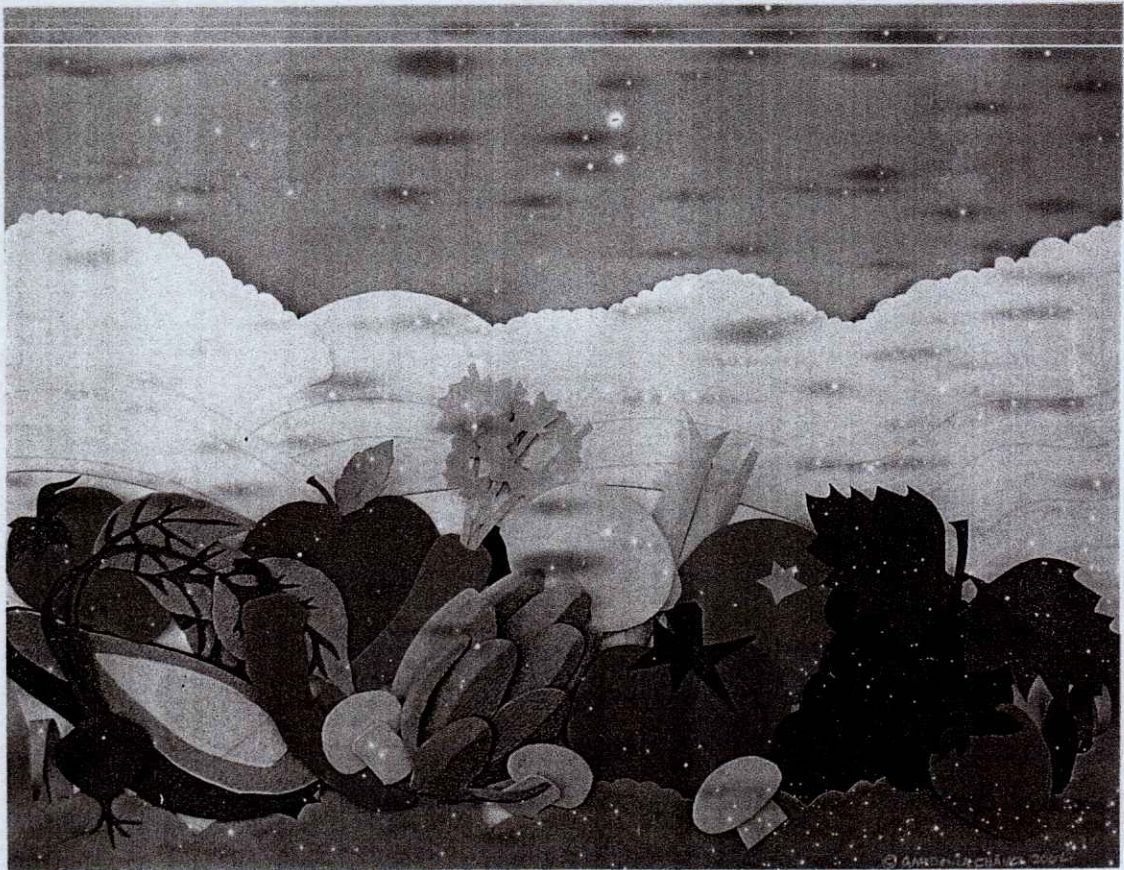


ISSN 0187-5779

TERRA

OCTUBRE - DICIEMBRE DE 2002 • VOLUMEN 20 • NUMERO 4



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

TERRA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 2001-2002

Presidente	Dr. Francisco Gavi Reyes
Vicepresidente	Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez
Secretario General	Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza
Tesorero	M. Sci. Jesús Gómez Díaz
Secretario Técnico	Dr. Rogelio A. Juárez González
Secretaría de Relaciones Internacionales	Dra. Norma García Calderón
Vocales	M.C. Carlos Tavarez Espinosa Ing. Andrés Espinosa Carmona Dr. Sergio A. Enríquez Reyes M.C. Romel de la Garza Dr. Diego González Egularte

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.
Octubre - Diciembre de 2002 Volumen 20 Número 4

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: +01(595) 954 60 24 Fax: +01(595) 954 80 76
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

EDITOR

EDITOR ADJUNTO

EDITORES TÉCNICOS

EDITORES DE ESTILO

EDITORIA DE ESTILO

EN INGLÉS

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

Ina Aalimers 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. Gabriel Alcántar González
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. José Aguilar Ruiz	España
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. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. Ramón A. Rosell	Argentina
Dr. Daniel Buschiazio E.	Argentina

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

President	Dr. Francisco Gavi Reyes
Vicepresident	Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez
Secretary	Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza
Treasurer	M. Sci. Jesús D. Gómez Díaz
Technical Adviser	Dr. Rogelio A. Juárez González
International Relations	Dra. Norma García Calderón
Voters	M.C. Carlos Tavarez Espinosa Ing. Andrés Espinosa Carmona Dr. Sergio A. Enríquez Reyes M.C. Romel de la Garza Dr. Diego González Eguarte

