recuperación y del manejo del tepetate en su desarrollo estructural. Se utilizó un diseño

experimental completamente al azar, con tres repeticiones. Las evaluaciones se efectuaron en cada capa de 15 cm de profundidad hasta llegar al tepetate no alterado; los resultados que se presentan aquí corresponden sólo a la capa superficial de 0 a 15 cm. El diseño de tratamientos se describe en el Cuadro 1. En seis de los tratamientos (Tratamientos 2 al 7), los residuos de cosecha se reincorporaron a la parcela.

Variables Analizadas

Variables químicas. El pH se midió en suspensión de una relación 1:2 suelo-agua.

La materia orgánica se determinó por el método propuesto por Walkley y Black, modificado por Walkley (1947).

La producción de CO₂ se determinó en muestras de cada tratamiento, incubadas durante 36 días a capacidad de campo, según la metodología descrita por Ordaz (1995). Dicha producción es usada como indicador de la actividad microbiana del suelo.

Variables físicas. Densidad aparente (Da) y real (Dr); el método empleado para medir la Da fue el del cilindro de volumen conocido (Blake y Hartge, 1986). La Dr se determinó por el método del picnómetro (Forsythe, 1975).

Espacio poroso total (Pt). A partir de los datos obtenidos de Da y Dr, se calculó el espacio poroso total (Pt).

Distribución de agregados en seco y en húmedo. La distribución del tamaño de los agregados se evaluó utilizando el método propuesto por Yoder (1936), descrito por Kemper y Rosenau (1986). En seco, se colocó una muestra de 1 kg en una columna de tamices y, utilizando un vibrador mecánico, se cribó hasta obtener la proporción por tamaños en cada

tamiz. Las aperturas de las mallas fueron: 50.8, 31.7, 22.2, 11.5, 6.4, 2.4, 2.0 y < 2.0 mm de diámetro equivalente.

Estabilidad de los agregados. Se determinó por la técnica del cribado en húmedo, con los tamices de la misma dimensión de malla que en la prueba de distribución en seco.

El cálculo de los índices de agregación en seco y en húmedo se hizo a partir del porcentaje de agregados retenidos en cada tamiz. Los índices de agregación corresponden al diámetro medio ponderado (DMP):

$$DMP = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i$$

Donde: DMP = diámetro medio ponderado (mm); w_i = proporción del peso de la muestra retenida en el tamiz correspondiente (%); \bar{x}_i = promedio del diámetro de abertura del tamiz correspondiente a cada fracción (mm).

Constantes de humedad. La capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP) y punto de saturación (PS) se realizaron con la olla y membrana de presión, y se utilizaron muestras tamizadas a 2 mm.

La conductividad hidráulica (K) se determinó en el laboratorio, para lo cual se usó el método del permeámetro de carga constante (Loveday, 1974) y se aplicó la ley de Darcy.

La velocidad de infiltración (I) se determinó usando el método del infiltrómetro de doble cilindro. Con la información de infiltración registrada en el campo, se construyó un modelo de acuerdo con la ecuación de Kostiakov (1932):

$$I = Kt^n$$

Cuadro 1. Diseños de tratamientos.

Tratamiento	Área m ²	Roturado		Profundidad - - - cm - - -		Descripción de los tratamientos				Labranza mínima		
		si	no	40	60	Asociación de cultivos		Estiércol - 20 t ha ⁻¹ año ⁻¹ -		si	no	
1	1800		X									
2	400	X			X	C+Md						X
3	700	X		X			X					X
4	700	X		X		C+Md		X				X
5	700	X		X		M+H			X			X
6	700	X		X		M+H			X	X		
7	700		X			C+Md						

Los Tratamientos 1 a 6 se establecieron en tepetate; el Tratamiento 7 consistió en un suelo agrícola. M = maíz; C = cebada; Md = *Medicago* sp.; H = haba.

Donde: I = velocidad de infiltración (cm h^{-1}); K = parámetro que presenta la cantidad de infiltración durante el intervalo inicial, t = tiempo (h), n indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo.

Evaluación estadística. El análisis efectuado a las variables evaluadas se apoyó con análisis de varianza y prueba de medias de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los sitios estudiados tienen un pH neutro a ligeramente alcalino (Cuadro 2). La materia orgánica (MO) está casi ausente en el tepetate natural y es muy baja en los tratamientos de tepetate cultivado, salvo en el tratamiento donde se añadió estiércol (Tratamiento 4). Sin embargo, es preciso notar que en cuatro años de cultivo, sólo con la reincorporación de los residuos de cosecha (rastros), se logró triplicar el contenido de MO en el suelo, llegando casi al mismo valor que en el suelo de referencia (Tratamiento 7).

En la Figura 1, se presentan los resultados de la producción acumulada de CO_2 , considerada como indicador de la actividad biológica de los tratamientos evaluados. Los resultados mostraron diferencias importantes entre los tratamientos evaluados. En el tepetate natural (Tratamiento 1), la producción de CO_2 fue menor que en el resto de los tratamientos. En los tratamientos de tepetate cultivado y el suelo natural, la producción de CO_2 fue similar. Esto demuestra el desarrollo extremadamente rápido de la actividad biológica (manifestación de vida) en los tepetates, lo que coincide con los resultados obtenidos por Ferrera (1992) y Ferrera *et al.* (1997). La mayor producción acumulada de CO_2 se presentó en el Tratamiento 4, lo

que indica que después de cuatro años de aplicación de abono, esto indujo un efecto modificador de los patrones de respiración, siendo mayor que en los tratamientos donde no recibieron materia orgánica.

Considerando que la Da es una de las propiedades físicas del suelo, dinámica en el tiempo y de alta variación en el espacio, tanto en el sentido horizontal como vertical, se estima que los resultados obtenidos de esta variable muestran el grado de evolución estructural debido al manejo del tepetate (Cuadro 2). El Tratamiento 1, que consistió en un tepetate inalterado, presentó el valor más alto de Da (1.50 Mg m^{-3}), esto coincide con los rangos de Da reportados por Quantin *et al.* (1993). Los valores obtenidos en el resto de los tratamientos, que consistieron en tepetate roturado, presentaron valores que fluctuaron de 1.07 a 1.17 Mg m^{-3} , lo que indica una disminución de un tercio de la Da del material original. Esta situación se debe a la roturación del material.

Referente a la Dr, los valores encontrados de 2.47 Mg m^{-3} , en promedio, corroboran la naturaleza de un mismo material propio de los tepetates, en contraste con el valor del suelo agrícola (Tratamiento 7) que resultó con una Dr de 2.6 Mg m^{-3} .

En relación con la porosidad total (Cuadro 2), los valores más altos se presentaron en los Tratamientos 3, 4 y 6, los cuales superaron 26 %, en promedio, la porosidad total existente en el tepetate no trabajado (Tratamiento 1, Pt = 44 %); este valor coincide con los reportados por Quantin *et al.* (1993), quienes mencionaron valores promedio de porosidad total de 45 % para tepetates no trabajados. Los tratamientos establecidos en tepetates roturados presentaron una porosidad total más alta (1 a 10 %) en relación con la del Tratamiento 7.

Cuadro 2. Resultados del análisis de algunas propiedades químicas y físicas, en el estrato 0 a 15 cm de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	pH 1:2	MO [†] %	Densidad aparente Mg m ⁻³	Densidad real Mg m ⁻³	Porosidad total %	CC %	PMP %	PS %
1	7.6 a	0.32 g	1.50 a	2.47 a	44	32 a	22 a	41 a
2	7.2 ab	1.11 f	1.14 bc	2.48 a	54	30 a	17 a	47 a
3	7.3 ab	1.46 d	1.07 c	2.48 a	57	33 a	19 a	49 a
4	7.2 ab	2.52 a	1.17 bc	2.47 a	55	32 a	19 a	48 a
5	7.3 ab	1.58 c	1.14 bc	2.45 a	52	32 a	21 a	45 a
6	7.2 ab	1.33 e	1.13 bc	2.46 a	55	31 a	17 a	50 a
7	6.6 b	1.75 b	1.25 b	2.60 b	52	20 b	11 b	42 a

* Promedio de tres repeticiones. Letras iguales son estadísticamente iguales (Tukey) con ($\alpha = 5\%$).

† MO = materia orgánica; CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; PS = punto de saturación.

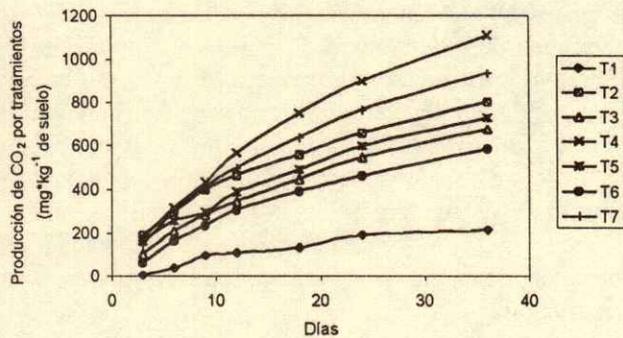


Figura 1. Producción acumulada de CO₂ en función de cada tratamiento.

Con respecto a la distribución del tamaño de fragmentos y agregados en seco, el tepetate no roturado (Tratamiento 1) fue el que presentó las más altas proporciones de los diámetros grandes, en comparación con los demás ensayos. Eso se debe a la compacidad del material natural, en contraste con el material del tepetate roturado que inclusive se llegaron a formar agregados. Es interesante notar que los tratamientos de tepetate roturado (Tratamientos 2 a 6) presentaron una distribución de tamaño de agregados bastante similar a la del suelo de referencia (Tratamiento 7), cuando en realidad se trata de un sustrato con características diferentes.

De acuerdo con Lauffer *et al.* (1997), los agregados de 2 a 4.8 mm de diámetro son considerados como los agregados de tepetates más estables y resistentes a la erosión. Justamente, fue en estos rangos y ampliado hasta 11.5 mm, que no se presentaron diferencias entre los tratamientos, lo que corrobora la resistencia a la erosión de estos fragmentos.

El análisis estadístico efectuado con el porcentaje de agregados por diámetro mostró diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) entre el tepetate no roturado (Tratamiento 1) y los demás ensayos para los diámetros superiores a 2 mm; el Tratamiento 1 presentó el valor más alto. Al inverso, con los diámetros inferiores a 2.4 mm, el tepetate natural presentó menor proporción de agregados de este tamaño que los demás tratamientos. Entre estos dos extremos, no se notan diferencias estadísticas entre los tratamientos para los diámetros de 2.4 hasta 11.5 mm.

La estabilidad de los agregados en agua del estrato 0 a 15 cm, en todos los casos, la mayor proporción correspondió a los agregados de un diámetro superior o igual a 3.25 mm. El Tratamiento 1 presentó el valor

más alto (78 %) de agregados mayores que 3.25 mm, seguido por el Tratamiento 4 (68 %) donde se añadió estiércol a la parcela; las demás parcelas mostraron proporciones menores que 55 %.

La proporción de agregados pequeños (< 0.15 mm) estables en agua fue menor en los Tratamientos 1 y 4 (4 y 9 %, respectivamente) y relativamente similares (< 15 %) para los demás tratamientos.

Estas proporciones se confirman con los datos del diámetro medio ponderado (DMP). Los resultados fueron bastante similares entre tratamientos, aunque el Tratamiento 4 presentó el valor más alto (2.4 mm). De acuerdo con la escala propuesta por Montenegro y Malagón (1990), se consideran como moderadamente estables.

Una observación minuciosa de la distribución de agregados, en seco o en húmedo, mostró que una gran proporción no son agregados sino pequeños fragmentos "masivos" de tepetate y, por lo tanto, bastante estables. Estas observaciones coinciden con las realizadas por Fechter-Escamilla y Flores (1997), Velázquez (1997) y Báez *et al.* (2001).

Estos resultados muestran que, a pesar de los años, la agregación es lenta en condiciones de cultivo sin mayor aporte de MO en el tepetate roturado. En un trabajo sobre los micro-agregados con estos mismos suelos, Barthés *et al.* (2000) llegaron a las mismas conclusiones sobre la función de la MO y la estabilidad de los micro-agregados, generando una relación lineal entre estos parámetros, así como entre micro agregados y tasa de erosión anual.

Los resultados de capacidad de campo (CC) y de punto de marchitez permanente (PMP) mostraron una diferencia de alrededor de 10 % entre los tratamientos del tepetate (T1 a T6) y del suelo (T7). En cuanto a la humedad a saturación (HS), los resultados fueron homogéneos, excepto en los tratamientos del tepetate natural (T1) y del suelo (T7), que mostraron valores inferiores a los demás.

Las curvas de retención de humedad siguieron estas tendencias: curvas similares para los tratamientos con tepetates, mientras que el Tratamiento 7 (suelo) fue muy diferente; éste presentó una humedad aprovechable que correspondió a un tercio de los demás casos.

En el caso de los parámetros hidricos de suelos y tepetates tamizados, lo que realmente se estima son los atributos que constituyen a los elementos texturales, dado que se hace una modificación de la granulometría del espacio poroso natural. Por esta

razón, los tepetates retienen más agua por ser más arcilloso-limosos que el suelo natural (T7), donde predomina mayor cantidad de arena. Estos resultados muestran la poca influencia entre los tepetates que se han cultivado durante cuatro años y el tepetate inalterado, en el cual el efecto de la MO y de otros factores de agregación es casi nulo para estos parámetros.

Los resultados de conductividad hidráulica para los Tratamientos 2 al 6 se mantuvieron en el rango de una conductividad hidráulica moderada. El Tratamiento 7 (suelo agrícola) presentó el valor más alto (6.21 cm h^{-1}) y el valor más bajo se obtuvo para el Tratamiento 1 (0.45 cm h^{-1}). Esta misma tendencia se presentó con la velocidad de infiltración ($T1 = 0.02$ y $T7 = 0.34 \text{ cm h}^{-1}$), los Tratamientos 4, 5 y 6 presentaron valores de infiltración de 0.14, 0.18 y 0.12 cm h^{-1} , respectivamente, y correspondieron a tepetates roturados con asociación de cultivos.

Estos resultados son consistentes con los encontrados por Figueroa y Morales (1992) y Fechter-Escamilla *et al.* (1997), así como con los resultados de sedimentos arrastrados y los escurrimientos medidos por Prat *et al.* (1998). En todos los casos, el Tratamiento 1 correspondió al de menor infiltración y, por consecuencia, mayor escurrimiento y mayor producción de sedimentos ($30 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Los tratamientos con mayor cobertura vegetal (cultivos asociados) presentaron la mayor infiltración, el menor escurrimiento y producción de sedimentos (1 a $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Los Tratamientos 2 y 3 están entre estos dos extremos, pero más cercano al tepetate natural no trabajado.

CONCLUSIONES

- Con base en los resultados obtenidos, se confirma que la roturación y el manejo del tepetate conducen a una reducción de la densidad aparente gracias a la fabricación de agregados y fragmentos de tepetates que, aglutinándose, fomentan la porosidad. La producción de CO_2 es mucho mayor en los tepetates roturados que inalterados; esto manifiesta el desarrollo de las actividades biológicas.

- Las prácticas de roturación y manejo agrícola de un tepetate, después de cuatro años, llegan a crear y mantener un espacio poroso total, igual o superior al existente en un suelo agrícola. Un alto porcentaje de agregados son en realidad fragmentos de tepetate. Más de la mitad de los agregados/fragmentos son menores

que 2 mm de diámetro, lo que favorece los fenómenos de encostramiento superficial.

- Después de cuatro años de cultivo, se nota que los diferentes tratamientos de manejo de un suelo creado a partir de un tepetate roturado, pueden conducir a cambios importantes de su estructura. La aplicación de estiércol a un tepetate roturado incrementa el porcentaje de agregados de la Clase 2 a 11 mm de diámetro y, por consecuencia, su capacidad de retención de agua, su conductividad hidráulica y su infiltración.

LITERATURA CITADA

- Báez P., A., J. Etchevers B., C. Hidalgo M., V.M. Ordaz Ch., Ch. Prat y R. Núñez E. 2001. Dinámica del carbono orgánico en tepetates cultivados. Tesis de Maestría. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Barthés B., A. Azontondé, Z. Boli, C. Prat y E. Roose. 2000. Field-scale runoff and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). *European J. Soil Sci.* 51-3: 485-495.
- Blake, R.G. y H.K. Hartge. 1986. Bulk density. pp. 363-375. *In: Methods of soil analysis. Number 9 (Part 1), in the series Agronomy, Chap. 13. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.*
- FAO-UNESCO. 1988. Mapa mundial de suelos. Organización de las Naciones Unidas. Roma, Italia.
- Fechter-Escamilla, U. y G. Flores G. 1997. Propiedades físicas de suelos volcánicos endurecidos (tepetate t3) después de su rehabilitación en Tlaxcala (México). pp. 162-169. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds.). 3er Symposium Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador.*
- Fechter-Escamilla, U., A. Vera y G. Werner. 1997. Erosión hídrica en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) en el bloque de Tlaxcala (México). pp. 351-358. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds.). 3er Symposium Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos, ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador.*
- Ferrera-Cerrato, R. 1992. Papel de los microorganismos en la recuperación de suelos marginados. *Terra Número Especial 10: 408-418.*
- Ferrera-Cerrato, R., A. Ortiz Catón, J. Delgadillo Martínez y S. Santamaría Romero. 1997. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos. pp. 225-237. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds.). 3er Symposium Internacional Suelos Volcánicos Endurecidos, ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador.*
- Figueroa S., B. y F.J. Morales F. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados-CREZAS. México.
- Forsythe, W. 1975. Física de suelos. Manual de laboratorio. ICA. San José, Costa-Rica.