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Assistance

TERRA Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
October - December, 2002 Volume 20 Num. 4

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 of the 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: +52 (595) 954 60 24 Fax: +52 (595) 954 80 76
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

EDITOR

ASSOCIATE EDITOR

TECHNICAL EDITORS

Dr. Antonio Vázquez Alarcón
Dr. Javier Z. Castellanos
Dr. David Cristóbal Acevedo
Dr. Manuel Sandoval Villa
Dra. Ma. del Carmen González Chávez
Dr. Juan José Peña Cabriales
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

STYLE EDITORS

ENGLISH EDITOR

EDITORIAL STAFF

Cover design

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

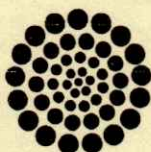
NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Jesús Caballero Mellado
Dr. Lenom J. Cajuste
Dr. Ronald Ferrera Cerrato
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval
Dr. Gabriel Alcántar González
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. José Aguilar Ruiz	España
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. Eduardo Zaffaroni	Brazil
Dr. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. Ramón A. Rosell	Argentina
Dr. Daniel Buschiazio E.	Argentina

SEP • CONACYT



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Oficio C000/300/ **00936**

México, D. F., a 22 de mayo de 2002.

Dr. ANTONIO VÁZQUEZ ALARCÓN

Editor de

TERRA

Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo, A. C.

Presente.

Ref: R93030

**"Índice de Revistas Mexicanas de
Investigación Científica y Tecnológica" del
CONACYT
Actualización**

Estimado Dr. Vázquez:

Me es muy grato comunicarle que la revista "**TERRA**", después de haber sido cuidadosamente evaluada por el Comité correspondiente, ha sido **ACEPTADA EN EL ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL CONACYT, ACTUALIZACIÓN 2002**, conforme se estipula en el Acta de Dictamen y Criterios de Evaluación anexos.

Al comunicar lo anterior, renuevo el compromiso de colaboración y responsabilidad que compartimos en beneficio del desarrollo de la ciencia en México.

Atentamente

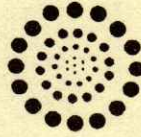
**DR. ALFONSO SERRANO PÉREZ-
GROVAS**
Director Adjunto de Investigación
Científica

Ccp. Fis. Patricia Zúñiga-Bello. Directora de Fomento y Desarrollo Científico, DAIC.

ASPG*BZB*EIA

SEP - CONACYT

DIRECCION ADJUNTA DE INVESTIGACION CIENTIFICA



**INDICE DE REVISTAS MEXICANAS DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y
TECNOLOGICA DEL CONACYT, 2002**

ACTA DE DICTAMEN

Fecha: Mayo de 2002

Expediente No. R93030

NOMBRE DE LA REVISTA: **TERRA**

ORGANISMO RESPONSABLE: **Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo, A. C.**

SOLICITUD DE: **Renovación**

AREA: **C. Tierra, Mar y Atmósfera**

RECOMENDACIÓN: **ACEPTAR EN EL INDICE**

OBSERVACIONES: La revista cumple con los requisitos y criterios fundamentales establecidos para su inclusión o permanencia en el Índice. Sin embargo, el Comité de Evaluación requiere que se cumplan cabalmente todos los requisitos y criterios de evaluación en el período establecido para la próxima evaluación. En particular:

Se recomienda que continúe con los trámites para su registro en los índices de mayor impacto en su especialidad y reporte el resultado de la gestión al Conacyt.

PROXIMA EVALUACIÓN EN: **5 años**

Dr. Armando Arellano Ferro
Presidente del Comité

TERRA

OCTUBRE - DICIEMBRE DE 2002 • VOLUMEN 20 • NUMERO 4
OCTOBER - DECEMBER, 2002 • VOLUME 20 • NUMBER 4

DIVISION I

- 359 Clasificación Campesina de Tierras y su relación con la producción de caña de azúcar en el sur de Veracruz.
Local Land Classification and its relationship with sugarcane crop in the south of Veracruz.
*Patricio Sánchez G., Carlos A. Ortiz S.,
Ma. del Carmen Gutiérrez C. y Jesús D. Gómez D.*
- 371 Distribución de las fracciones humificadas y características de los ácidos húmicos de un Ultisol sometido al cultivo de caña de azúcar y de eucalipto.
Distribution of the humified fractions and characteristics of the humic acids of an Ultisol under cultivation of eucalyptus and sugar cane.
*Luciano P. Canellas, Ary Carlos X. Velloso, Victor M. Rumjanek,
Fernando Guridi, Fábio Lopes Olivares, Gabriel de A. Santos y
Raimundo Braz-Filho*