- García, E. 1981. Modificaciones al sistema climático de Köppen (para aplicarla a las condiciones de la República Mexicana). 3a ed. México, D.F.
- Kemper, D.W. y C.R. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. pp. 425-460. *Methods of soil analysis*. Number 9. (Part 1) Series Agronomy, Chap. 17. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamic of the coefficient of water percolation in soils and the necessity for studying it from a dynamic view for purposes of amelioration. pp. 17-21. *In: Trans 6th Com. Int. Soc. Soil Sci., Russian part A*. Russian Soil Science Society. Moscú, Rusia.
- Lauffer, M., Y. Leroux, C. Prat y L.J. Janeau. 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados (Texcoco, México). pp. 443-456. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds.)*. 3er Symposium Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador.
- Loveday, J. 1974. Methods for analysis of irrigated soil. pp. 78-87. *In: Technical Ed. Communication 54 of the CSIRO Division of Soils*. Commonwealth Agricultural Bureaux. Victoria, Australia.
- Mielhich, G. 1984. Chronosequenzen und anthropogene Veränderungen andesitischer Vulkanaschböden in drei Klimastufen eines randtropischen Gebirges (Sierra Nevada de México). Universität Hamburg. Hamburg, Deutschland.
- Montenegro G., H. y D. Malagón C. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Ministerio de Hacienda y Crédito Público. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Bogota, Colombia.
- Oleschko, K., P. Quantin, C. Zebrowski y N. Fedoroff. 1992. Patrones micromorfológicos de organización de arcillas en tepetates (México). *Terra 10 Número Especial*: 183-191.
- Ordaz Ch., V. 1995. Impact de la culture intensive des agrumes sur le fonctionnement des sols dans une zone tropicale du Mexique (Tabasco). Institut National Agronomique Paris-Grignon, France. *Sols 20*: 178.
- Ortiz S., C. y H. Cuanalo C. 1977. Levantamiento fisiográfico del área de influencia de Chapingo. Colegio de Postgraduados-Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.
- Peña, D. y C. Zebrowski. 1992a. 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 y anexos: 1. Mapas temáticos; 2. Descripción de perfiles; 3. Resultados de análisis. Commission des Communautés Européennes, contrat CEE/ORSTOM N° TS2-0212/Ed. ORSTOM-Paris, Colegio de Postgraduados, Montecillo, J. Liebig Univ. Giessen, Univ. Aut. de Tlaxcala. 98 p.
- Peña H., D. y C. Zebrowski. 1992b. Los suelos y tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. *Terra 10 Número Especial*: 151-170.
- Peña H., D. y C. Zebrowski. 1992c. Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. *Terra 10 Número Especial*: 156-163.
- Prat, C. 1997. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en el área experimental de San Miguel Tlaxpan (Texcoco, México). pp. 359-370. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (eds.)*. 3er Symposium Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM-UE-PUCE-UCE. Quito, Ecuador.
- Prat, C., A. Báez, E. Ascencio y A. Márquez. 1998. Erosión de una toba volcánica endurecida en proceso de rehabilitación. pp. 89-97. *In: H. Navarro Garza, H. Poupon y M. A. Pérez Olivera (eds.)*. Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates). ORSTOM-Colegio de Postgraduados. México.
- Quantin, P., A. Arias, J. Etchevers, R. Ferrera, K. Oleschko, A. Navarro, G. Werner y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: Caracterización y rehabilitación para la agricultura (Informe científico final del proyecto TS2-A 212 CEE/ORSTOM). *Terra 11. Número Especial*.
- Servenay, A. y C. Prat. 2000. Classification from landsat TM of indurated volcanic materials (tepetates) of the Mexican neovolcanic belt. *Geocarto Intl.* 15: 55-62.
- Simeon, R. 1887. Dictionnaire de la Langue Nahuatl ou Mexicaine. Ed. Siglo XXI. México, D.F.
- Velázquez R., A. 1997. Disgregación, alteración y agregación de dos niveles de trituración de tepetates del estado de Morelos por especies vegetales perennes en condiciones de invernadero. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Walkley, A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils. Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63: 251-263.
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis and study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.* 28: 337-351.
- Zebrowski, C. 1992. Los suelos endurecidos en América Latina. *Terra 10 Número Especial*: 15-23.

EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS EN LA CUENCA "EL JOSEFINO", JESÚS MARÍA, JALISCO

Evaluation of Soil Degradation in El Josefino Watershed, Jesús María, Jalisco

Elibeth Torres Benites^{1†}, José Cortes Becerra², Enrique Mejía Sáenz¹, Adolfo Exebio García¹,
Ana Laura Santos Hernández¹ y Ma. Eugenia Delgadillo Piñón¹

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la degradación de los suelos de la cuenca "El Josefino", localizada en el municipio Jesús María, estado de Jalisco. Los escenarios se construyeron mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica. Los datos utilizados consistieron en cuatro años de información climática, uso de suelo y unidades de suelo, lo cual resultó en cinco Unidades Hidrológicas, mismas que sirvieron para la predicción de la erosión hídrica. Las metodologías utilizadas fueron: la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos por erosión hídrica y eólica, y FAO para degradación química, física y biológica. En los resultados, se observó que los principales procesos de degradación de los suelos de la cuenca son la erosión hídrica y eólica, en valores clasificados entre altos y muy altos, que van de 107 a 200 t ha⁻¹ año⁻¹ y afectan entre 35 y 81% del área total, respectivamente. La degradación física y química representan los menores grados de afectación que van de ligeras a moderadas.

Palabras clave: EUPS, erosión hídrica, erosión eólica, sistema de información geográfica.

SUMMARY

The objective of this work was to evaluate the degradation of the soils of the basin "El Josefino", located in the municipality Jesús María, in the state of Jalisco. The sceneries were constructed with the use of a Geographical Information System. The data used consisted of four years of climatic information, soil use and soil units, which resulted in five Hydrologic

Units, used for the prediction of water erosion. The methodologies used were: the Universal Equation of Soil Loss by water and wind erosion and FAO for chemical, physical and biological degradation. The results showed that the main processes of degradation of the soils of the basin are water and wind erosion, in values that place it between high and very high, 107 to 200 t ha⁻¹ año⁻¹, affecting between 35 and 81% of the total area, respectively. The physical and chemical degradation represent minor degrees of affectation that go from slight to moderate.

Index words: UESL, water erosion, wind erosion, geographical information system, GIS

INTRODUCCIÓN

La degradación de la tierra es un conjunto de procesos dinámicos (físicos, químicos y biológicos) que afectan la productividad de los ecosistemas, lo cual puede llegar a ser irreversible y tener consecuencias sociales, económicas, ecológicas y políticas. Esta degradación se relaciona con el uso inadecuado de los recursos agua, suelo, flora y fauna; los dos primeros son la base fundamental para el abastecimiento de alimentos para las plantas, los animales y el hombre (Ortiz *et al.*, 1994).

Julia Carabias, Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, informó que el deterioro ambiental producido por el rápido avance de la frontera agrícola, ganadera y urbana, pone en serio peligro el mantenimiento de ecosistemas completos de miles de especies de plantas y animales, y que México registra la tasa más alta de deforestación de América Latina; la degradación de suelos asciende a 80% del territorio, otras 600 mil ha se agregan cada año, 10% de las hectáreas de riego para cultivo se han perdido por la alta acumulación de sales, sobre todo a lo largo de 20 zonas prioritarias (Carabias, 1996).

El estado actual de la degradación de la tierra indica la situación que presentan los recursos que se están evaluando (agua, suelo, vegetación) y su cambio

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

[†] (hely@colpos.mx)

² Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

a través de un período dado y la influencia de las actividades humanas sobre dichos procesos (Estrada *et al.*, 1999).

La erosión es una de las principales causas de la desertificación y constituye uno de los problemas más severos de los recursos renovables de México. Los diversos procesos que propician la degradación de la tierra afectan en distintos grados, que representa 95% del territorio nacional.

En estos procesos sobresalen los de erosión eólica e hídrica que afectan 85 y 60%, respectivamente, de la superficie del país, así como el proceso de degradación biológica, el cual afecta 80% del territorio nacional, de acuerdo con la información contenida en el mapa de suelos de la República Mexicana (INEGI, 1993); con el análisis realizado por la Comisión Nacional de Zonas Áridas y la FAO (1996): 70% de los suelos de México presentan menos de 1% de materia orgánica, 30% de la superficie condiciones de salinidad y de sodicidad, y suelos con menos de 50% de saturación de bases en 20% del área.

La forma de abordar un estudio de esta magnitud es a través de una cuenca, ya que ésta constituye la unidad física completa, donde una de las entradas es la precipitación y las salidas el escurrimiento y el sedimento, el proceso incluye la influencia de la vegetación, suelo y topografía (Torres, 2000). El estudio de una cuenca como unidad de gestión para organizar actividades que mejoren la calidad de vida del hombre tiene su origen en el estrecho vínculo que existe entre los procesos que en ella suceden y las necesidades humanas (Fernández, 1996).

Lo anterior exige generar información, indicando la problemática ecológica que se vive a esta escala. Esta información al analizarse debe permitir observar la situación integral, ya que un estudio cualquiera de esta problemática por separado, así sea la degradación física de los suelos, el sobrepastoreo, la degradación de la cubierta vegetal, la pérdida de producción agrícola, no presentan un panorama útil por sí solos; y sólo el estudio de la integración de todos los recursos permite que se conozca la situación real.

En el caso del estado de Jalisco, México, donde la dinámica de degradación no responde a límites geopolíticos y los procesos interaccionan de forma geográfica natural, la cuenca es una respuesta a este análisis. Las acciones encaminadas a la planeación deben considerar, primeramente, el detener los procesos que empobrecen la capacidad productiva de los recursos naturales, por lo que el primer paso es

ubicar los principales procesos que los afectan, y posteriormente, diagnosticar el estado de desequilibrio ecológico y realizar acciones viables (SEMARNAT, 2000).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar y cartografiar la degradación de la tierra, contemplando aspectos físicos y biológicos, que proporcionen elementos para la planeación del combate a la degradación en la cuenca "El Josefino", municipio de Jesús María, estado de Jalisco, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y Caracterización del Área de Estudio

La cuenca "El Josefino" se localiza en la parte norte del estado de Jalisco y al oeste del estado de Guanajuato. Se ubica entre las coordenadas 20° 43' a 20° 51' N y 102° 04' a 102° 10' O; la altitud varía de 1760 a 2280 m. El área total es de 1964.02 ha, de las cuales 538.87 ha pertenecen al estado de Jalisco y 1425.15 ha al estado de Guanajuato. De acuerdo con las cartas temáticas de INEGI, F13 D59 y F13 D69, los suelos que predominan dentro de la cuenca son de origen residual y aluvial, sobresaliendo Phaeozem háplico, los cuales ocupan 17% de la superficie, distribuidos en su mayor parte en la zona de las laderas más pronunciadas, Luvisol férrico 12%, Planosol eútrico 29%, Regosol eútrico 29%, Vertisol pélico 11% y Cambisol 11%.

Los recursos hidrológicos de la cuenca son proporcionados por los arroyos La Huerta, Canoita y El Salto, los cuales confluyen en un mismo punto haciéndose tributarios de la presa Nueva de Jalpa. La precipitación media anual de esta zona, es de 730 a 950 mm, de junio a septiembre, lo cual permite que las corrientes fluviales sean aprovechadas en bordos y presas para los meses de sequía y con destino al consumo humano y animal.

Metodología

La metodología utilizada en este estudio se basó en la generada por la Universidad Autónoma Chapingo (Estrada *et al.*, 1999), para la evaluación de la degradación del suelo en ocho estados de México, la cual se diseñó para integrar los efectos y causas de la desertificación, considerando la metodología FAO (1996) que permite obtener información de la magnitud del grado de desertificación y de los procesos involucrados y, finalmente, el uso de los

Sistemas de Información Geográfica que permite hacer la sobreposición o combinación de información (existente o nueva) y el despliegue gráfico de los resultados.

Para obtener la tasa de erosión hídrica, así como la de erosión eólica, se llevó a cabo la generación de mapas temáticos y bases de datos que calculan el índice de erosión hídrica y eólica mediante el uso de ecuaciones paramétricas, haciendo uso de un proceso automatizado, el cual consistió en calcular las variables correspondientes a la erosividad de la lluvia, agresividad del viento, erosionabilidad del suelo, longitud y grado de la pendiente, uso del suelo y vegetación. Además de un proceso automatizado para rasterizar estos temas (variables) y realizar el cálculo cartográfico paramétrico multiplicativo con el uso de los Sistemas de Información Geográfica, herramienta que permite el despliegue de los resultados de pérdida de suelo (en $t\ ha^{-1}año^{-1}$) a través de mapas y gráficos (Figura 1).

Con el objetivo de implementar criterios jerárquicos, de acuerdo con el grado de erosión hídrica, se dividió a la cuenca en cinco unidades de escurrimiento (A, B, C, D y E), con la finalidad de generar bases que permitan guiar las alternativas de manejo hacia aquellas partes dentro de la cuenca que presenten mayor grado de erosión hídrica (Figura 2).

Fenómenos de Degradación

Dados los objetivos del estudio, la metodología se adecuó al presente estudio debido a la escala que se trabajo (1:50 000), los fenómenos de degradación estudiados fueron:

Índice físico. Este índice agrupa los procesos de erosión hídrica, erosión eólica y salinización; este último no se presenta en la cuenca. El presente estudio omite la utilización de indicadores como pérdida de la materia orgánica, deterioro de propiedades físicas, disminución de la fertilidad y degradación del agua, propuestos por la metodología FAO (FAO, 1996). A continuación se describen estos aspectos.

Erosión hídrica. La combinación o sobreposición de capas de información es la herramienta más destacada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y permite, además, generar nueva información a partir de la que ya existe, aplicando los procesos necesarios. De esta manera, se determinaron los grados de erosión que afectan la cuenca, utilizando la metodología descrita por Figueroa *et al.* (1991), para la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), cuya expresión es la siguiente:

$$A = R K L S C P$$

Donde: A = promedio anual de pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}$); R = factor de erosividad de la lluvia

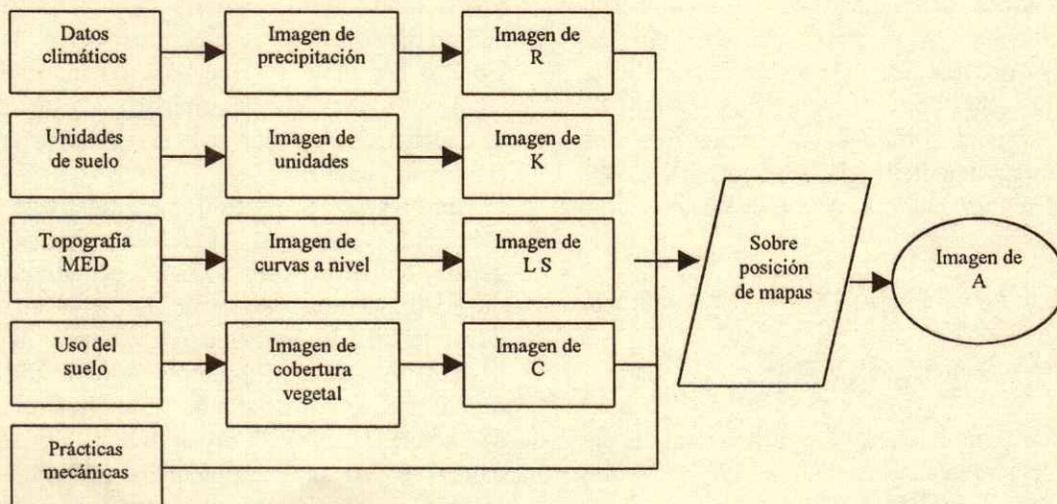


Figura 1. Diagrama del proceso para obtener la erosión actual.

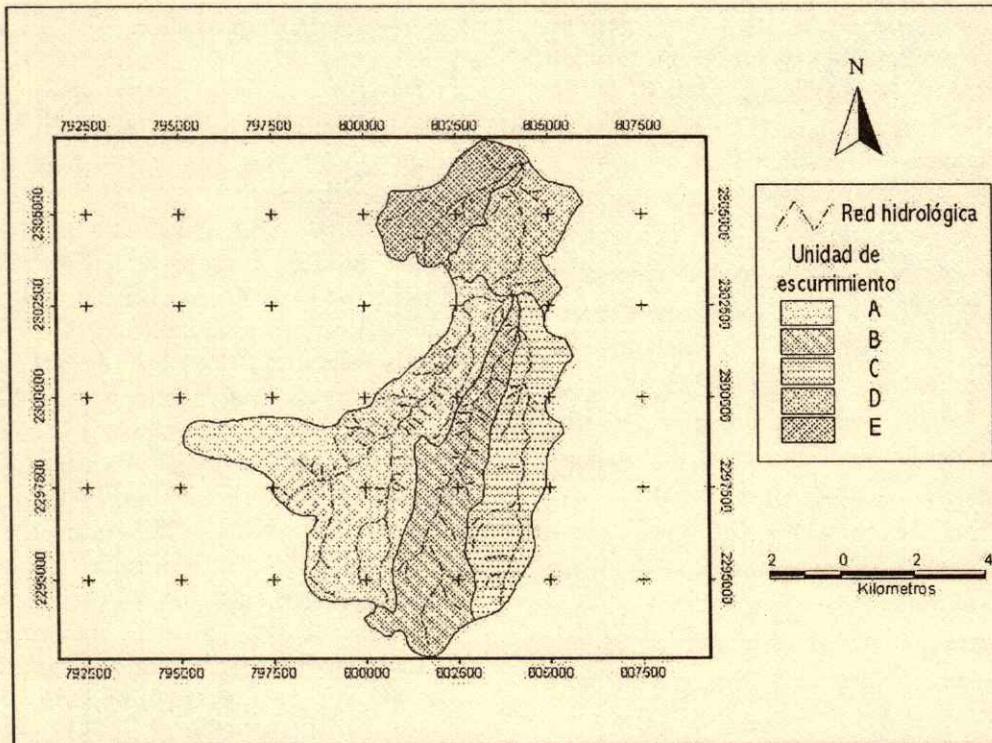


Figura 2. Unidades de escurrimiento generadas para la cuenca "El Josefino".

(MJ mm ha⁻¹ h⁻¹); K = erosionabilidad del suelo (t ha h MJ mm ha⁻¹); L = longitud de la pendiente (adimensional); S = grado de la pendiente (adimensional); C = manejo de cultivos (adimensional) y P = prácticas mecánicas de control de erosión (adimensional). a) Factor R: Se calculó mediante ecuaciones generadas por Cortés (1991), usando datos pluviométricos de la zona de estudio en seis estaciones meteorológicas: Arandas, Jesús María, San Miguel el Alto, San Julián, San Diego de Alejandría y Manuel Doblado. Se emplearon las ecuaciones correspondientes a las Regiones V y VII del plano de regiones elaborado por el mismo autor para dicho factor, que son:

$$Y = 3.4880 X - 0.00188 X^2 \text{ (V)}$$

$$Y = -0.0334 X + 0.006661 X^2 \text{ (VII)}$$

Donde: Y = EI₃₀ anual (energía cinética total de un evento con su intensidad máxima en 30 min) (Mj mm ha⁻¹ h⁻¹) y X = lluvia anual (mm).

Con los datos de erosividad de la lluvia calculados, se utilizó el modelo de los polígonos de Thiessen para distribuir de manera parcial la precipitación entre la

ubicación correspondiente a las estaciones; de esa manera, se obtuvieron los valores de isoerosividad de la lluvia dentro de la cuenca.

b) Factor K: Este valor se obtuvo con el uso del nomograma de Wischmeier, empleando los datos de las determinaciones físicas de % de limo + arena fina (0.1 a 0.002 mm), materia orgánica, % de arena, código de estructura y permeabilidad del suelo. El Cuadro I resume los métodos de laboratorio que se emplearon para las determinaciones de las muestras de suelos, empleadas en el nomograma y demás ecuaciones empíricas.

c) Factores L y S: Estos dos parámetros se obtuvieron mediante el uso del Modelo de Elevación Digital, generado del Software SIGMA, editado por el Colegio de Postgraduados (Pedraza, 2001), el cual resultó de 227 hileras, 226 columnas y un tamaño de celda de 88 píxeles. Así como el empleo de un distanciómetro digital para la corrección de la longitud en campo.

d) Factores C y P: Con apoyo de observaciones de campo y las tablas obtenidas por Figueroa *et al.* (1991), se obtuvieron los valores de C y P.

Para generar el mapa de Vegetación y Uso Actual de Suelo, se procedió a una fotointerpretación de las fotografías aéreas editadas por INEGI (1993), escala

1:75 000 y corregidas en campo de acuerdo con el uso actual de la cuenca. La delimitación de unidades de escurrimiento se obtuvo tomando como base la carta topográfica 1:50 000; se hizo una sobreposición del mapa de unidades de escurrimiento con el de vegetación para la estimación de los índices de uso actual del suelo por unidad de escurrimiento, en los que se determinaron áreas y el porcentaje de cada uno de ellos por unidad.

Se generaron mapas con cada factor de la EUPS y mediante el álgebra de mapas (Figura 1) se calculó la erosión hídrica actual.

Erosión eólica. Al igual que la erosión hídrica, la erosión eólica se evaluó mediante ecuaciones paramétricas y el uso de SIG; la ecuación empleada es la siguiente:

$$Pee = f(C^1, S, T, V)$$

Donde: Pee = pérdida de suelo por erosión eólica ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$); C^1 = índice de agresividad del viento; S = índice de erosionabilidad del suelo, T = índice topográfico y V = índice de vegetación.

El índice de agresividad del viento se calculó mediante el índice eólico de Chepil (1963) modificado, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$C^1 = \frac{1}{100} \sum_1^{12} V^3 \frac{(ETP - Pn)}{ETP}$$

Donde: C^1 = índice de agresividad del viento; V = velocidad del viento ($m\ s^{-1}$); ETP = evapotranspiración potencial (mm); P = precipitación (mm) y n = número de días del mes en los que hay erosión.

Los datos climáticos para el cálculo de este índice corresponden a los utilizados en el factor R de la erosión hídrica. El valor de la erosión eólica se obtuvo siguiendo el procedimiento que describe la Figura 1, en donde el factor de agresividad es el viento C^1 . La ETP se calculó mediante la relación: $E_v(0.8) = ETP$.

Degradación física. El encostramiento del suelo, producto del afloramiento de horizontes sub-superficiales, se evalúa y clasifica únicamente en cuanto a estado actual, ya que es un proceso que se lleva a cabo en un tiempo relativamente largo.

Los indicadores del proceso de degradación se obtuvieron con base en la evaluación de la acumulación cálcica, de yeso, hierro y silicio y formas de cementación de cada una de ellas, así como la cuantificación de la densidad aparente con respecto a

valores iniciales (% de cambio $año^{-1}$), velocidad de infiltración ($cm\ h^{-1}$) y disminución de la permeabilidad (% $año^{-1}$).

La disminución de la permeabilidad del suelo se calculó mediante tres índices:

a) Índice climático: El índice climático que se utiliza para determinar la degradación física del suelo es el mismo que se utiliza para evaluar el índice de erosividad de la erosión hídrica, ya que la compactación y el encostramiento del suelo son funciones de la intensidad y energía de la lluvia.

b) Erosionabilidad del suelo ($t\ ha^{-1}$).

c) Topografía (coeficiente adimensional).

La susceptibilidad del suelo al encostramiento se calculó mediante la siguiente relación:

$$le = \frac{1.5zf + 0.75zc}{c + 100} (M.O)$$

Donde: le = índice de encostramiento; zf = % de limo fino (2 a 20 μm); zc = % de limo grueso (2 a 50 μm); c = % de arcilla (< 2 μm); M.O = % de materia orgánica.

Degradación biológica. Considerando la visión propuesta en la metodología FAO (FAO, 1996), que agrupa en este índice la destrucción biológica de los ecosistemas y la disminución de la productividad, se evaluó la actividad biológica del suelo a través de la mineralización de la materia orgánica.

a) Índice climático: En general, el índice climático que se utiliza para conocer la velocidad de mineralización del humus es el índice propuesto en la metodología de FAO (1953). Con una velocidad de descomposición de 2.9 entre 10° y 20°, este índice es el siguiente:

$$K_2 = C \frac{1}{12} \sum_1^{12} e^{0.1065t} \left(\frac{P}{ETP} \right)$$

Donde: t = temperatura media del aire durante el mes (°C); P = precipitación media anual (mm) y ETP = evapotranspiración potencial (mm).

Cuando $P > ETP$, $P/ETP = 1$ para $t < 0$, $t = 0$.

b) Índice edáfico: Este índice se determinó evaluando la textura, contenido de carbonato de calcio, pH y el contenido de agua en el suelo arriba de la capacidad de campo. Los métodos de laboratorio para la determinación de éstos se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Determinaciones de análisis de suelos.

Determinación	Método
Textura	Day modificado
pH	Potenciométrico
Materia orgánica	Walkley y Black
Carbonato de calcio	Norton y Newson
Densidad aparente	Parafina
Capacidad de campo	Olla de presión
Conductividad hidráulica	Permeámetro de carga constante

Degradación química. Considerando la visión propuesta por Ortiz *et al.* (1994), este tipo de degradación se evaluó a través de la lixiviación porcentual de bases, mediante la suma de los índices climático, edáfico y topografía.

a) Índice climático: La ecuación empleada para el cálculo de este índice es la propuesta por FAO (1980):

$$C_q = \sum_1^{12} P - ETP$$

Donde: C_q = índice climático para la degradación química; P = precipitación media mensual (mm); ETP = evapotranspiración potencial (mm).

Para temporadas húmedas, cuando $P > ETP$, se utiliza:

$$C_q = \left[\sum_1^{12} P - ETP \right] - R$$

Donde: R = reserva de humedad del suelo.

b) Índice edáfico: Este índice se calculó de acuerdo con la clasificación textural de los suelos de la cuenca.

c) Índice topográfico: Se determinó en campo y se agrupó en valores de acuerdo con lo propuesto por Ortiz *et al.* (1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Erosión Hídrica

En la Figura 3, se muestran los valores de pérdida de la capa arable del suelo en donde las zonas con mayor problema de erosión se encuentran en las unidades A, B y E. Estas corresponden a la parte alta de la cuenca conformada por lomeríos, donde la remoción de la vegetación es crítica para la estabilidad de los ecosistemas, representando así 40% del área total de la cuenca afectada por un grado de erosión muy alta ($> 100 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

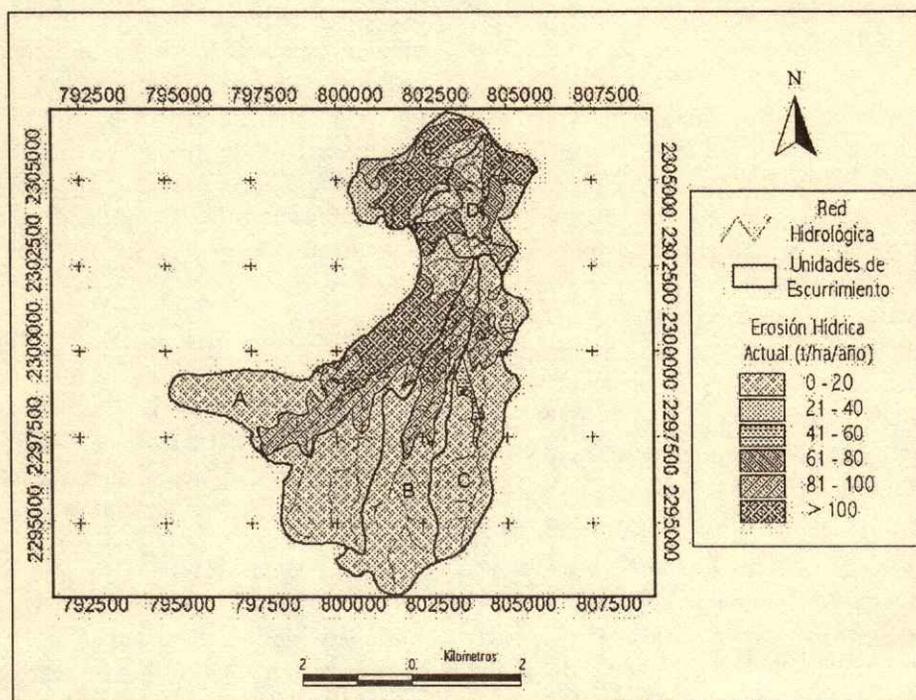


Figura 3. Mapa de erosión hídrica actual de la cuenca "El Josefino".

La misma figura indica que la cuenca presenta un grado de erosión que va de ligero a moderado, en las unidades hidrológicas A, B y C, afectando 57% del área total de la cuenca. Los mayores problemas se encuentran en áreas agrícolas de la parte baja de la unidad A, donde las pendientes son mayores que 15%. Dada su condición productiva de temporal, el suelo se encuentra desprovisto de vegetación durante gran parte del año y sin prácticas agrícolas adecuadas, lo que favorece procesos de desprendimiento y arrastre de partículas de suelo; no se aprecian canales de deslave, pues el laboreo agrícola anual los borra. Asimismo, la vegetación natural en la unidad B es expuesta frecuentemente a una notable deforestación, sin ser excesiva. Los terrenos más estables de la cuenca se encuentran en esta unidad.

Tres por ciento de la cuenca presenta un grado de erosión alto, afectando principalmente a las unidades A, B y D, ubicadas en la parte baja de la cuenca en donde los terrenos son de uso agrícola.

Lo anterior indica que existe un problema grave, en especial en las zonas de lomeríos, por lo cual se deben implementar programas de conservación y rehabilitación de suelos, ya que contribuye al

enzolvamiento de la infraestructura hidroagrícola que se localiza en la parte baja de la cuenca.

Erosión Eólica

La presencia de este proceso de degradación de los suelos es una característica de lugares áridos; sin embargo, puede agudizarse o generarse cuando se lleva a cabo un manejo inadecuado del terreno. Ortiz y Estrada (1993) reportaron para el estado de Jalisco tasas de erosión eólica predominantes de 50 a 200 t ha⁻¹ año⁻¹. La Figura 4 muestra la distribución física de la velocidad de erosión eólica actual que presenta la cuenca; se observa que las áreas con erosión clasificada como ligera se encuentran principalmente en la parte alta de la cuenca, donde la vegetación natural es del tipo latifoliada con dos condiciones de cobertura y representa coeficientes de 0.15 y 0.005. Lo anterior representa velocidades de pérdida de suelo menores que 10 t ha⁻¹ año⁻¹, lo que indica que se encuentra dentro de un límite permisible. La parte baja de la cuenca manifiesta erosión moderada (10 a 50 t ha⁻¹ año⁻¹), siendo ésta la que representa el mejor porcentaje del total de la misma. La erosión alta se

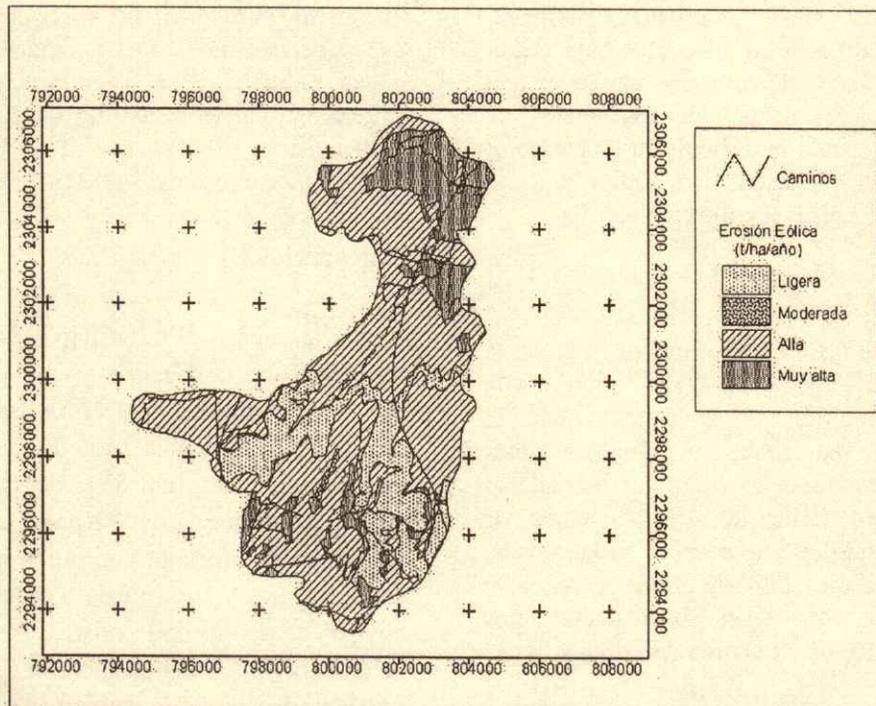


Figura 4. Mapa de erosión eólica actual de la cuenca "El Josefino".

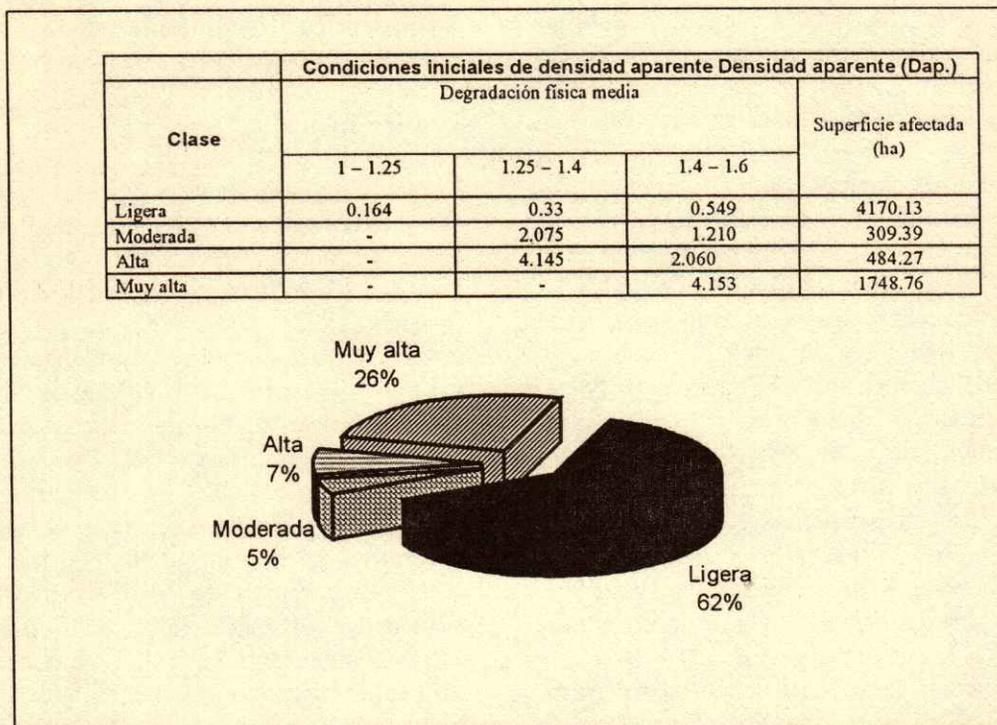


Figura 5. Distribución porcentual de la degradación física en la cuenca "El Josefino".

manifiesta en la parte media y presenta tasas de erosión hasta $107 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La erosión clasificada como muy alta se manifiesta en las partes baja y alta de la cuenca con tasas de erosión mayores que $200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, donde el uso de los suelos es agrícola agravándose siendo la agricultura de temporal la más afectada, considerando una deficiencia de humedad durante ocho meses (octubre a mayo).

Degradación Física

En la Figura 5, se observa que más de 50% de la cuenca se encuentra afectada con un riesgo ligero a la compactación. Lo anterior, y de acuerdo con la metodología de FAO, representa condiciones estables para el proceso degradativo en cualquier ecosistema en general. Por otro lado, la segunda clase de degradación, en el grado de importancia en la cuenca, es la clasificada como muy alta, de donde se concluye que para este caso se tienen básicamente dos condiciones de degradación en el área de estudio.

Degradación Química

La Figura 6 muestra la magnitud que representa la degradación química en el área de estudio. La

degradación química no representa un riesgo a considerar, al analizar las áreas de afectación respecto a la superficie total. Debe tomarse en cuenta que los suelos afectados con alta severidad no son representativos en el ámbito de cuenca, sin embargo, pueden serlo a escala local, y tomar relevancia en partes donde el uso del suelo es de tipo agrícola.

Degradación Biológica

En la cuenca "El Josefino", 87.36% de los suelos son de textura de media a gruesa y 12.61% de textura fina, lo que origina que éstos sean susceptibles a la degradación biológica. La Figura 7 representa la distribución porcentual de la degradación biológica, la cual muestra que la mayor parte de la superficie de la cuenca se ve afectada con un riesgo a la degradación alta. Por lo tanto, puede considerarse un proceso importante dentro de la misma, debido a la pérdida de materia orgánica anual a causa de la mineralización. La degradación de la cubierta vegetal es otro factor desfavorable que incrementa este tipo de degradación, manifestada principalmente por la deforestación y la incorporación de áreas agrícolas.