DIVISION II

- 383 Comparación de dos pruebas para diagnosticar nitrógeno en sorgo.
Comparison of two tests for nitrogen diagnostic in sorghum.
*J. A. Rangel-Lucio, G. Alcántar González, J. Z. Castellanos R.,
E. García-Moya, C. Trejo López y H. Vaquera Huerta*
- 391 Demanda del potasio del tomate tipo Saladette.
Potassium demand of processing tomato.
*R. Burgarín-Montoya, A. Galvis-Spinola, P. Sánchez-García y
D. García-Paredes*
- 401 Acumulación diaria de materia seca y de potasio en la biomasa aérea total del tomate.
Daily accumulation of aboveground dry matter and potassium in tomato.
*R. Burgarín-Montoya, A. Galvis-Spinola, P. Sánchez-García y
D. García-Paredes*

- 411 Eficiencia de uso de nitrógeno y fósforo en genotipos de trigo, triticale y maíz.
Nitrogen and phosphorus use efficiency in wheat, triticale and corn genotypes.
Gerardo Cruz-Flores, David Flores Román, Gabriel Alcántar González, Antonio Trinidad Santos y Rafael Vivanco Escobar
- 423 Adaptación y selección de microorganismos autóctonos en medios de cultivos enriquecidos con petróleo crudo.
Adaptation and selection of autochthonous microorganisms in culture media enriched with crude petroleum.
María del Carmen Rivera-Cruz, Ronald Ferrera-Cerrato, Víctor Volke Haller, Refugio Rodríguez Vázquez y Luis Fernández Linares
- 435 Respuesta del papayo variedad Maradol a tres espaciamientos de drenaje subsuperficial.
Response of the papaya tree variety Maradol at three subsurface drainage spacing distances.
Agrícola Arrieta Rivera y Eugenio Carrillo Avila


DIVISION III

- 449 Respuesta de la cobertura residual del suelo a la erosión hídrica y la sostenibilidad del suelo, en laderas agrícolas.
Soil residue cover response to water erosion and soil sustainability in hillside agriculture.
L. M. Tapia V., M. Tiscareño L., J. Salinas R., M. Velázquez V., A. Vega P. y H. Guillén A.
- 459 Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del valle del Mezquital, Hidalgo, México.
Functional relationship ESP-SAR in wastewater and soils of the Mezquital valley, Hidalgo, Mexico.
M. A. Velázquez-Machuca, M. Ortega-Escobar, A. Martínez-Garza, J. Kohashi-Shibata y N. García-Calderón

- 465** Eficiencia de uso de nitrógeno en tomate de cáscara en fertirriego.
Nitrogen use efficiency in husk tomato under fertigation.
*Cristóbal Ramos-Lara, G. Alcántar-González, A. Galvis-Spinola,
A. Peña-Lomeli y A. Martínez-Garza*
- 471** Procedimientos para predecir la respuesta del maíz a fósforo en
condiciones de secano. I. Contribución de variables de sitio.
Methods to predict maize response to phosphorus under rainfed
conditions. I. Contribution of site variables.
*Diego R. González Eguiarte, Roberto Núñez Escobar, José Ariel Ruiz
Corral y Antonio Turrent Fernández*
- 485** Tecnologías sobre fertilización, densidad de población y variedades
en maíz a escala comercial.
Technologies for corn production including fertilization rates,
planting densities and varieties in commercial plots.
*Ricardo Mendoza R., Ernesto Hernández R., José I. Cortés F.,
Antonio Turrent F., Lucio A. Lerma V. y Ernesto Aceves R.*

ENSAYO/Essay

- 497** Desbalance nutrimental y respuesta en rendimiento en
experimentos de fertilización en nogal pecanero.
Nutritional imbalance and response in yield in experiments of
fertilization in pecan tree.
Ma. del Consuelo Medina Morales
- 505** Problemas financieros de las asociaciones de usuarios y su efecto
en la conservación y operación de distritos de riego.
Financial problems of association of users and the effect on
conservation and operation of irrigation districts.
*Enrique Palacios Vélez, Adolfo Exebio García, Enrique Mejía Saénz,
Ana Laura Santos Hernández y Ma. Eugenia Delgadillo Piñón*



Indice de autores/ <i>Authors index</i>	515
Indice de revisores/ <i>Reviewers</i>	517
Normas para publicación/ <i>Instructions to authors</i>	519

CLASIFICACION CAMPESINA DE TIERRAS Y SU RELACION CON LA PRODUCCION DE CAÑA DE AZUCAR EN EL SUR DE VERACRUZ

Local Land Classification and its Relationship with Sugarcane Crop in the South of Veracruz

Patricio Sánchez G.¹, Carlos A. Ortiz S.^{1†}, Ma. del Carmen Gutiérrez C.¹ y Jesús D. Gómez D.²