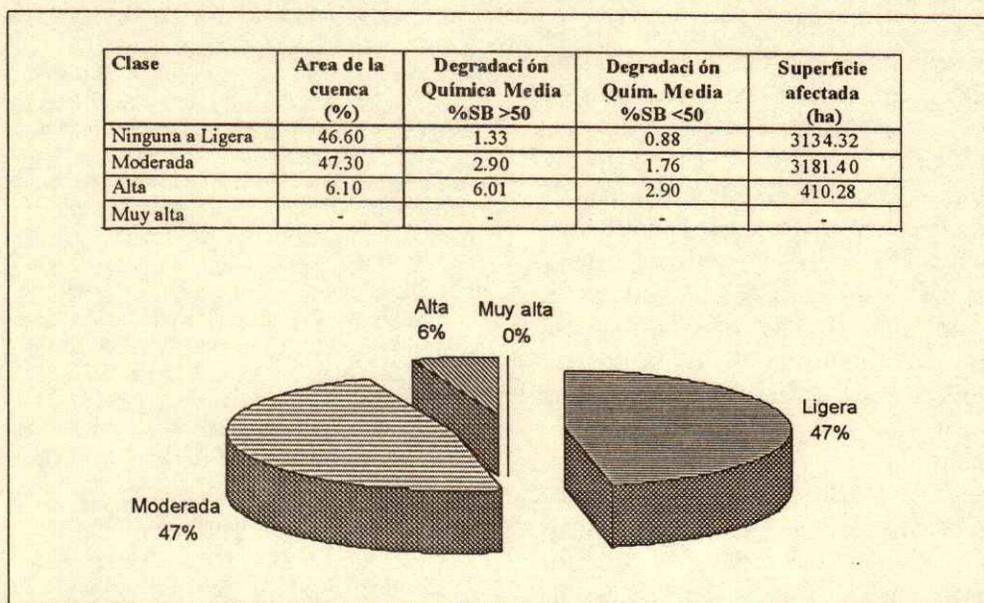


Figura 6. Distribución porcentual de la degradación química en la cuenca "El Josefino".

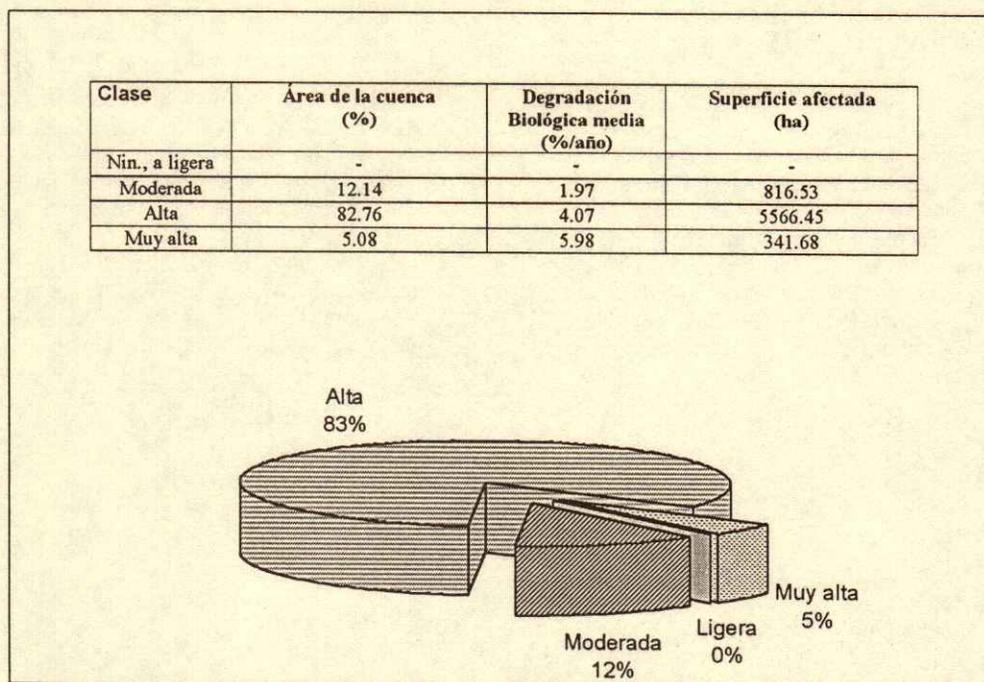


Figura 7. Distribución porcentual de la degradación Biológica en la cuenca "El Josefino".

CONCLUSIONES

- Los principales procesos de degradación de los suelos de la cuenca "El Josefino" son la erosión hídrica y eólica, en rangos clasificados entre altos y muy altos que van de 107 a 200 t ha⁻¹año⁻¹, y afectan

así entre 35 y 81% del área total, respectivamente. La degradación física y química representan los menores grados de afectación que van de ligeras a moderadas.

- La erosión, tanto hídrica como eólica, adquiere gran relevancia entre los procesos de degradación, por que puede desencadenar procesos difíciles de controlar e

irreversibles. Por el contrario, los otros procesos degradatorios pueden revertirse a través de la aplicación de técnicas o prácticas conservacionistas de relativa sencillez (aplicación de fertilizantes, enmiendas, abonos y rotaciones).

- La degradación física en la cuenca se manifiesta principalmente en el deterioro de la estructura natural del suelo como resultado de un uso agrícola intensivo, sin prestar atención a la rotación de cultivos, materia orgánica, manejo de los rastrojos de cosecha y prácticas de cultivos. Este deterioro físico se manifiesta por el encostramiento de los suelos, la reducción de la infiltración y el aumento del riesgo de erosión hídrica.

- El uso combinado de la información de campo, cartográfica, registros históricos climatológicos, ecuaciones de predicción de los procesos dinámicos de la degradación del suelo, así como el uso de los Sistemas de Información Geográfica y el álgebra de mapas, permitió detectar el estado actual y la velocidad de deterioro de los suelos de la cuenca en estudio.

LITERATURA CITADA

- Carabias L., J. 1996. La degradación, un problema nacional. *Excelsior*, 18 de junio. México, D.F.
- Chepil, W.S., F.H. Siddoway y D.V. Armbrust. 1963. Climatic index of wind erosion conditions in the Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 27: 449-452.
- Cortés T., H.G. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Estrada Berg, J.W., J.B. Estrada Berg O., M. Camacho V., Ma. E. Mendiola G. y A. Tijerina V. 1999. La desertificación en el altiplano mexicano. Universidad Autónoma Chapingo-Comisión Nacional de Zonas Áridas. Chapingo, México.
- FAO. 1980. Metodología provisional para evaluar la desertificación de los suelos. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. FAO. Roma, Italia.
- FAO. 1996. Metodología unificada para la evaluación y monitoreo de la desertificación en América Latina. Indicadores de desertificación. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. FAO. Roma, Italia.
- Fernández R., D.S. 1996. Aplicación del modelo de simulación SWRRB para determinar el balance hidrológico de la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Figuroa S., B., A. Amante O., H.G. Cortés T., J. Pimentel L., E.S. Osuna., J.M. Rodríguez O. y F.J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1993. Mapa de Suelo de la República Mexicana. Escala 1:1 000 000 y 1:250 000. Aguascalientes, Ags., México.
- Ortiz S., Ma. de la L. y J.W. Estrada Berg. 1993. Evaluación y cartografía de la erosión eólica en la República Mexicana. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Ortiz S., Ma. de la L., M. Anaya y J.W. Estrada Berg. 1994. Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra. Universidad Autónoma Chapingo-Comisión Nacional de Zonas Áridas-Colegio de Postgraduados. Chapingo. México.
- Pedraza O., F.J. 2001. Desarrollo de un sistema generador de modelos altimétricos para la República Mexicana. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2000. Estudio de erosión y degradación del suelo en la cuenca "El Josefino", municipio de Jesús María, Jalisco. México, D.F.
- Torres B., E. 2000. Comparación de los modelos de simulación hidrológica SWRRB y SWAT en la cuenca "El Tejocote". Atlacomulco, estado de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

OPTIMIZACIÓN TECNOLÓGICA SIMULTÁNEA PARA TRES HÍBRIDOS DE MAÍZ CON PRECISIÓN DEFINIDA *A PRIORI*

Joint Optimization of the Response of Three Maize Hybrids to Several Management Practices under Predefined Precision

A. Barrios-Ayala^{1,2}, A. Turrent-Fernández¹, A. Martínez-Garza², J.I. Cortés-Flores¹ y C.A. Ortiz-Solorio¹

RESUMEN

Se condujo un experimento con riego que involucró a cinco dosis de nitrógeno, fósforo, potasio y densidad de población como "parcelas principales" y tres híbridos de maíz: H-512, H-515 y H-516 como "parcelas chicas" en el ciclo otoño-invierno 1997/1998 en Chiapas, México. Las parcelas principales del Diseño de Parcelas Divididas correspondieron a 25 tratamientos de un Diseño Compuesto Central casi-rotable. Las variables cuantitativas se codificaron y los híbridos fueron representados por variables indicadoras que asumieron los valores de 0 ó 1. Se ajustó un modelo de regresión cuadrático al rendimiento de grano, que incluyó las variables codificadas, las variables indicadoras y sus productos cruzados. La ecuación comprendió 15 términos. El coeficiente de determinación (R^2) fue 74 %. Los coeficientes de variación para los rendimientos estimados [$CV(\hat{y})$] como función de ρ (radio del hiperespacio codificado) y las varianzas de \hat{y} [$Var(\hat{y})$] resultaron diferentes entre híbridos. El rendimiento estimado asociado al máximo ingreso neto dentro del espacio explorado fue seleccionado por un método numérico, aplicando las restricciones $CV(\hat{y}) < 0.5$ y $\hat{y} < M2$. La condición M2 se definió para cada híbrido, como el promedio de aquellos dos tratamientos que se asociaron con los mayores rendimientos observados. Las $Var(\hat{y})$, los tratamientos asociados y las \hat{y} (M2) en ($t\ ha^{-1}$)², $N-P_2O_5-K_2O$ -miles de plantas ha^{-1} y $t\ ha^{-1}$ fueron respectivamente 0.3449, 140-00-36-66 y 7.93 (7.96) para el híbrido H-512; 0.0126, 155-75-48-52 y 9.56 (9.65) para el H-515 y 0.0987, 215-0-0-30 y 10.64 (11.09) para el H-516. Las $Var(\hat{y})$, los tratamientos

asociados y las \hat{y} en ausencia de ρ fueron: 1.000, 115-0-0-70 y 7.913 para el H-512; 0.0126, 155-75-48-52 y 9.56 para el H-515 y 0.0987, 220-0-0-30 y 10.68 para el H-516. Por lo tanto, las dos restricciones impuestas protegieron contra la sobreestimación de los rendimientos y de los ingresos netos.

Palabras clave: Recomendaciones de manejo, diseños rotables, varianzas de \hat{y} .

SUMMARY

A field experiment involving five rates of nitrogen, phosphorus, potassium, and population density as "main plots" and maize hybrids H-512, H-515, and H-516 as "small plots" was conducted under irrigation in the 1997/1998 fall-winter season in Chiapas, Mexico. The main plots of a split plot design were assigned to 25 treatments of a quasi-rotatable central composite design. Quantitative variables were coded around the mean and divided by the equivalent of the coded unit. Hybrids were represented by two "dummy" variables assuming values 1 or 0. A quadratic regression model involving quantitative and dummy variables plus their interactions was adjusted to yield of grain by the backward procedure. The equation has 15 terms; the coefficient of determination was 74 %. Coefficient of variation for computed yields [$CV(\hat{y})$] along ρ (radius of the coded space) and variance of \hat{y} differed substantially among hybrids. Computed yield with maximum net income was located by a numerical method within the explored space. Conditions $CV(\hat{y}) < 0.5$ and $\hat{y} < M2$ were imposed as restrictions in the numerical method. Parameter M2 was defined for each hybrid as the average of those two out of 25 treatments with higher observed mean yields. Variances of restricted \hat{y} ($t\ ha^{-1}$)² associated optimum treatments ($N-P_2O_5-K_2O$ -thousand plants ha^{-1}) \hat{y} and M2 in $t\ ha^{-1}$ yields were, respectively, 0.3449, 140-00-36-66, 7.93 and 7.96 for H-512; 0.0126, 155-75-48-52, 9.56 and 9.65 for H-515; 0.0987, 215-00-00-30 and 10.64 and 11.09 for

¹ Instituto de Recursos Naturales, ² Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, Km 35.5, 56230 Montecillo, Edo. de México.

¹ (abarrios@colpos.colpos.mx)

Recibido: Octubre de 2001. Aceptado: Septiembre de 2002.

Publicado en Terra 21: 127-135.

H-516. Variances of \hat{y} , associated optimum treatments and \hat{y} values when ρ was unrestricted were 1.000, 115-00-00-70 and 7.913 for H-512; 0.0126, 155-75-48-52 and 9.56 for H-515; and 0.0987, 220-0-0-30 and 10.68 for H-516. Hence, ρ and M2 conditions were necessary for preventing overestimation of both yield and associated net income.

Index words: Management recommendations, rotatable designs, \hat{y} variance.

INTRODUCCIÓN

Los diseños rotables son diseños para aproximar superficies de respuesta en los cuales la varianza de la respuesta predicha, $Var(\hat{y})$, depende de la distancia que tenga al centro del diseño, el punto del espacio de exploración (región experimental) que tiene esta respuesta (Méndez, 1980; Cornell, 1990). En términos prácticos se puede decir que si en un experimento con fertilizantes se determina una dosis óptima económica (DOE), la $Var(\hat{y})$ estará en función de que tan lejos esté la DOE del centro del diseño, al ser multiplicado por el cuadrado medio del error del experimento (σ^2). Este fenómeno se observa con mayor claridad cuando tenemos soluciones de esquina, que son las partes más lejanas del centro del diseño; en este punto la distancia es tan grande, que es posible que multiplique varias veces la σ^2 y, en consecuencia, la $Var(\hat{y})$ sería muy grande y dicha solución no tendría la precisión que desde el punto de vista agronómico es requerida para dar una recomendación. También, puede encontrarse que las estimaciones de y (\hat{y}), escapan del ámbito de lo observado en el experimento. Este problema se incrementa cuando se recomienda en general para un cultivo y más aún en el cultivo de maíz, pues se tiene tanta variabilidad genética, que es posible encontrar al menos 10 híbridos diferentes que pueden recomendarse para una misma región. Existen evidencias, que cuando se evalúan varios híbridos en un mismo experimento, cada híbrido tendrá una DOE diferente y, en general, la distancia de esta DOE al centro del diseño, ρ , tampoco es la misma, en consecuencia, tendrán diferente precisión en función de la $Var(\hat{y})$.

El principio teórico para el análisis de la $Var(\hat{y})$ dentro de un espacio de exploración se conoce desde la aparición de estos diseños (Box y Hunter, 1957); sin embargo, su uso se ha restringido debido a la dificultad que había representado su cálculo, ahora superado con el uso de herramientas de computación.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la precisión de una recomendación de factores de manejo para diversos híbridos de maíz, en función de la $Var(\hat{y})$.

La metodología conocida como superficie de respuesta conjuga técnicas de diseños experimentales y de optimización y sus bases lógicas son semejantes a las de los modelos lineales en general. De manera frecuente, la mayoría de los fenómenos se "ajustan" bien a superficies aproximadamente cuadráticas, por lo menos en regiones de interés restringidas (Méndez, 1980).

Existen varios diseños para estimar superficies de respuesta, así para ajustar modelos de primer orden se usan: factoriales 2^k o fracciones de repetición y diseños simples. Para ajustar modelos de segundo orden se emplean con mayor frecuencia factoriales 3^k y los diseños compuestos centrales. De éstos, los más importantes desde el punto de vista práctico son los **diseños compuestos centrales rotatorios** (Cochran y Cox, 1957; Martínez, 1988).

Los diseños compuestos son diseños factoriales de primer orden, aumentados por algunos puntos que permiten la estimación de coeficientes de segundo orden; por lo tanto, el diseño compuesto central es un factorial 2^k completo o fraccionado, donde los dos niveles de cada variable se codifican con -1 y +1 aumentados por $2k$ puntos axiales y n puntos centrales (centro del diseño); por lo tanto, el número de unidades experimentales de un diseño compuesto central (DCC) es igual a $2^k + 2k + n$ (Méndez, 1980; Cornell, 1990).

En los puntos axiales se utilizan valores de $-\alpha$ y $+\alpha$ calculados de forma que el diseño resulte ortogonal, lo que implica que la matriz $X'X$ sea diagonal, siendo X la matriz diseño (modelo) con un vector columna de 1's para el cálculo de la media.

La rotabilidad de estos diseños también es una propiedad deseable; se dice que el diseño es rotable cuando la $Var(\hat{y})$ depende únicamente de la distancia del punto al centro del diseño y no de la dirección (Box y Hunter, 1957). Usualmente, se tiene más precisión en el centro del diseño y en forma de círculos, esferas o hiperesferas concéntricas; la precisión de la estimación de y , (\hat{y}), disminuye conforme aumenta la $Var(\hat{y})$ (Méndez, 1980).

Existen condiciones que determinan la rotabilidad de un diseño; sin embargo, no se abundará en este escrito sobre el tema, debido a que en la literatura ya existen modelos predefinidos para diversos valores de k (número de factores) que cumplen con esta condición (Cochran y Cox, 1957; Martínez, 1988;

Myers y Montgomery, 1995). Sólo se usará la teoría de su estimación para generar un proceso práctico que permita acceder e interpretar fácilmente a estos datos y se pueda, en forma sencilla, definir la precisión de una recomendación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el período de 1997 al 2000, se han conducido en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) alrededor de 50 experimentos sobre el cultivo de maíz de riego, en el ciclo otoño-invierno. En ellos se han incluido de tres a seis híbridos en un mismo experimento, de los cuales se ha seleccionado uno con las siguientes características. Se estableció en el estado de Chiapas (Villa Flores), con un diseño experimental en parcelas divididas con dos repeticiones; se analizaron los factores de manejo: nitrógeno (N), fósforo (P_2O_5), potasio (K_2O) y densidad de población (DP) dentro de un espacio de exploración que varió de 60 a 220 kg ha⁻¹ en N, de 0 a 160 kg ha⁻¹ en P_2O_5 , de 0 a 120 kg ha⁻¹ en K_2O y de 30 a 70 mil plantas por hectárea en DP. Con estos factores, se generaron tratamientos que conformaron las parcelas grandes (PG) del experimento, mismos que se seleccionaron de acuerdo con un **diseño compuesto central rotable**, lotificado a un tercio, con información casi homogénea (Cochran y Cox, 1957). Las parcelas chicas (PCh), correspondieron a los materiales genéticos de maíz que fueron: H-512, H-515 y H-516. Los algoritmos computacionales (Programas) para realizar la mayoría de los cálculos, se programaron con el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1985).