RESUMEN

En los últimos años y en diferentes partes del mundo, se ha reconocido la importancia del conocimiento local para la evaluación de los recursos naturales. En México, dicho conocimiento se ha empleado en la realización detallada de inventarios edafológicos, conocidos como “estudios etnoedafológicos” o “clasificación campesina de tierras”, en los que a partir del conocimiento del productor se elabora la cartografía de los terrenos agrícolas. En el presente estudio, se buscó establecer la relación entre las clases de tierras definidas por los productores y la producción de campo de la caña de azúcar, en el área de abastecimiento de los ingenios azucareros San Francisco “El Naranjal” y San Pedro, en Lerdo de Tejada, estado de Veracruz. Se identificaron 33 clases de tierra que se agruparon en 12 unidades de suelos (World Reference Base de 1998) y 15 subgrupos de suelos (Taxonomía de Suelos de 1999). Al evaluar la influencia de los suelos (clases de tierra) y del clima (precipitación pluvial) sobre el rendimiento de la caña de azúcar, se determinó que ambos factores tienen un efecto significativo sobre la producción, pero el factor suelo es el más condicionante en la zona de estudio (60%).

Palabras clave: Conocimiento local, levantamiento de suelos, producción de cultivos.

SUMMARY

In recent years, many countries have recognized the importance of the local knowledge in evaluation of natural resources. In Mexico, this knowledge has been used to make very detailed edaphological inventories,

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

[†] (ortiz@colpos.colpos.mx)

² Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, 56230 Chapingo, México.

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

Publicado en Terra 20: 359-369.

called “etnoedaphological studies” or “farmer land classification.” These studies have been used to map soils of agricultural land. In this work, we related the local knowledge of soil resource with sugarcane yield, in the zone influenced by the sugar factories San Francisco “El Naranjal” and San Pedro, in Lerdo de Tejada, state of Veracruz. This zone has 33 land classes, according to the farmers’ knowledge. According to the current classification, these soils are classified in 12 soil units (World Reference Base of 1998) and 15 subgroups in the Soil Taxonomy of 1999. Soil (land classes) and rainfall (mm yr⁻¹) have a significant effect on crop yields, but statistically the land classes are more important. The latter explains 60% of the yields in the study zone.

Index words: Local knowledge, soil survey, crop production.

INTRODUCCION

En México, la etnoedafología se inició formalmente con el trabajo de Williams (1980), realizado en el valle de México, donde al estudiar códigos aztecas se identificaron glifos que correspondían a diferentes clases de tierras; trabajos posteriores demostraron que, en la actualidad, los productores agrícolas son capaces de identificar diversas clases de tierra dentro de una región y relacionarlas con su uso y manejo (Luna, 1982; Calderón, 1983; Quiroz, 1983). A partir de la década de los años ochenta, se realizan mapas usando el conocimiento local de tierras a escala de ejido (Ortiz *et al.*, 1990) y a escala regional (Licona, 1991; Ortiz, 1999); durante la década de los años noventa, se empleó el conocimiento campesino en la transferencia de tecnología agrícola (Cruz, 1994) y más recientemente se ha utilizado en el ordenamiento ecológico territorial a nivel comunitario (Palma, 2000).

En el ámbito internacional, se han hecho estudios que demuestran que los conocimientos tradicionales que poseen los agricultores sobre los recursos de una región, son de gran utilidad en su propio desarrollo

tecnológico, tal es el caso del uso de plantas como fertilizantes en Nepal (Maskey y Bhattarai, 1984), en el manejo tradicional de la agricultura en el sureste de Asia (Marten y Vityakon, 1986), en el mapeo de la conservación de biodiversidad en América, África y Asia (Poole, 1995) y en la conservación de suelos en Tailandia (Anderson, 1995).

Dada la diversidad de usos que se le puede dar al conocimiento que poseen los agricultores de una región, en el presente estudio se buscó establecer la relación entre el conocimiento tradicional del recurso suelo con la producción de campo del cultivo de caña de azúcar, en la zona de abastecimiento de los ingenios San Francisco "El Naranjal" y San Pedro, en Lerdo de Tejada, estado de Veracruz, en los que se tiene la necesidad de incrementar el rendimiento del cultivo, ya que, en México, se clasifican como medianamente productivos (García, 1997).

Para lograr lo anterior, se elaboró un mapa de clases de tierras campesinas, utilizado como marco de referencia geográfica en la evaluación del comportamiento del rendimiento del cultivo, y se identificaron las principales limitantes edafológicas para la producción. De acuerdo con Parra (1989), el factor climático que más limita la producción de caña de azúcar en el estado de Veracruz es la distribución de la precipitación pluvial, ya que térmicamente no es afectado el desarrollo del cultivo.