Modelo General

Se usó un modelo de segundo orden y la información resultante se analizó mediante técnicas de regresión (Montgomery y Peck, 1982), donde el rendimiento de grano se usa como variable respuesta y los factores de manejo y los genotipos, como variables predictoras; así, el modelo multiplicativo si se consideran tres híbridos y dos factores de manejo sería, por ejemplo:

$$y = \mu + w1 + w2 + N + P + NP + N^2 + P^2 + w1N + w1P + w1NP + w1N^2 + w1P^2 + w2N + w2P + w2NP + w2N^2 + w2P^2 + e$$

Los genotipos se incluyeron como variables "dummy", w1 y w2, y pueden asumir los valores de 0 y 1 dentro del modelo (Myers y Montgomery, 1995).

Codificación de Variables Predictoras

En la codificación de estas variables se usa la expresión: $x_i = (N_i - \tilde{N}_i)/S_i$, donde las x_i son las variables codificadas que representan a los factores nitrógeno (N), P_2O_5 (P), K_2O (K) y densidad de población (DP); las N_i son los niveles de cada factor, $\tilde{N}_i = (\text{nivel alto} + \text{nivel bajo})/2 = \text{nivel central}$ y S_i es la distancia entre dos niveles contiguos (Martínez, 1988; Cornell, 1990). Así se tiene que:

$$x_1 = (N - 140)/40; x_2 = (P - 80)/40; x_3 = (K - 60)/30 \text{ y } x_5 = (DP - 50)/10.$$

Variables "Dummy"

El caso más sencillo de estas variables, también llamadas **variables indicadoras**, es cuando sólo se usan dos genotipos dentro del modelo, pero en general si se considera que cada material genético es una clase, las variables "dummy" que pueden representar a estos materiales son: número de clases menos uno; esto es, si una variable "dummy" toma los valores de 0 y 1 (según sea el caso), para K genotipos o clases se tendrán $K-1$ variables "dummy", que formarán un vector w de elementos 0 y 1, mismo que representará a un genotipo de acuerdo con el orden de los valores en el vector. Por ejemplo, para el caso de tres híbridos estudiados en el presente trabajo:

Genotipo	Elementos de la matriz W	
	w1	w2
H-512	1	0
H-515	0	1
H-516	0	0

Esta asignación no es única, pero hacerlo así permite referenciar la respuesta de todos los genotipos en función de uno (Allen, 1984; Myers y Montgomery, 1995).

Selección de Variables

Para trabajar con un modelo menos complicado respecto al número de elementos y eliminar posibles

efectos negativos por multicolinealidad entre ellos, se usaron las técnicas de selección de variables **Backward** (Draper y Smith, 1982) y **Maxr** (Barr y Goodnight, 1972).

Rotatividad

Este concepto no se restringe a modelos de segundo orden, aun cuando la mayoría de los trabajos que lo incluyen se han hecho con estos modelos. Así, para un punto de coordenadas (x_1, x_2, \dots, x_p) , $\rho = (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_p^2)^{1/2}$, es la distancia del punto al centro del diseño; entonces, si se considera una respuesta de primer orden estimada con un diseño ortogonal, se tiene que:

$$\hat{y} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 x_1 + \hat{a}_2 x_2 + \dots + \hat{a}_p x_p$$

y

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{y}) &= \text{Var}(\hat{a}_0) + \text{Var}(\hat{a}_1) x_1 + \text{Var}(\hat{a}_2) x_2 + \dots + \\ &\text{Var}(\hat{a}_p) x_p \\ &= (\sigma^2/n) (1 + x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_p^2) \\ &= (\sigma^2/n) (1 + \rho^2); \quad \rho^2 = \sum_{i=1}^p x_i^2 \end{aligned}$$

Una forma más general, incluso para un diseño no ortogonal, es:

$$\text{Var}(\hat{y}) = \mathbf{x}' (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{x} * \sigma^2$$

Donde \mathbf{x} es el vector de coordenadas del punto y \mathbf{X} es la matriz modelo con la primera columna de unos para la estimación de la ordenada al origen; para un solo punto coordinado \mathbf{x}' la expresión $\mathbf{x}'(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{x}$, es un escalar que multiplica a σ^2 (CME), de donde resulta el valor final de la $\text{Var}(\hat{y})$ en ese punto coordinado. La dificultad que se ha tenido para el uso de esta teoría, es el cálculo de la inversa de $\mathbf{X}'\mathbf{X}$ cuando el número de términos de la ecuación de regresión resultante es muy grande y la matriz modelo no es totalmente ortogonal (Martínez, 1988; Myers y Montgomery, 1995).

Análisis Económico

Se realizó el análisis económico a partir de la producción de grano, usando el método computacional iterativo propuesto por Martínez (1987). Estos resultados coinciden perfectamente con los procedimientos teóricos de optimización de insumos y maximización de beneficios de un análisis económico de la producción (Doll y Orazen, 1984). El

Programa 1 del apéndice realiza este proceso, calcula el ingreso neto más el costo fijo de producción, para valores de N que van de 60 a 220 kg de N ha⁻¹; de P que van de 0 a 160 kg de P₂O₅ ha⁻¹, espaciados ambos a cada cinco unidades; de K que van de 0 a 120 kg de K₂O ha⁻¹, espaciado cada cuatro unidades y DP que explora de 30 a 70 mil plantas ha⁻¹, espaciado cada 2 mil unidades. Este algoritmo también puede adaptarse a un mayor número de factores con cualquier función de respuesta, su límite es la capacidad y velocidad del equipo de cómputo, por la cantidad de puntos experimentales que puede explorar. En este caso, se usan los costos en moneda nacional de: 5.5/kg de N, 6.0/kg de P₂O₅, 6.0/kg de K₂O y 9.07/mil plantas; si el costo variable (CV) = 5.5*N+6*P+6*K+9.07*DP+250*ŷ, donde 250*ŷ se refiere al costo del desgrane por tonelada y el precio del grano de maíz es de 1500 t⁻¹, entonces el ingreso total (IT) = 1500*ŷ; por lo tanto, el ingreso neto (IN) = IT-CV.

Restricción al Cálculo de Óptimos

Los resultados del Programa 1 del apéndice, dan óptimos económicos; pero si la línea, Proc sort; by descending IN; se cambia por: Proc sort; by descending ŷ; ahora el resultado es un óptimo fisiológico y explora el máximo rendimiento por híbrido (ŷ), que estima el modelo resultante. Entonces, si se compara este rendimiento máximo estimado con el promedio de los dos rendimientos máximos observados (M2) por híbrido en el experimento, es posible que la ŷ supere a M2; esto se observa en el Cuadro 1, donde se presentan resultados de tres experimentos evaluados en forma similar; aquí, ocho de 10 valores máximos de ŷ en los híbridos, rebasan a M2. Esto indica la necesidad de acotar el espacio de respuestas estimadas, a lo máximo observado en el experimento, de tal forma que al calcular óptimos con el Programa 1, la ŷ de ellos no rebase a M2. Por lo tanto, al Programa 1 del apéndice es necesario anexarle la instrucción: if ŷ <= M2 then output; data tres; set dos; después de la línea 14 del mismo Programa 1.

Cálculo de la Var(ŷ)

Por definición: $\text{Var}(\hat{y}) = \mathbf{x}'(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{x} * \sigma^2$, donde σ^2 es el cuadrado medio del error experimental (CME) y a $\mathbf{x}'(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{x}$, se le llamará coeficiente de varianza [$CV(\hat{y})$]; entonces, si se quiere predecir o determinar

Cuadro 1. Valores máximos de \hat{y} para híbridos de maíz, comparados con rendimientos máximos observados (M2) en cada uno de ellos, en tres experimentos.

Exp	Híbrido	ρ	N	P	K	DP [†]	\hat{y}	M2
Villa Flores, Chiapas	H-512	3.93402	215	160	0	70	8.79493	7.957
	H-515	0.82249	165	90	52	54	9.61328	9.646
	H-516	3.99511	220	160	120	70	12.54420	11.089
Piedras Negras, Veracruz	H-512	3.48463	175	0	120	70	6.02769	5.7896
	H-515	3.83170	60	160	120	68	5.95465	5.8312
	H-516	3.49164	60	0	120	56	6.24893	6.5949
Chetumal, Quintana Roo	H-512	4.15922	220	0	120	70	12.76470	6.3670
	H-515	3.85508	220	130	0	70	8.71680	6.2091
	H-516	3.85508	220	130	0	70	7.46365	6.7206
	C-343	3.85508	220	130	0	70	9.34551	6.6168

[†] Densidad de población.

la $Var(\hat{y})$ de un punto coordenado $x'=(x_1, x_2, x_3, x_4)$, ésta puede obtenerse con los programas realizados con el paquete estadístico SAS, que se presentan a continuación, donde ya se usan los datos del experimento que se seleccionó.

Selección del mejor modelo y obtención de la inversa de $X'X$. Se inicia con un proceso de selección de variables en el cual puede utilizarse cualquier método de los que ya existen (forward, stepwise, backward o maxr); sin embargo, cada método selecciona un modelo distinto y en función de lo que se quiera, se utilizará uno u otro; los tres primeros tal y como los genera SAS, resultan muy cortos (con pocos términos) para los propósitos del presente estudio, porque aun cuando evitan problemas de multicolinealidad, los hace rígidos al tener menos elementos (factores) que se pueden hacer variar. Los métodos **maxr** y **backward** con nivel de significancia para permanecer en el modelo de 0.20, definen modelos muy similares y con mayor número de elementos, lo cual los hace más flexibles; sin embargo, obtener la inversa a partir del método **maxr**, implica pasos adicionales que se evitan al usar **backward**, con la ventaja de que en **maxr**, es posible obtener un mejor modelo en función del CME, evitando problemas de multicolinealidad, lo cual puede hacerse si se observa que los indicadores de este problema, no rebasan los límites permitidos. Al usar **backward** esto no es necesario, dado que el modelo final es resultado del propio método y no depende de criterios que el investigador tenga que aplicar. La inversa se obtiene del modelo resultante (reducido) de esta selección de variables.

Para obtener la inversa con el método **maxr**, con procedimientos del SAS se genera todo el proceso a partir del modelo completo (Programa 2 del apéndice), para posteriormente elegir el mejor modelo reducido que tenga el menor CME y el mayor R^2 , sin dejar de observar el número de condición límite (**bounds condition number**) que son indicadores de multicolinealidad; un límite superior mayor que 1000 indica fuertes problemas de este tipo (Montgomery y Peck, 1982; Weissfeld, 1989).

Seleccionado el modelo que cumple con estas características, se repite el proceso de regresión, pero ahora en la definición de **model** se utilizará el modelo reducido (ya seleccionado) en lugar del modelo completo; en este paso ya se sabe que el modelo final que resulte de todo el proceso será el mismo modelo que ya se seleccionó con anterioridad y del que se quiere la inversa, la cual puede obtenerse con la ejecución de este mismo Programa 2. Con el método **backward**, el proceso selecciona automáticamente el mejor modelo y en la misma ejecución de este procedimiento puede obtenerse la inversa de $X'X$ del modelo resultante. El Programa 2 muestra cómo se realiza en SAS los dos métodos. Se consideró un modelo de segundo orden con dos variables indicadoras que representan a los tres híbridos de maíz.

Este método genera tantos modelos como variables existan más todas las combinaciones posibles, pero en este caso sólo se usan los de segundo orden; por lo tanto, se elige el mejor en función de los criterios ya mencionados y se ejecuta de nuevo el mismo

programa, pero ahora con el modelo ya seleccionado y con la Opción I, que permita obtener la inversa.

```
Model yg = w1 x1 x4 x2*x2 x1*x2 x3*x4 w1*x4
w1*x1*x1 w1*x3*x4 w2*x3 w2*x1*x1
w2*x2*x2 w2*x3*x3 w2*x4*x4 w2*x2*x3 /
selection=Maxr I; print I;
yg = variable respuesta.
```

Con el método **backward**, ampliando la significancia de permanencia en el modelo a 0.20, es posible generar un modelo adecuado para este estudio, si en el primer proceso donde se usa el modelo completo, se sustituye la instrucción **backward sls=0.2 I; Print I;** en lugar de **maxr**.

Puntos coordenados a lo largo de ρ . Son puntos (vectores x') dentro del espacio de exploración, que inician del centro hacia la periferia del diseño en cualquier dirección, que requiere la expresión $x'(X'X)^{-1}x$ que se ha llamado **coeficiente de varianza**. Puede usarse un solo vector si ya se tiene un punto óptimo, o definir todo un perfil, distribuido a lo largo del radio (ρ). En este caso, dado que los factores utilizados en este estudio son fertilizantes con densidad de población, un punto coordinado representa una dosis óptima económica, DOE, de cualquier híbrido incluido en el estudio. El Programa 3 de SAS (apéndice), calcula todos los puntos coordenados para un valor creciente de ρ . La ruta que se siguió fue la de máximo ascenso, pero pudo utilizarse cualquiera, dado que se está hablando de hiperesferas que conforman el espacio de exploración. La senda de máximo ascenso para cada factor se define con: $X_i = \rho * \alpha_i / (\sum_{i=1} \alpha_i^2)$, donde las α_i son los coeficientes de regresión de las variables codificadas. Esta expresión se integró en el Programa 3 del apéndice, para indicar la dirección que puede tomar ρ . El resultado de este programa es una matriz de puntos coordenados, x' , obtenidos con valores de ρ que van de cero a cuatro con incrementos de 0.2 que genera 21 puntos dentro de ese rango para cada híbrido. Con la inversa y los puntos coordenados x' , es posible realizar el cálculo de $x'(X'X)^{-1}x$ con el Programa 4 de SAS (apéndice), que se presenta con datos del experimento que se está manejando.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ecuación de Regresión

La ecuación de regresión resultante que se presenta fue generada por el Programa 2 del apéndice

usando el procedimiento **Proc Reg** del paquete estadístico SAS:

$$\hat{y} = 9.41562 + 0.485701 n + 0.256009d + 0.088315 p^2 + 0.106424 np + 0.218257 kd - 2.518367 w_1 + 0.14876 dw_1 - 0.191546 n^2w_1 - 0.244001 kdw_1 - 0.211103 kw_2 - 0.45399 n^2w_2 + 0.321253 p^2w_2 - 0.37685 k^2w_2 - 0.325918 d^2w_2 - 0.184605 pkw_2$$

Prob>F = 0.0001, $R^2 = 74\%$, Números de la condición límite = 1.68 y 522.58

\hat{y} = rendimiento de grano estimado en t ha⁻¹, $n = (N-140)/40$, $p = (P-80)/40$; $k = (K-60)/30$; $d = (DP-50)/10$.

Donde: n , p , k y d son variables que codifican al: N, P₂O₅, K₂O y DP, respectivamente; w_1 y w_2 , son variables indicadoras que representan a los híbridos: H-512, H-515 y H-516.

En el Cuadro 2, se presenta la ecuación que resulta para cada híbrido en función de los factores significativos. Exponer de esta forma la ecuación de regresión, permite observar con claridad las diferencias de respuesta que cada híbrido tiene para cada uno de los factores en estudio; por ejemplo, en el centro del diseño, el H-516 rinde 9.41562 t ha⁻¹, al igual que el H-515; sin embargo, el H-512 en este mismo punto rindió 2.51836 t ha⁻¹ menos. De la misma forma, también el H-516 y el H-512 no tienen respuesta a la aplicación de k (K₂O); en cambio, el H-515 sí presenta una respuesta negativa (significativa a 20 %) a la aplicación de este insumo; de igual manera pueden observarse las diferentes respuestas de los híbridos en evaluación.

Al analizar las respuestas individuales de cada híbrido, se refleja que sus ecuaciones de regresión son muy diferentes entre sí, lo cual implica diferente estructura en su matriz modelo resultante (X). Este resultado infiere también diferencias importantes en los valores que resulten de la expresión $x'(X'X)^{-1}x$, que es una componente de la $Var(\hat{y})$.

Los resultados del Programa 4 del apéndice se presentan en el Cuadro 3, donde de cada híbrido se obtuvo un **perfil de varianza** a diferentes ρ . En este caso, la distancia varió de 0.0 a 4.0, con incrementos de 0.2, lo cual da un total de 21 observaciones que permiten observar en este ámbito, los cambios que la expresión $x'(X'X)^{-1}x$ tiene en función de cada híbrido y cómo para un mismo valor de ρ , el valor de esta expresión es diferente, lo cual finalmente expresará diferencias importantes en la $Var(\hat{y})$. Cuando se

Cuadro 2. Ecuación de regresión desglosada por híbrido de maíz.

Híbridos y valores de w_1 y w_2 que los representan		
H-512 ($w_1=1, w_2=0$)	H-515 ($w_1=0, w_2=1$)	H-516 ($w_1=0, w_2=0$)
-2.518367 w_1 ***		9.415620 ***
	-0.211103 kw_2 +	0.485701 n ***
0.148760 dw_1 ++		0 k
-0.191546 n^2w_1 +	-0.453990 n^2w_2 ***	0.256009 d ***
	-0.321253 p^2w_2 ***	0 n^2
	-0.376854 k^2w_2 ***	0.088315 p^2 ++
	-0.325918 d^2w_2 ***	0 k^2
	0.184605 pkw_2 ++	0 d^2
		0.106424 np ++
		0 pk
-0.244001 kdw_1 ++		0.218257 kd *

$n = (N-140)/40$; $p = (P-80)/40$; $k = (K-60)/30$; $d = (DP-50)/10$. N es dosis de nitrógeno en kg ha⁻¹; P es dosis de fósforo en kg de P₂O₅ ha⁻¹; K es dosis de potasio en kg de K₂O ha⁻¹; DP es densidad de población en miles de plantas*ha⁻¹; El hiperespacio de exploración es: 60 < N < 220) * (0 < P < 160) * (0 < K < 120) * (30 < DP < 70).

La significación estadística se representa: *** para 10⁻³; ** para 0.01; * para 0.05; ++ para 0.1 y + para 0.2.

obtengan las DOE de cada híbrido, en el mismo programa puede definirse el ρ de ellas (DOE) y con esta información será fácil determinar que DOE tiene una mayor $Var(\hat{y})$ y, por lo tanto, mayor imprecisión.

Análisis Económico

Con el procedimiento ya descrito, se calcula la dosis óptima económica (DOE) de cada híbrido que se presentan en el Cuadro 4. Los resultados reflejan un problema porque la ρ de estas DOE es de tal magnitud que, por ejemplo, para el H-512 significa tener un coeficiente de varianza [CV(\hat{y})] de 1.4 (observar Cuadro 3, ponderado de $\rho=3.4$ y $\rho=3.6$), valor que al multiplicarse con la σ^2 del experimento, aumenta en esa proporción la $Var(\hat{y})$ de la DOE de este híbrido. En el caso del H-516, a pesar de que la ρ de su DOE está en los límites de su espacio de exploración ($\rho = 4.0$), el valor de su coeficiente de varianza es menor que 0.15, lo cual significa que la $Var(\hat{y})$ en este punto, no será más de 15% de la σ^2 del experimento y se tendrá un amplio margen de confiabilidad de la predicción. Estas diferencias se dan, por que cada híbrido tiene un perfil de varianza diferente a lo largo de ρ que depende de la estructura de su ecuación de regresión; esta ecuación, a su vez, define a la matriz modelo X.

Estos resultados indican que sería imposible definir un valor previo de ρ que se asocie a coeficientes de varianza bajos y constantes, que no eleven la $Var(\hat{y})$ de la DOE de cada híbrido. Por lo tanto, es necesario calcular primero el perfil de varianza individual, para elegir el coeficiente

requerido (\leq a 0.5, en este caso). Hecho esto, se define el valor de ρ asociado a este coeficiente y se utiliza como condición en el cálculo de las DOE. Esta elección garantiza que la $Var(\hat{y})$ de la DOE no rebase 50 % de la σ^2 del experimento y puede cambiarse a criterio del investigador. En la práctica, puede decirse que para el H-512, la ρ no debería de rebasar el valor de 2.6 ó 2.7, al igual que para el H-515. Para el H-516 como no se encontraron coeficientes de varianza que

Cuadro 3. Perfil de varianza por híbrido, valores que multiplicados a la σ^2 del experimento definen la $Var(\hat{y})$ de las DOE. Maíz/riego, Villa Flores, Chiapas. 1997/1998.

ρ (Ro)	Coeficientes de varianza		
	H-512 (HIB1)	H-515 (HIB2)	H-516 (HIB3)
0.0	0.0343105	0.0174381	0.0174381
0.2	0.0338478	0.0174204	0.0177527
0.4	0.0326134	0.0175312	0.0186960
0.6	0.0312077	0.0182671	0.0202679
0.8	0.0306275	0.0204543	0.0224684
1.0	0.0322732	0.0252506	0.0252975
1.2	0.0379463	0.0341432	0.0287552
1.4	0.0498467	0.0489489	0.0328416
1.6	0.0705777	0.0718189	0.0375565
1.8	0.1031448	0.1052346	0.0429000
2.0	0.1509474	0.1520009	0.0488724
2.2	0.217797	0.2152647	0.0554731
2.4	0.3078903	0.2984887	0.0627024
2.6	0.4258454	0.405485	0.0705603
2.8	0.5766556	0.5403733	0.0790468
3.0	0.7657461	0.707631	0.0881619
3.2	0.9989313	0.9120553	0.0979060
3.4	1.2823974	1.1587503	0.1082783
3.6	1.6227506	1.4531667	0.1192792
3.8	2.0270686	1.8011438	0.1309088
4.0	2.5026629	2.2087131	0.1431673

Cuadro 4. Resultados del análisis económico sin la restricción de ρ .

Genotipo	Dosis óptima económica			DP	\hat{y}	ρ	M2
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O				
		kg ha ⁻¹		M pl ha ⁻¹	t ha ⁻¹		t ha ⁻¹
H-512	115	0	0	70	7.913	3.47	7.957
H-515	155	75	48	52	9.560	0.60	9.646
H-516	220	0	0	30	10.677	4.00	11.089

DP = densidad de población; M pl ha⁻¹ = miles de plantas por hectárea; \hat{y} = rendimiento de grano (estimado con el modelo); M2 = promedio de los dos rendimientos máximos observados de cada híbrido en el experimento.

Cuadro 5. Resultados del análisis económico con las restricciones: $\rho \leq 2.7$ en H-512, $\rho \leq 2.7$ en H-515, $\rho \leq 4.0$ en H-516.

Genotipo	Dosis óptima económica			DP	\hat{y}	ρ	M2
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O				
		kg ha ⁻¹		M pl ha ⁻¹	t ha ⁻¹		t ha ⁻¹
H-512	140	0	36	66	7.927	2.68	7.957
H-515	155	75	48	52	9.560	0.60	9.646
H-516	215	0	0	30	10.643	3.94	11.089

DP = densidad de población; M pl ha⁻¹ = miles de plantas por hectárea; \hat{y} = rendimiento de grano (estimado con el modelo); M2 = promedio de los dos rendimientos máximos observados de cada híbrido en el experimento.

se acerquen al 0.5, podría no condicionarse con esta restricción, dado que el valor máximo de $\rho=4.0$, se asocia a un coeficiente de varianza igual a 0.143167, lo cual indica que la $Var(\hat{y})$ de la DOE de este híbrido tendrá un valor máximo de 14.3% de la σ^2 del experimento.

Los resultados del análisis económico con esta restricción se muestran en el Cuadro 5. Aquí se observa que las soluciones de cada híbrido (DOE) tienen definida también su distancia al centro del diseño, ρ . Esta distancia servirá para ubicar el valor que le corresponde en el cuadro de perfiles de varianza; esto es, que para el H-512 con $\rho = 2.68$, su coeficiente de varianza está entre 0.4258454 para un $\rho=2.60$, y de 0.5766556 para un $\rho=2.80$, que interpolando da un valor cercano al 0.5 que se ha decidido permitir para el ρ de la DOE del H-512. El coeficiente de varianza del H-515 es de 0.0182671 para un $\rho=0.60$ y del H-516 de 0.1431673 para un $\rho=4.0$.

Lo anterior implica que será el investigador, después de que realice el análisis del perfil de varianza de cada híbrido, él que determine hasta dónde debe llegar el valor de ρ , condición que puede incluirse en el mismo Programa 1. Ahora en lugar de la restricción, if $\hat{y} \leq M2$ then output; data tres; set dos; se pondría, if $\hat{y} \leq M2$ and $\rho \leq 2.7$ then output; data tres; set dos; instrucción que ejemplifica cómo se usa en el cálculo de la DOE del H-512. Para los demás híbridos se hará con su respectivo valor de ρ . En este

experimento la $\sigma^2 = 0.689738$ (t ha⁻¹)², lo cual quiere decir que:

$$\begin{aligned} Var(\hat{y})_{DOE(H-512)} &= 0.500000 * 0.689738 = 0.344869 \text{ (t ha}^{-1}\text{)}^2 \\ Var(\hat{y})_{DOE(H-515)} &= 0.018267 * 0.689738 = 0.012599 \text{ (t ha}^{-1}\text{)}^2 \\ Var(\hat{y})_{DOE(H-516)} &= 0.143167 * 0.689738 = 0.098748 \text{ (t ha}^{-1}\text{)}^2 \end{aligned}$$

En general, el coeficiente de varianza puede interpretarse como una proporción de σ^2 que tendrá la varianza de la \hat{y} de la DOE de cada híbrido ($Var(\hat{y})_{DOE}$), al mismo tiempo también estará reflejando la precisión de cada DOE, que en términos generales será mayor para el H-515, seguida del H-516 y finalmente del H-512.

CONCLUSIONES

- En términos de los valores de la $Var(\hat{y})_{DOE}$: la recomendación de DOE del híbrido de maíz H-515 es más precisa que la del H-516, seguida finalmente del H-512.
- El perfil de varianza puede ser usado, para definir *a priori* la fracción de la σ^2 (coeficiente de varianza) que se quiera permitir en la $Var(\hat{y})_{DOE}$ de híbridos evaluados en diseños centrales rotatables, que en este trabajo fue de 50%.
- Las restricciones en el análisis económico: $\hat{y} < M2$ y que ρ esté asociado a un coeficiente de varianza menor o igual a 0.50; es necesario incluirlas para evitar que los rendimientos estimados de las DOE,

rebasen los máximos rendimientos observados en el experimento por cada híbrido y que ρ se asocie a un valor grande, que al multiplicar la σ^2 , en lugar de disminuir la $Var(\hat{y})_{DOE}$, la aumente a valores no confiables.

LITERATURA CITADA

- Allen, E.L. 1984. An introduction to linear regression and correlation. 2ª ed. University of Washington, W.H. Freeman. New York.
- Barr, J.A. y J.H. Goodnight. 1972. SAS: A user's guide to the Statistical Analysis System. North Carolina State University. Raleigh, NC.
- Box, G.M. y J.S. Hunter. 1957. Multifactor experimental design for exploring response surfaces. *Ann. Math. Stat.* 28: 195-241.
- Cochran, W.G. y G.M. Cox, 1957. *Experimental designs*. John Wiley. New York.
- Cornell, J.A. 1990. How to apply response surface methodology. American Society for Quality Control. Milwaukee, WI.
- Doll, J.P. y F. Orazen. 1984. *Production economics. Theory with applications*. 2a ed. John Wiley. New York.
- Draper, N.R. y H. Smith. 1982. *Applied regression analysis*. 2a edition. John Wiley. New York.
- Martínez G., A. 1987. Aspectos económicos del diseño y análisis de experimentos. 1a edición. LIMUSA. México, D.F.
- Martínez G., A. 1988. Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría. Primera edición. TRILLAS. México, D.F.
- Méndez R. I. 1980. Metodología de superficie de respuesta. Comunicaciones técnicas. IIMAS. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Montgomery, D.C. y E.A. Peck. 1982. *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley. New York.
- Myers, R.H. y D.C. Montgomery. 1995. *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. John Wiley. New York.
- SAS Institute. 1985. *SAS User's guide for personal computers*. Verslon 6. Cary, NC.
- Weissfeld, L.A. 1989. A multicollinearity diagnostics for models fit to censored data. *Commun. Statist.* 18(6): 2073-2085.

SITUACIÓN SOCIOECONÓMICA DE LOS PRODUCTORES DE FRIJOL DE TEMPORAL EN ZACATECAS

Socioeconomic Situation of the Seasonal Bean Producers in Zacatecas

Héctor Pérez Trujillo¹ y Guillermo Galindo González^{1†}

RESUMEN

En el estado de Zacatecas se desconoce la situación social y económica de los productores de frijol de temporal. Por lo anterior, durante 1999, se realizó un estudio para lo cual se establecieron tres regiones potenciales para el cultivo del frijol (alto, mediano y bajo). En cada una de éstas se determinó un tamaño de muestra, tomando como marco de muestreo el número de productores inscritos en el Programa de Apoyos al Campo, en 1998. La recopilación de la información se obtuvo aplicando un cuestionario compuesto de preguntas cerradas y abiertas. Los resultados muestran que existen factores limitativos climatológicos, biológicos y de comercialización que frenan la producción de esta leguminosa, que representa la actividad principal de miles de productores del campo zacatecano. A pesar de lo anterior, los agricultores tienen el deseo de seguir sembrándola y de combinar esta actividad con la ganadería. También, se determinó que el uso de tecnología en este cultivo es mayor en la zona de alto potencial, enseguida en la de mediano y finalmente en la de bajo potencial. La utilidad que obtienen los productores dedicados a este cultivo es baja, principalmente en las zonas de mediano y bajo potencial.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., *transferencia*, *extensión*, *desarrollo de tecnología*.

SUMMARY

In the state of Zacatecas, Mexico, the socioeconomic situation of producers of rainfed dry beans is unknown. In 1999, a study was carried out in which high, medium and low potential regions of dry

bean cultivation were established. In each of the three regions, a sample size was determined, considering the number of farmers registered in an aid program for agriculture (Programa de Apoyos al Campo) in 1998. A questionnaire with open and closed questions was implemented to gather the data. The results show that there are limiting climatic, biological, and commercial factors that hinder production of this legume, the main occupation for thousands of farmers in Zacatecas. Despite the adverse situation, dry bean growers still have the desire to keep planting this crop and combine it with livestock-raising. Use of technology was found to be greater in the high potential region, lower in the medium potential zone, and finally the lowest in the low potential zone. In this area, the benefits are low for the producers of dry beans, especially in the medium and low potential regions.

Index words: *Phaseolus vulgaris* L., *technology transfer*, *extension*, *technology development*.

INTRODUCCIÓN

En México, el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) ocupa el segundo lugar en cuanto a la superficie cultivada anualmente, aproximadamente 2 203 000 ha; de esta área, 87% es de temporal; la producción anual de esta leguminosa es de alrededor de 1 237 000 Mg (Ortiz, 1998). Son cinco las entidades (Zacatecas, Sinaloa, Durango, Nayarit y Chihuahua) que concentran 63.5% de la superficie sembrada y producen 65.3% del total del país.

Específicamente durante 1998, en Zacatecas se sembraron 726 456 ha de frijol, de las cuales se cosecharon 708 322, con una producción de 330 175 Mg de grano con un valor de \$1 334 510 425 (SAGAR, 1998). De la superficie indicada, 96% se cultivó en condiciones de temporal y 4% con riego. El rendimiento medio de frijol obtenido con riego es de 2143 kg ha⁻¹ y en temporal de 538 kg; esta producción se considera baja, ya que estudios realizados revelan que es posible obtener rendimientos promedio de 2715 kg ha⁻¹ con riego y de 726 kg ha⁻¹ en temporal (SARH, 1993).

¹ Campo Experimental Zacatecas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 18, 98500 Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México. Tel y Fax: 01(478) 985-03-63. † (galindogg_mx@yahoo.com.mx)

Un factor limitativo para la instrumentación de una estrategia que permita incrementar la producción de frijol en el estado, es el desconocimiento de las características de los productores (sociales, económicas y de otras relacionadas con sus unidades de producción).

Con el objetivo de caracterizar a los productores de frijol que siembran en temporal y determinar la relación que existe entre diferentes variables socioeconómicas, el presente estudio se realizó, además, para conocer los problemas que enfrenta este grupo de agricultores: su tenencia de la tierra, su deseo por seguir cultivando frijol, cultivos que les gustaría explotar aparte del frijol, próximamente a qué les gustaría dedicarse y cuál es la tecnología que emplean en el cultivo del frijol.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con base en la regionalización efectuada por Ortiz (1998) para el cultivo del frijol en temporal en el estado de Zacatecas, se determinaron tres regiones potenciales para esta leguminosa: alto (I), medio (II) y bajo (III); la Región I se ubica en la parte noreste del estado, la Región II en el centro y la Región III en el sureste. Las regiones con igual potencial agroclimático para el cultivo del frijol (alto, medio y bajo) se determinaron utilizando variables de: precipitación, temperatura, evapotranspiración para cada 10 días, además de la fecha de la primera helada, el cociente precipitación- evaporación y la altitud. En el Cuadro 1 se presenta una caracterización agroclimática de estas regiones.

Como marco de muestreo, se tomó el número de productores de frijol inscritos en el Programa de Apoyos al Campo (PROCAMPO) durante 1998, que fueron: 17 726, 24 315 y 20 772 para las Regiones I, II y III, respectivamente.

Para determinar el tamaño de la muestra, se aplicó la siguiente fórmula:

$$n = N/Nd^2 + 1$$

Donde: n = tamaño de la muestra; N = población; y d = precisión (0.1).

La ecuación se aplicó para calcular el tamaño de la muestra en las tres regiones establecidas, dando por resultado 99 unidades de producción en cada región; éstas se distribuyeron proporcionalmente entre los municipios que integran las regiones potenciales para el cultivo de frijol, de acuerdo con el número de

productores inscritos en el PROCAMPO durante 1998. Para la selección de los productores a entrevistar, se utilizaron números aleatorios, con la finalidad de que todos tuvieran la misma probabilidad de ser seleccionados.

Se diseñó y validó un cuestionario compuesto de 34 preguntas (30 cerradas y cuatro abiertas) en el cual se recopiló información sobre las siguientes variables: sociales (edad, escolaridad, años de vivir en la zona, años de ser agricultores y años de cultivar frijol en temporal), relativas a la unidad de producción (superficie cultivada con frijol por los productores, superficie cultivada con frijol por los ejidatarios, rendimiento obtenido de frijol, porcentaje de grano de frijol comercializado, tiempo empleado en actividades agropecuarias, participación de las esposas, número de hijos que les ayudan y que nos les ayudan, número de trabajadores fijos y empleados temporales, número de semanas que contratan anualmente a trabajadores temporales y superficie cultivada con otros cultivos) y económicas (precio de venta del frijol, costo del cultivo de frijol de temporal, porcentaje de cosecha de otros cultivos que se comercializan, precio de venta de otros cultivos, utilidad anual para la cría de animales, ingresos económicos de los agricultores, ingresos económicos de los agricultores además de las actividades agropecuarias, e ingresos económicos por la ayuda de parientes y otros); además, para determinar su tipo de tenencia de la tierra, los problemas que enfrentan, su deseo de seguir

Cuadro 1. Valores medios para variables agroclimáticas en zonas homogéneas para el cultivo del frijol en Zacatecas.

Variable	Zonas potenciales		
	I (Alto)	II (Medio)	III (Bajo)
Temperatura máxima(media anual) (°C)	28.3	26.4	24.7
Temperatura mínima (media anual) (°C)	12.9	11.7	11.2
Unidades calor de la segunda decena de junio (UC)	116	109	105
Unidades calor de la segunda decena de octubre	94	86	82
Precipitación acumulada para la segunda decena de julio (mm)	94	38	36
Precipitación acumulada en la primera decena de septiembre (mm)	28	22	23
Cociente precipitación/ evaporación	0.69	0.56	0.59
Altitud media (m)	1848	2070	2294
Día juliano de la primera helada	308	309	304

Fuente: Ortiz, 1998.

cultivando frijol, qué otros cultivos atienden, qué actividades pecuarias realizan, qué otros cultivos les gustaría explotar, a qué les gustaría dedicarse próximamente y el uso de tecnología en el cultivo del frijol.

Para la aplicación del cuestionario, se seleccionó a un grupo de extensionistas que laboraban en el Programa Elemental de Asistencia Técnica, a quienes se les capacitó previamente. La encuesta se llevó a cabo en el último trimestre de 1999 y se realizó de manera individual a cada uno de los productores seleccionados.