Los objetivos de esta investigación son: 1) demostrar la existencia del conocimiento del recurso suelo por parte de los agricultores de la región; 2) realizar la clasificación científica de esos conocimientos; 3) establecer la relación entre el rendimiento de campo del cultivo de caña de azúcar con los suelos de la región y con la precipitación pluvial; y 4) correlacionar el rendimiento y los ciclos de cultivo, para determinar el número de ciclos productivos en los que se obtiene, en cada clase de tierra, un rendimiento superior a 50 t ha^{-1} , para las tres variedades dominantes en la zona de estudio, ya que se ha observado que rendimientos inferiores no son redituables para los agricultores ni para los ingenios azucareros (García, 1973).

MATERIALES Y METODOS

Descripción de la Zona

El área de estudio consta de una superficie cercana a 48 200 ha; se localiza en la llanura costera veracruzana y cubre la mayor parte de los municipios

de Lerdo de Tejada, Saltabarranca, Angel R. Cabada, Santiago Tuxtla y San Andrés Tuxtla (Figura 1); con una altitud que contrasta entre la planicie aluvial (30 m), con la discontinuidad litológica de la Sierra de los Tuxtlas (350 m).

La geología del área se caracteriza por sedimentos aluviales que datan del Jurásico Superior al Cuaternario Reciente; los primeros se formaron a partir de lutitas y areniscas, mientras que el último está constituido por brechas y ceniza volcánica de composición básica (SPP, 1980). La hidrología de la región está constituida por un gran número de arroyos y ríos afluentes del río Papaloapan (uno de los más caudalosos de México); los más importantes son el río San Agustín y el río California, que atraviesan la región de sur a norte y de oriente a poniente, respectivamente.

La vegetación de la zona es de selva mediana subperennifolia, pastizales y terrenos agrícolas con cultivos de maíz (*Zea mays* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) y huertos frutícolas en menor extensión (SPP, 1980; INEGI, 1981); mientras que los suelos de la región se clasificaron como Vertisoles, Cambisoles, Gleysoles y Feozems, en las

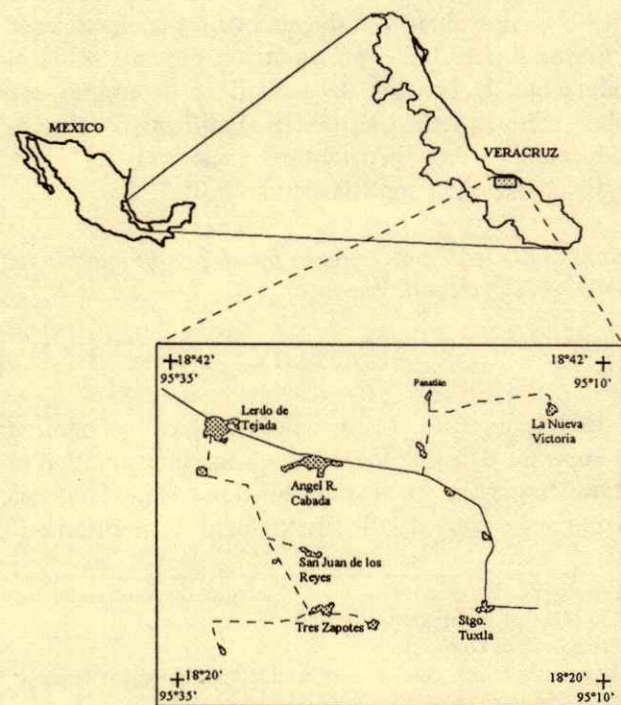


Figura 1. Localización del área de estudio.

cartas edafológicas 1:250 000 (INEGI, 1984); en las que, debido a la escala de publicación, es imposible generar recomendaciones a escala parcelaria, razón por la cual se realizó el inventario edafológico detallado con escala 1:37 000.

Metodología

La presente investigación se efectuó en cuatro etapas: 1) elaboración del mapa de clases de tierras, 2) elaboración del mapa de distribución de la precipitación, 3) obtención de datos de producción de campo de caña de azúcar, y 4) establecimiento de relaciones suelo-rendimiento y precipitación-rendimiento.

1. Elaboración del mapa de clases de tierras. En la cartografía edafológica, se utilizó la metodología generada por Ortiz *et al.* (1990), que consiste en realizar recorridos de campo conjuntamente con los agricultores, quienes indican la ubicación y los límites de las clases de tierras, para después delinear unidades de suelos (tierras) sobre un mapa base; para este estudio se utilizaron fotografías aéreas con escala 1:37 000. Con el mapa de clases de tierra, se ubicaron y describieron perfiles de suelos representativos, de acuerdo con el manual de Cuanalo (1990). En la etapa de laboratorio, a las muestras obtenidas durante la descripción de perfiles, se les practicaron análisis de rutina para clasificación de suelos, tomando como referencia a los procedimientos recomendados por el ISRIC (Van Reewijk, 1993). Finalmente, con los datos generados en los pasos anteriores, se realizó la clasificación taxonómica de los suelos de la región, de acuerdo con la Base Referencial Mundial de Suelos conocida como WRB (ISSS-ISRIC-FAO, 1998) y con la Taxonomía de Suelos en su versión más reciente (Soil Survey Staff, 1999).

2. Distribución de la precipitación pluvial. La distribución de la precipitación pluvial se determinó a partir de los datos de las estaciones meteorológicas que se encuentran en la región, a través de interpolaciones entre las estaciones y con el auxilio del espaciograma (imagen de satélite en falso color) del área de estudio escala 1:250 000 (INEGI, 1993).

3. Obtención de datos de la producción del cultivo. La información relacionada con el rendimiento del cultivo, variedades cultivadas y ciclo de producción, se obtuvo de los registros anuales de producción que se encuentran en los ingenios azucareros, para las zafra 1997-1998, 1998-1999 y 1999-2000. Se puso especial atención en aquellas parcelas que

previamente se ubicaron en alguna clase de tierra y se determinaron las variedades cultivadas dominantes en el área: la Q-68 (25%), la Q-96 (23%), la CP72-2086 (22%), la MEX-821 (8%) y la MEX69-290 (6%).

4. Establecimiento de relaciones. Con el fin de determinar la influencia del suelo (clases de tierra) y precipitación pluvial sobre la producción del cultivo, se realizaron análisis de varianza a los datos del rendimiento obtenido en los cuatro primeros ciclos de producción [mediante el programa estadístico SAS, V.6.12 (1989-1996)], considerando como tratamientos, a las clases de tierra y a los valores de precipitación media anual (mm).

RESULTADOS Y DISCUSION

1. Elaboración del Mapa de Clases de Tierra

En el área de estudio se identificaron 33 clases de tierra, denominadas por los campesinos de la región mediante dos términos. El primero hace referencia a la textura y el segundo al color de la capa superficial, aunque en algunos casos en este último, se emplea la productividad de los terrenos agrícolas o el nombre de la comunidad más cercana (Cuadro 1).

Las tres principales clases de tierra, de acuerdo con la superficie ocupada son: la clase Negra de Lerdo (NEI), con 23% del área, se distribuye por toda la planicie aluvial, principalmente en los municipios de Lerdo de Tejada, Angel R. Cabada y Santiago Tuxtla; la clase Negra fértil (NEf3) cubre 14% del área y se encuentra dentro de la planicie aluvial en los municipios de Lerdo de Tejada y Angel R. Cabada; y la clase Barrialosa de Zamora (BLz) que cubre 12% de la región estudiada y se localiza desde San Andrés Tuxtla hasta Lerdo de Tejada. Las clases de tierra que ocupan la menor superficie son el Barrial seco (BAs) y la Amarillenta del Espinal (AMe), con 0.13 y 0.16%, respectivamente. Ambas clases se encuentran en zonas muy localizadas: la primera, en las cercanías de la comunidad de Santa Julia y la segunda, en las comunidades de El Espinal y Hueyapan (Mapa 1).

Clasificación científica de los suelos de la región. En el área de estudio se identificaron cinco grupos de suelos y 12 unidades de suelos, de acuerdo con la Base Referencial Mundial de Suelos (WRB). Los Fluvisoles dísticos, Regosoles dísticos y Fluvisoles úmbricos son los suelos dominantes, mientras que los Gleysoles dísticos y Fluvisoles háplicos se encuentran en menor proporción (Cuadro 2).

Cuadro 1. Terminología local de las clases de tierra y sus superficies, identificadas en el área de abastecimiento de los ingenios San Francisco "El Naranjal" y San Pedro, Lerdo de Tejada, Veracruz.

Clases de tierra	Símbolo	Superficie ha	Clases de tierra	Símbolo	Superficie ha
Amarillenta del Espinal	AMe	78.54	China de la Providencia	CHp	3816.33
Arenosa café	ANc	339.15	China de Hueyapan	CHh	974.61
Arenosa de Zinapa	ANz	253.47	Negra arenosa	NEa1	89.25
Arena amarilla	ARa1	2641.80	Negra arenosa	NEa2	1281.63
Arena amarilla	ARa2	681.87	Negra del Espinal	NEe	560.49
Arena de San Juan	ARj	477.38	Negra fértil	NEf1	1420.86
Barrial de Santa Julia	BAj	2331.21	Negra fértil	NEf2	1670.76
Barrial negro	BAn	381.69	Negra fértil	NEf3	6972.21
Barrial seco	BAs	60.69	Negra de Lerdo	NEl	10959.90
Barrialosa de Saltabarranca	BLb	1314.30	Negra de la Providencia	NEp	531.93
Barrialosa del Paraíso	BLp	207.06	Porosa de Ixhuapam	POi	546.21
Barrialosa de Zamora	BLz	5822.67	Polvillo amarillo	PVa	132.09
Barro arenoso	BRa	546.21	Polvillo húmedo	PVh	282.03
Barro café	BRc	467.67	Polvillo de Majahual	PVm	342.72
Barro negro	BRn	642.60	Regular del Paraíso	REp	253.60
Barro rojo	BRr	596.19	Roja del Paraíso	ROp	357.00
Colorada de San Juan	COj	1228.08			