Para conocer la relación entre las variables establecidas, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson, el cual tiene como objeto determinar la interdependencia de dos series independientes (Bhattacharyya, 1977). Para aceptar o rechazar la hipótesis nula (H_0 : no existe correlación entre X y Y), se aplicó la razón de t (de Student), con significancia de 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Edad

Se determinó en la Región I que 47.47% de los productores entrevistados son mayores de 50 años, en la Región II 49.49% y en la Región III 71.71%, con una media en las tres regiones igual a 52.4 años; esto indica que las actividades del campo las realizan los que tienen la edad más avanzada. Sobre esta variable, Reyna *et al.* (1981) concluyeron que los productores agrícolas que aplican innovaciones en sus cultivos son en promedio más jóvenes que quienes no las adoptan; además, Galindo (1992) determinó que esta variable está relacionada en forma negativa con la exposición a los medios de comunicación, la relación con casas comerciales que distribuyen productos para el campo y los agentes de cambio que prestan asistencia técnica. En el presente estudio, se determinó que, en las tres regiones, la edad está relacionada positivamente con los años que tienen los productores de vivir en la zona donde radican y con los años de cultivar frijol de temporal; en las Regiones I y II con los años que tienen de ser agricultores y en la Región II, con el número de trabajadores fijos que emplean.

Escolaridad

Aproximadamente 20% de los productores entrevistados de la Región I no asistieron a ningún

plantel de enseñanza formal, y también 30% de los que radican en las Regiones II y III. En la Región I, 62.62% cursó sólo entre el primer y tercer año de educación primaria. En las Regiones II y III, 64.64% asistieron entre primer y sexto grado, lo que revela que en las Regiones II y III, el grado de escolaridad es mayor que en la Región I. Sólo en la Región III, se encontró correlación positiva entre la escolaridad y el rendimiento obtenido en otros cultivos. Sobre el uso de tecnología, Rogers y Svenning (1973) y Álvarez *et al.* (1985) comentaron que la escolaridad influye significativamente en la adopción de innovaciones, lo cual resulta una limitante por parte de los frijoleros zacatecanos para el uso de nuevas innovaciones.

Años de Vivir en la Zona Donde Radican

Se observó que 28.28% de los productores de la Región I tienen entre 41 y 50 años de vivir en la zona; dentro del rango señalado se encuentra 25.25% de los entrevistados en la Región II. En la Región III, 31.31% de éstos tienen entre 61 y 70 años. En las tres regiones estudiadas, la media osciló entre 46.9 y 51.6 años. Con estos datos se supone que la mayoría de los agricultores son originarios del lugar donde radican. En la Región I, se encontró correlación positiva entre los años que tienen los agricultores de vivir en la zona donde radican y los años de cultivar frijol en temporal; en la Región II, con los años de ser agricultores y los años de cultivar frijol en temporal, al igual que en la Región III.

Años de Ser Agricultor

Se determinó en la Región I que 46.46% de los agricultores tienen más de 30 años de dedicarse a las actividades del campo, en la Región II, 53.53% y en la Región III, 67.67%. Lo anterior muestra que la mayoría de los entrevistados se han dedicado gran parte de su vida a realizar actividades agrícolas. El promedio de tiempo que los productores han trabajado la tierra es más alto en la Región II (46.36 años), enseguida en la Región III (35), y finalmente en la Región I (31.31). Con relación a los años que tienen los productores de dedicarse a la agricultura y las demás variables, se determinó que en la Región I ésta se asocia positivamente con los años de cultivar frijol en temporal y negativamente con el número de trabajadores fijos empleados; en las Regiones II y III de manera positiva con los años de cultivar frijol en temporal.

Años de Cultivar Frijol en Temporal

Por lo que respecta a los años que tienen los productores de cultivar frijol en temporal, se observó en la Región I que el mayor porcentaje (20.20%) tiene entre 11 y 20, en la Región II: 32.32% entre 21 y 30 años, y en la Región III: 26.26% entre 41 y 50 años. En las Regiones I, II y III, el promedio de años de cultivar esta leguminosa fue de 29.26, 31.80 y 33 años, respectivamente. En las Regiones I y III, estos resultados coinciden con los años que tienen los entrevistados de ser agricultores, lo que indica que han practicado este cultivo desde que se iniciaron en la agricultura; además, los entrevistados afirmaron que siembran este cultivo, por lo general, año con año. En la Región II, se determinó asociación positiva entre los años de cultivar frijol de temporal y asociación negativa con el número de trabajadores fijos empleados.

Tenencia de la Tierra

En la Región I, se observan diferentes tipos de tenencia, que incluyen a: propietarios (31.31%), ejidatarios (59.59%), ejidatarios y propietarios (2.02%), terciadores (3.03%) y arrendadores (4.04%). En la Región II sólo aparecieron propietarios (27.27%) y ejidatarios (72.72%), y en la Región III propietarios (12.12%), ejidatarios (85.85%) y medieros (2.02%). Lo anterior muestra que la tierra ejidal predomina, ya que en Zacatecas existen 775 ejidos, que ocupan una superficie de 3 736 264 ha, que agrupan a 100 227 ejidatarios (INEGI, 1999). En la presente investigación, se consideran como ejidatarios a los hombres y mujeres titulares de derechos ejidales y como propietarios a los que ejercen propiedad sobre tierras agrícolas; por otra parte, se define como arrendador al que renta un terreno agrícola por un determinado periodo de tiempo. Una forma de explotar las tierras agrícolas es "al partido", por medio de la asociación de un propietario o ejidatario (que ponen sus terrenos) con otro agricultor, distribuyéndose (de diferentes maneras) los costos del cultivo; si al final de la cosecha el agricultor recibe la mitad de ésta se le llama mediero y si recibe un tercio de la misma se le denomina terciador.

En cuanto a la tenencia de la tierra, Galindo (1995), al evaluar el uso de innovaciones agrícolas en la región central del estado de Zacatecas, determinó que los ejidatarios y pequeños propietarios difieren en

cuanto a las siguientes variables: contacto con casas comerciales, cosmopolitismo y superficie cultivada. Por su parte, Álvarez *et al.* (1985) concluyeron en el Plan Mixteca Alta del estado de Oaxaca, que el tipo de tenencia de la tierra no influía sobre la tecnología empleada por los agricultores ubicados en esta zona.

Superficie Cultivada con Frijol

Durante el ciclo agrícola primavera-verano 1998 (P-V/1998), en la Región I, 13.13% de los pequeños propietarios cultivaron menos de 11 ha, el mismo porcentaje de 11 a 20 ha y 7.07% más de 20 ha. En la Región II, 10.10% sembró de 21 a 25 ha, 9.09% de 6 a 10 ha, 7.07% menos de 5 ha y sólo 1.01% de 11 a 15 ha. En la Región III, 5.05% cultivó de 6 a 10 ha, 3.03% menos de 6 ha, 1.01% de 11 a 15 ha, 2.02% de 16 a 20 ha y 1.01% más de 21 ha. El promedio de la superficie cultivada por este tipo de agricultores fue de: 17.87, 24.08 y 11.86 ha para las Regiones I, II y III, respectivamente. En las Regiones I y II, la máxima fue de 100 ha y en la Región III de 30 ha. Sobre la superficie cultivada de frijol por parte de los propietarios, se determinó en la Región I que ésta se asocia de manera positiva con: el número de trabajadores temporales empleados, la utilidad anual por la cría de animales, y los ingresos económicos por la ayuda de parientes y otros; en la Región II, con el número de hijos que no les ayudan a los productores, el número de trabajadores fijos empleados y el número de semanas que contratan anualmente a trabajadores temporales; y en la Región III, con: porcentaje de grano de frijol comercializado, número de hijos que les ayudan (en forma negativa), número de trabajadores temporales empleados (en forma negativa), número de semanas que contratan anualmente a trabajadores temporales, superficie cultivada con otros cultivos, porcentaje de cosecha que se comercializa de otros cultivos (en forma negativa), precio de venta de otros cultivos e ingresos económicos de los agricultores, además de las actividades agropecuarias.

En la superficie cultivada con frijol por los ejidatarios en la Región I, el mayor porcentaje (37.37%) cultivó de 6 a 10 ha; 47.47% menos de 11 ha en la Región II; y en la Región III, 60.60% de los productores sembraron menos de 11 ha. Al analizar los promedios de la superficie sembrada en las regiones señaladas, éstos son similares (10.53 ha en la Región I, 10.35 en la Región II y 11.86 en la Región III), e inferiores a los registrados por los

pequeños propietarios. La superficie de frijol cultivada por los ejidatarios se relaciona positivamente en la Región II con el tiempo empleado en actividades agropecuarias y el número de trabajadores fijos empleados. El frijol en temporal es el principal cultivo que los productores siembran y el que ocupa la mayor superficie dentro de las unidades de producción.

Otras Especies que los Productores Cultivan

En 1998 en temporal, además del frijol, uno de los cultivos que destacó fue el maíz que se emplea principalmente como forraje, ya que en la Región I, 13 productores lo sembraron, 28 en la Región II y 50 en la Región III. Otros cultivos anuales que se sembraron fueron: avena, cebada, trigo, calabaza, tomatillo, así como la asociación maíz-frijol. Dentro de los frutales se mencionaron: durazno, nopal y membrillo (Cuadro 2). En la Región I, el promedio de la superficie cultivada de maíz fue de 6.8 ha, en la Región II de 1.76 ha, y en la Región III de 9.3 ha.

Por lo que respecta a cultivos con riego, también sobresalió el maíz, ya que 8.08% de los productores de las Regiones I y II lo sembraron, y 6.06% de la Región III. Otros cultivos que destacaron fueron: frijol, chile, avena, chícharo, cebolla, durazno y manzano. Específicamente en la Región III, se

Cuadro 2. Cultivos que los productores de Zacatecas establecen además del frijol. 1999.

Cultivo	Frecuencia [§]		
	Región I	Región II	Región III
Temporal			
Avena	4	2	3
Cebada		2	1
Calabaza		1	
Maíz	13	28	50
Maíz-Frijol			1
Trigo		1	
Tomatillo			1
Nopal			3
Duraznero	4	4	1
Membrillo	1		
Riego			
Avena	1	1	
Chile	1	9	2
Cebolla		2	
Chícharo		1	
Frijol	4	3	5
Maíz	8	8	6
Duraznero			1
Manzano			1
Vid		1	

[§] Tamaño de la muestra en cada región igual a 99.

determinó que la superficie cultivada con otros cultivos se correlaciona positivamente con la utilidad anual por la cría de animales y con el ingreso económico de los agricultores, además de las actividades agropecuarias. Con respecto al porcentaje de cosecha que los productores comercializan de otros cultivos, éste se asocia de manera positiva con los ingresos económicos que los productores reciben, además de las actividades agropecuarias en las Regiones II y III. Finalmente, el precio de venta de otros cultivos se correlaciona positivamente con los ingresos económicos por la ayuda de parientes u otros en la Región II.

De las tres regiones estudiadas, se notó que en temporal dentro de la Región III los productores diversifican más sus cultivos, después la Región II y finalmente la Región I.

Actividades Pecuarias que los Productores Desarrollan

Del total de los entrevistados, 46 de la Región I afirmaron criar algún tipo de ganado, 44 de la Región II y 40 de la Región III. Dentro de la Región I, 33 señalaron tener reses, 24 borregos, 19 cerdos, seis cabras y uno caballos; en la Región II, 31 poseen reses, 11 cerdos, ocho borregos, seis cabras, cuatro aves y dos colmenas; finalmente, en la Región III, 38 crían reses, 11 cerdos, 10 cabras, 10 aves, seis caballos, cinco borregos, tres becerros y dos mulas. Para la cría de animales (reses, borregos y cabras), se aprovecha la paja del frijol que se obtiene después de la trilla, la cual resulta un insumo fundamental para el desarrollo de la ganadería en el Estado.

Tiempo Empleado en Actividades Agropecuarias

En la Región I, 63.63% de los entrevistados manifestaron dedicar todo su tiempo a estas actividades; en la Región II, 67.67%; y en la Región III, 63.63%. En la Región II, se encontró que el tiempo empleado en actividades agropecuarias se asocia negativamente con la superficie cultivada con otros cultivos y con la utilidad anual obtenida por la cría de animales.

Participación de la Familia en Labores del Campo

Sobre la participación de las mujeres en labores del campo, en la Región I, 54.54% de los entrevistados manifestaron recibir ayuda de sus

esposas, 59.59% de los que se localizan en la Región II, y 56.56% de los que radican en la Región III, lo cual revela que la colaboración de las mujeres es importante en las tareas agropecuarias.

Con respecto a la participación de los hijos de los entrevistados (en promedio tres por familia) en estas actividades, en la Región I colabora 62.62% y en las Regiones II y III 66.66%, lo que muestra que en las tareas del campo participan las mujeres y los hijos.

En particular en la Región II, se encontró que al incrementarse el número de hijos que les ayudan a los productores, disminuye el número de trabajadores fijos empleados y que al aumentar el número de hijos que no les ayudan a éstos, se incrementa el número de trabajadores fijos.

Empleo de Trabajadores

El número de trabajadores que los productores emplearon durante 1998 para realizar sus tareas en el campo (principalmente deshierbes y cosecha) fue variable en cada una de las regiones, registrándose el porcentaje más alto en la Región I con 56.56%, en la Región III, 51.51% y en la Región II, 49.49%. El promedio de trabajadores empleados fue de 5.18, 5.94 y 5.30, para las Regiones I, II y III, respectivamente. El promedio más alto de semanas que los productores contratan a trabajadores temporales se registró en la Región I (8.74), después se ubicaron las Regiones II (5.22) y III (3.72); los trabajadores temporales fueron empleados principalmente por los productores quienes sembraron grandes extensiones de frijol y por aquéllos que establecieron varios cultivos. En las tres áreas estudiadas, se determinó que algunos productores contratan trabajadores fijos durante todo el año, encontrándose el número más alto en la Región II, ya que en ésta se localiza la mayor superficie cultivada en riego.

Acerca del número de trabajadores fijos que los productores emplean, en la Región I se encontró que se asocia positivamente con el ingreso económico de los agricultores, además de las actividades agropecuarias, y en la Región II negativamente con el número de trabajadores temporales empleados y el rendimiento obtenido en otros cultivos, también, positivamente con los costos del cultivo de frijol de temporal, la superficie cultivada con otros cultivos, el porcentaje de cosecha de otros cultivos que se comercializa y el precio de venta de otros cultivos; por lo que respecta al número de trabajadores temporales en la Región I, se encontró que esta

variable se correlaciona de manera positiva con el ingreso económico de los agricultores, además de las actividades agropecuarias.

Con respecto al número de semanas al año que los productores contratan a trabajadores temporales, esta variable en la Región II se asocia positivamente con los ingresos económicos de los agricultores, además de las actividades agropecuarias y en la Región III con el precio de venta de otros cultivos.

Ingreso Económico de los Productores Además de las Actividades Agropecuarias

36.36% de los productores de la Región I, 32.32% de la Región II y 36.36% de la Región III, señalaron que es difícil que vivan sólo del dinero que obtienen de las tareas agropecuarias, por lo que realizan otras actividades para aumentar sus ingresos económicos. En la Región I, los productores mencionaron con más frecuencia emplearse como: comerciantes, jornaleros y albañiles; en la Región II, como comerciantes, jornaleros, albañiles y obreros; y, en la Región III, como comerciantes y jornaleros, ya que en el medio rural zacatecano se carece de fuentes de empleo y es nula la agroindustria.

El ingreso promedio anual que los entrevistados reciben por realizar actividades diferentes a las agropecuarias, es de \$13 600, \$18 000 y \$12 000, para las Regiones I, II y III, respectivamente. Madrigal (1989) determinó que los productores de menor edad y mayor escolaridad dedican más tiempo a actividades de trabajo fuera de las unidades de producción.

En relación con los productores que reciben ayuda económica de instituciones y familiares (25, 18 y 35 productores de las Regiones I, II y III, respectivamente), la principal fuente de ayuda son sus hijos, según lo manifestaron 19, 12 y 18 de los entrevistados de las regiones mencionadas, otras fuentes son sus familiares y el Instituto Mexicano del Seguro Social. El apoyo económico lo reciben principalmente de los parientes que radican en los Estados Unidos de América.

Principales Problemas que los Productores Enfrentan en el Cultivo de Frijol

El principal problema que los agricultores manifestaron enfrentar es la sequía, en segundo lugar el bajo precio que obtienen al vender su cosecha; también destacaron el ataque de plagas, el alto costo de los insumos, la presencia de heladas y los

problemas para comercializar su grano (Cuadro 3). Existen también problemas de minifundio y baja productividad, por lo cual en el campo se enfrenten problemas de abandono, y del descenso de la superficie cultivada con granos básicos, lo que ha contribuido a incrementar las presiones migratorias.

Deseo de los Productores de Seguir Sembrando Frijol

En las tres regiones estudiadas, 97.97% de los productores indicaron su deseo de seguir cultivando frijol en temporal, con lo cual seguirá el monocultivo en la mayoría de los terrenos. En la Región I, las principales razones para seguir cultivando esta leguminosa en orden de importancia fueron: el cultivo se adapta a su suelo, es lo que saben hacer, para comprar y vender, es su única opción, y por tradición; en la Región II fueron: es su única opción, es lo que saben hacer y es la mejor opción; en la Región III destacaron: es lo que saben hacer y es el cultivo que se adapta a sus suelos. En la Región III, 39.39% de los productores manifestaron que una de las razones por las cuales desean seguir cultivando frijol es que lo emplean para autoconsumo, lo mismo señalaron

Cuadro 3. Problemas que los productores de frijol de temporal en Zacatecas enfrentan. 1999.

Problema	Frecuencia [§]		
	Región I	Región II	Región III
Sequía	68	69	85
Falta de capital	13	9	4
Insumos caros	18	13	17
Heladas	12	17	
Bajo rendimiento	2	1	13
Tierras malas	2		3
Plagas	16	25	50
Superficie pequeña	1		
Bajo precio del frijol	67	71	64
Falta de organización	2	1	
Mercado distante	1	2	6
Deficiente comercialización	6	16	15
Falta de transporte	9	3	5
Falta de mercado	10	20	
Falta de mano de obra	8		1
Falta de crédito	6		
Exceso de humedad	1	2	1
Maleza	1	2	4
Falta de equipo		2	6
Falta de caminos		1	1
Falta de semilla		1	15
Enfermedades	1	5	

[§] Tamaño de la muestra en cada región igual a 99.