Estos resultados contrastan con lo reportado en las cartas edafológicas de la zona de estudio (INEGI, 1984); en donde se señala la existencia de Vertisoles, Cambisoles, Gleysoles y Feozems, con la mayor parte dominada por los Vertisoles. En esta investigación, se encontró que existen suelos en los que domina la fracción arcillosa (> 40%), pero les faltan las propiedades vérticas en los primeros 50 cm de profundidad, debido a que no existe una época seca marcada que permita el fenómeno de expansión-contracción para que se desarrollen dichas propiedades (ISSS-ISRIC-FAO, 1998). Los Cambisoles, reportados en gran porción dentro de la planicie aluvial, únicamente se encontraron en los

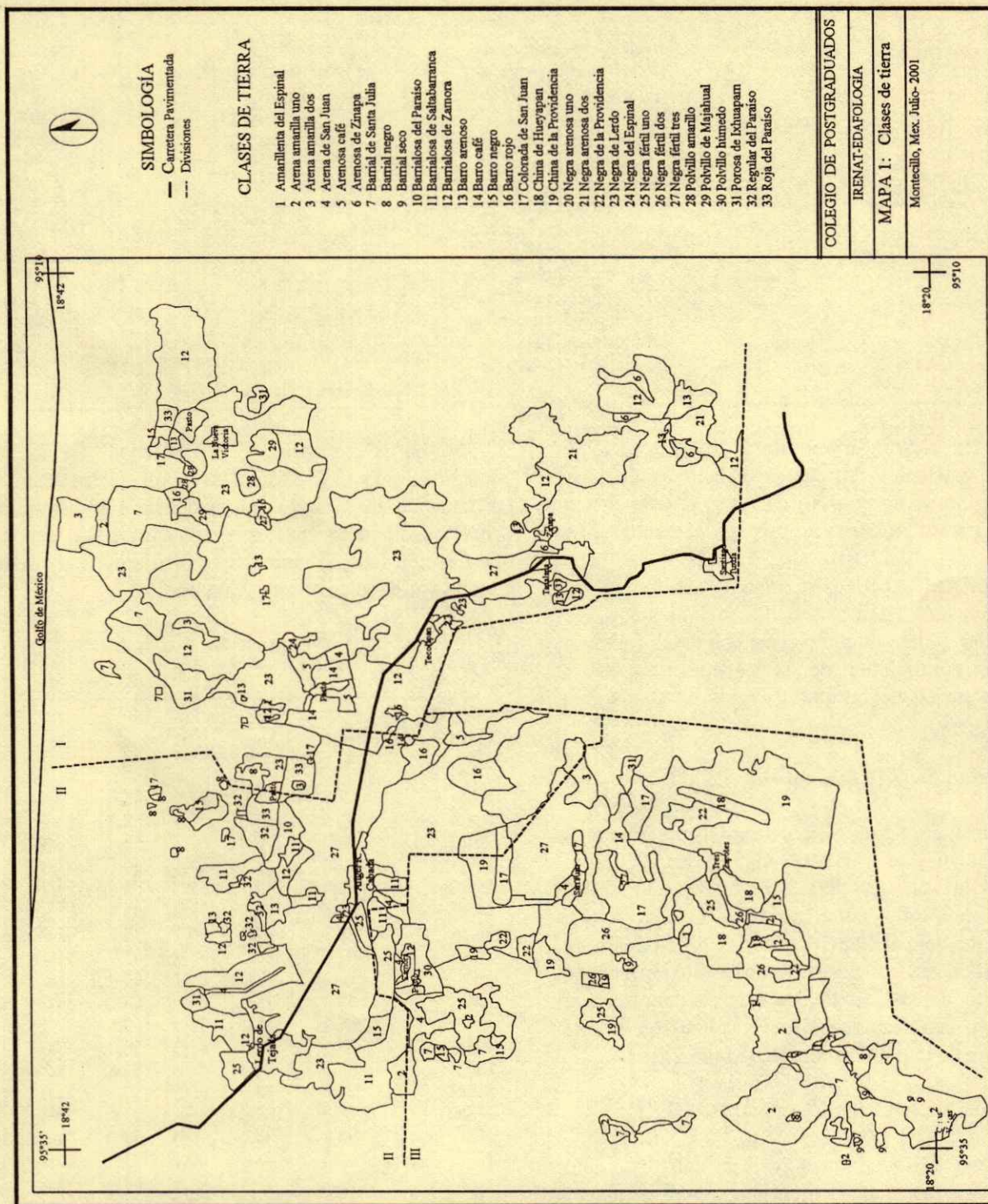
lomeríos de la parte central de la región. Los Gleysoles, que supuestamente cubren una buena porción de la planicie aluvial, se localizaron en la parte sur de la región, donde existe una gran cantidad de afluentes del Papaloapan y condiciones de inundación. Los Feozems se debieron clasificar como Fluvisoles, ya que a pesar de presentar epipedones mólicos, su origen son las corrientes fluviales.