32.32% de los ubicados en la Región II y 15.15% de los que radican en la Región I; con respecta al autoconsumo es importante destacar que con el frijol que los productores cosechan, aseguran parte de la subsistencia de sus familias.

Cultivos que los Productores Desean Sembrar

Específicamente, en la Región I, 23 de los entrevistados señalaron su deseo de cultivar hortalizas, 18 maíz y ocho cultivos forrajeros; en la Región II, 25 manifestaron su interés por cultivar forrajes, 24 por establecer cultivos hortícolas y 13 cereales; en la Región III, 36 de los agricultores indicaron su deseo por cultivar forrajes, nueve hortalizas, nueve nopal tunero y siete cereales, principalmente (Cuadro 4).

Los entrevistados cultivan frijol de temporal, por lo cual sólo algunos cuentan con riego, lo que resulta una limitante seria para que éstos produzcan hortalizas (chile, tomate, cebolla, repollo, tomatillo, papa, nopal verdura y calabaza), que además requieren de una fuerte inversión económica; también en Zacatecas, no se cuenta con tecnología para el cultivo de hortalizas (con excepción del chile). Lo más factible es que los productores siembren cultivos forrajeros (sobre los cuales existe tecnología disponible), ya que requieren de menos inversión, se adaptan al temporal, permiten al productor obtener forraje para el ganado y rotar sus cultivos.

Cuadro 4. Productores que manifestaron su deseo de explotar otros cultivos además del frijol en Zacatecas. 1999.

Cultivo	Frecuencia [§]		
	Región I	Región II	Región III
Forrajes [†]	8	25	36
Hortalizas [‡]	23	24	9
Maíz (grano)	18	9	5
Duraznero	3		
Sorgo	1	3	3
Cereales	6	13	7
Girasol	1		
Nopal tunero	1		9
Otros frutales	3	1	2
Haba		2	
Sandía		2	
Algodón		1	
Melón		1	
Chícharo		2	
Garbanzo			1

[†] Avena, maíz forrajero, nopal forrajero y alfalfa.

[‡] Chile, cebolla, tomate, papa, nopal verdura, calabaza, repollo y tomatillo.

[§] Tamaño de la muestra en cada región igual a 99.

Actividades que a los Productores les Gustaría Realizar

La principal actividad que los productores quieren desarrollar próximamente es la agricultura, según lo manifestaron 54.54%, 55.55% y 71.71% de los agricultores de las Regiones I, II y III. Otra tarea que les gustaría realizar en segundo lugar es la ganadería (para 9.9%, 12.12% y 4.04% de los entrevistados de las Regiones I, II y III). Otras actividades que les interesan a éstos son: fruticultor, comerciante, sastre, agroindustrial, mecánico, cocinero, político, albañil, jornalero, estudiante, emigrante en Estados Unidos de América, empleado y las tareas del hogar.

Tecnología que los Productores Utilizan en la Siembra de Frijol en Temporal

Preparación del terreno y siembra. En la Región I, se determinó que ninguno de los entrevistados corta la maleza que queda del ciclo anterior, antes de iniciar las labores de preparación del suelo; en la Región II, dos realizaron esta práctica; y en la Región III, siete de los productores. Los agricultores realizaron ampliamente el barbecho (91.91% en la Región I, 94.94% en la Región II y 89.89% en la Región III). 100% de los productores indicaron rastrear sus suelos; un sólo paso de rastra lo realizó 91.91% de los que establecen su cultivo en la Región I, 90% de los que se localizan en la Región II y 80.85% de los que siembran en la Región III. De los entrevistados, 86.86% señaló haber sembrado su frijol en forma mecánica durante 1998 en la Región I, en la Región II: 85.85% y en la región III: 61.61%.

Semilla. En la Región I, 60 de los entrevistados afirmaron haber recibido del Programa de Refrescamiento de Semilla (Kilo x Kilo) grano de frijol para su siembra; 88 en la Región II, y 62 en la Región III. En la Región I, 38.38% recibieron de 21 a 30 kg, en la Región II 69.69% de 21 a 40 kg y en la Región III 35.1% de 20 a 30 kg. Los promedios de semilla recibida para las regiones estudiadas fueron: 26, 41 y 41 kg, respectivamente.

Fertilización. En la Región I es común que los productores apliquen fertilizante (nitrogenados y fosforados) en su cultivo, ya que tienen mejores condiciones de precipitación; el costo de este insumo osciló de \$ 300 a \$ 500 ha⁻¹ según los productos utilizados; la aplicación se realizó principalmente con maquinaria. Algunos agricultores de la Región II realizaron esta práctica, y ninguno de los que se

localizan en la Región III, debido principalmente a que en estas zonas la lluvia es deficiente. En ninguna de las tres regiones, se aplicaron inoculantes a la semilla de frijol.

Control de maleza. Los herbicidas es un insumo poco aplicado, ya que sólo 18 agricultores de la Región II señalaron haberlo empleado; en la Región I nueve y no lo utilizó ninguno de la Región III. La mayoría de los agricultores que radican en las tres regiones de estudio escardan su cultivo una o dos veces; lo anterior ocurre también con los productores que emplearon el tiro de animales para realizar esta labor y de los que la ejecutaron manualmente.

Control de plagas. A pesar de que los entrevistados afirmaron que uno de los principales problemas que limitan el desarrollo del cultivo del frijol en temporal son las plagas (gusano de alambre, gallina ciega, mosca de la semilla, gusanos trozadores, chicharrita y conchuela), sólo nueve productores de la Región I señalaron haber aplicado insecticidas para su control, 11 de la Región II, y seis de la Región III.

Cosecha y desgrane. Se determinó que 27.27% de los productores de la Región I arrancaron su frijol manualmente, 60.60% de los que se ubican en la Región II y 86% de los que explotan sus parcelas en la Región III. El promedio de jornales empleados para realizar esta labor fue de 5.5 ha⁻¹. El resto de los entrevistados arrancaron su frijol con tractor.

En el Estado, se ha observado que el manejo post-cosecha que se da al frijol es deficiente, ya que existe poca infraestructura y equipo para la limpieza y cribado del producto; esto ocasiona la presencia de tierra, piedras, paja y granos quebrados, lo cual repercute en el detrimento del precio del frijol.

Luna y Ortiz (1999) afirmaron que la mayoría de los productores de frijol no aplican nuevas tecnologías porque las desconocen, y cuando las conocen no todos están capacitados para aplicarlas, no cuentan con recursos para adquirirlas o no existen en los mercados locales.

Costo del cultivo de Frijol de Temporal

El costo promedio del cultivo de esta leguminosa en condiciones de temporal es más alto en la Región I, le sigue la Región II, y finalmente la Región III. En la primera de éstas, la mayor frecuencia se ubicó en un costo entre \$1800 y \$2300 ha⁻¹, en la Región II fue de \$1300 a \$1600, y en la Región III entre \$1001 y \$1500; lo anterior sin considerar el costo de la mano de obra familiar. Es importante destacar, que el apoyo

que brindó el Programa de Apoyos al Campo (PROCAMPO) en 1998, fue de \$650 ha⁻¹.

Variedades que los Productores Sembraron Durante 1998 y Rendimiento Obtenido

Un alto porcentaje de la semilla que los productores utilizan en sus siembras de frijol no es mejorada, sino que es seleccionada por los mismos agricultores en sus propias parcelas, y en muchas ocasiones ésta no se desmezcla, ni se seleccionan granos uniformes. Lo anterior ocasiona problemas de nacementa, degeneración y el ataque de enfermedades en las futuras siembras, lo cual provoca baja productividad, mala calidad del grano, y bajo precio del producto obtenido.

En la Región I, el mayor número de los productores entrevistados sembraron frijol Negro, enseguida predominaron: Pinto, Bayo y Flor de Mayo. En esta región, el promedio de superficie sembrada más alta le correspondió al frijol Negro Bola, al Bayo Blanco y al Negro. El mayor rendimiento se logró con la variedad Manzano, el cual fue muy similar al que se obtuvo con el Flor de Junio y el Negro (Cuadro 5). Con respecto a la Región II, las variedades de frijol Flor de Junio, Flor de Mayo y Bayo fueron las más sembradas. El promedio mayor de superficie cultivada con esta leguminosa correspondió a las variedades: Flor de Junio, Canario y Flor de Mayo; sin embargo, los rendimientos más altos se lograron con las variedades: Negro, Canario, Pinto Nacional y Garbancillo (656, 420, 400 y 400 kg ha⁻¹,

respectivamente). El precio de venta más alto lo registró la variedad Negro (Cuadro 6).

En la Región III, las variedades que predominaron fueron: Flor de Mayo, Bayo y Flor de Junio, con rendimientos de: 297, 275 y 309 kg ha⁻¹ (Cuadro 7).

En las tres regiones estudiadas, la paja que resulta después de la trilla se recoge del campo, ya que ésta se utiliza como forraje para el ganado.

Lo anterior muestra que, en Zacatecas, se cultiva una diversidad de variedades que responden a diferentes mercados de consumo, como es el caso de los frijoles negros que se envían al centro y sur de México, donde se encuentran sus consumidores potenciales.

Es importante destacar que no todos los productores que sembraron frijol obtuvieron cosecha, debido principalmente a la sequía, así como a la presencia de heladas tempranas, ya que el ciclo vegetativo de las variedades que se siembran es de 85 a 100 días. Se determinó también, que la variable rendimiento de frijol en la Región I se asocia en forma negativa con el número de trabajadores fijos empleados y positivamente con los ingresos económicos que reciben por la ayuda de parientes y otros, y en la Región II con el porcentaje de cosecha de otros cultivos que se comercializa.

Con relación al porcentaje de grano de frijol que los productores vendieron, se encontró en la Región I que esta variable está correlacionada positivamente con el porcentaje de cosecha de otros cultivos que los productores comercializan y en la Región II negativamente con el número de trabajadores fijos empleados.

Cuadro 5. Variedades de frijol que los productores de la Región I (n = 99) sembraron, superficie sembrada, productores que cosecharon, rendimiento y precio de venta. 1999.

Variedad	Productores que la sembraron	Superficie sembrada (promedio)	Productores que cosecharon	Rendimiento (promedio)	Precio de venta
		ha		kg ha ⁻¹	\$ Mg ⁻¹
Flor de Mayo	16	6.34	12	407	3354
Flor de Junio	5	4.6	3	517	4150
Pinto	23	8.4	14	485	3600
Bayo	19	5.8	15	279	3655
Negro	54	15.9	51	516	5593
Bayo Baranda	2	5.5	1	461	3500
Negro					
San Luis	5	10.7	5	65	6375
Negro Bola	2	35.5	2	330	6900
Manzano	5	9.8	5	563	3080
Canario	3	9	3	330	4366
Bayo Blanco	2	25	1	380	4000

Cuadro 6. Variedades de frijol que los productores de la Región II (n = 99) sembraron, superficie sembrada, productores que cosecharon, rendimiento y precio de venta. 1999.

Variedad	Productores que la sembraron	Superficie sembrada en (promedio)	Productores que cosecharon	Rendimiento (promedio)	Precio de venta
		ha		kg ha ⁻¹	\$ Mg ⁻¹
Flor de Junio	51	13.38	49	302	3921
Flor de Mayo	31	7.28	27	242	3079
Canario	1	10.0	1	420	
Bayo	14	4.8	8	336	3322
Media Oreja	1	8.0			
Bayo Baranda	1	3.5			
Negro	11	9.4	11	656	4909
Negro San Luis	2	6.0	2	70	2700
Sangre de Toro	1	0.5	1	300	
Pinto Nacional	3	8.2	2	400	4000
Pinto Americano	1	5.0	1	30	
Garbancillo	1	1.0	1	400	

Cuadro 7. Variedades de frijol que los productores de la Región III (n = 99) sembraron, superficie sembrada, productores que cosecharon, rendimiento y precio de venta. 1999.

Variedad	Productores que la sembraron	Superficie sembrada (promedio)	Productores que cosecharon	Rendimiento (promedio)	Precio de venta
		ha		kg ha ⁻¹	\$ Mg ⁻¹
Bayo	25	6.2	13	275	3830
Flor de Mayo	47	6.2	39	297	3678
Pinto	5	0.9	5	328	
Flor de Junio	18	8.9	17	309	3669
Bayo Gordo	1	2.0	1	400	1000
Rebosero	1	0.2	1	75	
Pinto Villa	1	0.05	1	500	
Negro	3	11.0	3	333	5500
Media Oreja	2	11.5	2	1055	4800
Criollo	1	2	1	200	
Rosa de Castilla	1	1.7	1	100	

CONCLUSIONES

- En Zacatecas, la mayoría de los productores quienes cultivan frijol son de edad avanzada, siembran esta leguminosa desde que se iniciaron en la agricultura y su escolaridad es baja; casi el total de ellos son originarios del lugar donde radican y la mayor parte de su vida se han dedicado a las actividades agrícolas.
- La tierra que predomina en el área de estudio es ejidal y el promedio de superficie cultivada por los agricultores es similar en las tres regiones estudiadas.
- En temporal, los productores de frijol siembran maíz y, con menor frecuencia, otros cultivos forrajeros y frutales y un alto porcentaje combinan las actividades agrícolas con las pecuarias. Dos terceras partes de la población emplea todo su tiempo en realizar labores

agropecuarias, el resto realiza actividades diferentes para complementar sus ingresos económicos.

- Los productores emplean con frecuencia la mano de obra familiar (esposa e hijos) para desarrollar las tareas agropecuarias y contratan jornaleros con mayor frecuencia en la Región I, luego en la Región III y con menor frecuencia en la Región II.

- Un alto porcentaje de los entrevistados recibe ayuda económica de familiares que emigran a los Estados Unidos de América; la mayor ayuda la perciben los que radican en la Región III, enseguida en la Región I y por último en la Región II.

- Los principales problemas que enfrentan los productores de frijol, son: sequía, bajo precio de su cosecha, ataque de plagas, alto costo de los insumos, heladas y deficiente comercialización de su cosecha.

- Es indiscutible que los productores de frijol no tienen otra alternativa, por lo cual desean seguir cultivando este grano, ya que consideran que es un cultivo que se adapta a sus suelos, es lo que saben hacer, es su única opción, y algo importante, es para autoconsumo, lo cual asegura la sobrevivencia de su familia; también muestran interés por sembrar otros cultivos, como: forrajes, hortalizas, maíz, cereales y nopal (aunque son pocos los que cuentan con riego), y su inquietud por combinar la agricultura con la ganadería.

- En la Región I, el uso de maquinaria agrícola durante el proceso productivo del frijol es más frecuente que en las otras dos regiones, así como el uso de fertilizantes químicos. En esta región, el mayor número de productores siembran frijol Negro, Pinto, Bayo y Flor de Mayo; en la Región II destacan Flor de Junio, Flor de Mayo y Bayo; en la Región III sobresalen Flor de Mayo, Bayo y Flor de Junio.

- Los costos de producción más altos en el cultivo se registraron en la Región I, luego en la Región II y finalmente en la Región III. Con los rendimientos obtenidos en el ciclo P-V/1998, el cultivo de frijol fue rentable en la Región I para algunas variedades, sin embargo, en las Regiones II y III no se recuperaron lo invertido, aunque el apoyo que brindó el PROCAMPO ayudó a disminuir las pérdidas.

LITERATURA CITADA

Álvarez, G., G. Martínez V. y H. Díaz C. 1985. La utilización de la tecnología en dos comunidades del Plan Mixteca Alta, estado de Oaxaca: El caso de recomendaciones para el maíz de temporal. *Agrociencia* 61: 13-26.

Bhattacharyya, G.K. 1977. *Statistical concepts and methods*. Wiley. New York.

Galindo G., G. 1992. Aspectos relacionados con la comunicación agropecuaria entre ejidatarios del Mezquite, Zacatecas. *Fitotecnia Mexicana* 15: 193-196.

Galindo G., G. 1995. Uso de innovaciones agrícolas en la región central de Zacatecas. *Fitotecnia Mexicana* 18: 140-150.

García C., G. 1985. La adopción de innovaciones a través del método del productor experimentador y sus efectos en el sector productivo regional. pp. 121-122. *In*: R. Pérez C. (ed.). *Experiencias metodológicas de la difusión de tecnología en el INIA*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. México, D.F.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1999. *El sector agroalimentario en México*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Aguascalientes, México.

Luna F., M. y M. Ortiz. 1999. Análisis de la producción de frijol de temporal en el Distrito de Río Grande, Zacatecas. *Geografía Agrícola* 27: 51-62.

Madrigal M., A. 1989. Evaluación de la asistencia técnica proporcionada por un CADER en relación a la adopción de tecnología en 12 ejidos del centro del estado de Michoacán. *Colegio de Postgraduados*. Montecillo, México.

Ortiz V., M. 1998. *El frijol en el estado de Zacatecas*. Gobierno del estado de Zacatecas. Zacatecas, Zacatecas, México.

Reyna C., E., M. Portillo V. y J. Sánchez C. 1981. Adopción de tecnología agrícola para el impulso de la producción de maíz de temporal en el estado de Tlaxcala, México. Folleto de Investigación 61. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D.F.

Rogers, E. y L. Svenning. 1973. *Modernization among peasants: The impact of communication*. Holt, Rinehart and Winston. New York.

SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1998. *Datos estadísticos agropecuarios*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Delegación Zacatecas. Zacatecas.

SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1993. *Situación del sector agrícola en Zacatecas, de acuerdo al potencial productivo y tecnología mejorada*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Zacatecas, Zacatecas, México.



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

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos;
km 38.5 Carr. México -Texcoco; Tel y Fax: 01 595 95 217 21
(correo ordinario: Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Méx.)

FORMA DE SUSCRIPCION A LA REVISTA TERRA

La revista Terra es publicada trimestralmente. Todas las suscripciones son anuales e incluyen un volumen con cuatro números. El costo de la suscripción es de \$ 500.00 en el país y \$ 60.00 Dls. en el extranjero (incluye costos de envío en ambos casos).

Enviar suscripción a:

Nombre: _____

Empresa: _____

Dirección: _____

Colonia: _____ Código Postal: _____

Ciudad: _____ Estado: _____

País: _____ e-mail: _____

Teléfono: _____ Fax: _____

Usted podrá depositar el monto de la suscripción en una cuenta bancaria que describimos en la parte inferior de esta forma.

**HOY ES EL MOMENTO PARA APOYAR A LA REVISTA TERRA
! SUSCRÍBETE !**

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
Cuenta 044 657115
Bancomer Número de Plaza 010
Sucursal 3441 Texcoco, Estado de México.