Estas discrepancias concuerdan con los resultados de otros trabajos (Alfaro *et al.*, 2000; Lleverino, 2000), quienes señalaron que la información edafológica oficial presenta una baja calidad y, por lo tanto, son de poca utilidad para planear el uso del recurso.

Cuadro 2. Clasificación de suelos con base en la WBR y su extensión ocupada en el área de abastecimiento de los ingenios San Francisco "El Naranjal" y San Pedro.

Unidad	Subunidad	Clases de tierra	Extensión %	
Fluvisoles (FL)	Úmbricos (um)	BAj, BLp, BLz, BRn.	18.65	
	Mólicos (mo)	AMe, BLb, BRa, NEa2, NEe, POi, PVm.	9.67	
	Dístricos (dy)	ARa1, BRc, BRr, CHh, CHp, NEa1, NEf3, NEp, PVa	33.60	
	Eútricos (eu)	ROp	0.78	
	Háplicos (ha)	ANc	0.70	
	Úmbrico-Gléyico (um-gl)	NEf1, NEf2, REp,	6.89	
	Mólico-arénico (mo-ar)	ANz, ARj, PVh	2.13	
	Dístrico-Gléyico (dy-gl)	BAn	0.79	
	Regosoles (RG)	Dístricos (dy)	NEl	22.71
	Gleysoles (GL)	Dístricos (dy)	BAs	0.13
Cambisoles (CM)	Dístricos (dy)	ARa2	1.41	
	Crómico-Flúvico (cr-fv)	COj	2.54	
Total			100.0	

WRB = Base Referencial Mundial de Suelos (ISSS-ISRIC-FAO, 1998)



Mapa 1. Clases de tierra.

Cuadro 3. Clasificación taxonómica de las clases de tierra, de acuerdo con el Soil Survey Staff (1999).

Orden	Sub-orden	Gran grupo	Sub-grupo	Clase de tierra	Extensión %
Entisols	Fluents	Udifluents	Aquic Udifluents	ROp	0.78
			Mollic Udifluents	ANc, ARa1, BRc, CHp	15.05
			Oxyaquic Udifluents	BAn, REp	1.32
	Orthents	Udorthents	Typic Udifluents	BRr, CHh, NEf3, NEp, PVa	19.07
			Typic Udorthents	ARa2, NEI,	24.12
			Oxyaquic Udorthents	NEa1	0.18
Inceptisols	Aquents	Fluvaquents	Humaqueptic Fluvaquents	BAs	0.13
	Umbrepts	Haplumbrepts	Fluventic Haplumbrepts	BLp	0.43
			Oxyaquic Haplumbrepts	BAj	4.83
			Entic Haplumbrepts	BLz	12.06
	Ochrepts	Dystrochrepts	Fluventic Umbric Dystrochrepts	BRn, COj	3.87
	Fluvaquentic Dystrochrepts		NEf1	2.90	
Oxyaquic Dystrochrepts	NEf2		3.46		
Mollisols	Udolls	Hapludolls	Fluvaquentic Hapludolls	BLb, BRa	3.85
			Fluventic Hapludolls	AMe, ANz, ARj, NEa2, NEe,	7.95
				POi, PVh, PVm	

De acuerdo con el Soil Survey Staff (1999), los suelos del área de abastecimiento de los ingenios estudiados se clasificaron y agruparon en tres órdenes, seis subórdenes, seis grandes grupos y 15 subgrupos (Cuadro 3).

Los procesos pedogenéticos dominantes en los suelos de la región de estudio son la **melanización**, la **ferruginación** y las fluctuaciones del nivel freático, que provoca **condiciones de óxido-reducción**, sobre todo en los suelos de las partes bajas de la planicie aluvial.

2. Distribución de la Precipitación

En el área de estudio, se determinó un gradiente de precipitación que varía de menos de 1500 mm anuales, en la zona cercana a la comunidad Casas Viejas, y de 4500 mm anuales, en la región circundante al volcán San Martín. La distribución de este factor obedece al efecto de sotavento provocado por la Sierra de los Tuxtlas, donde se concentra la precipitación, manifestándose una disminución de éste hacia la parte de la planicie aluvial (Mapa 2).

3. Producción de la Caña de Azúcar

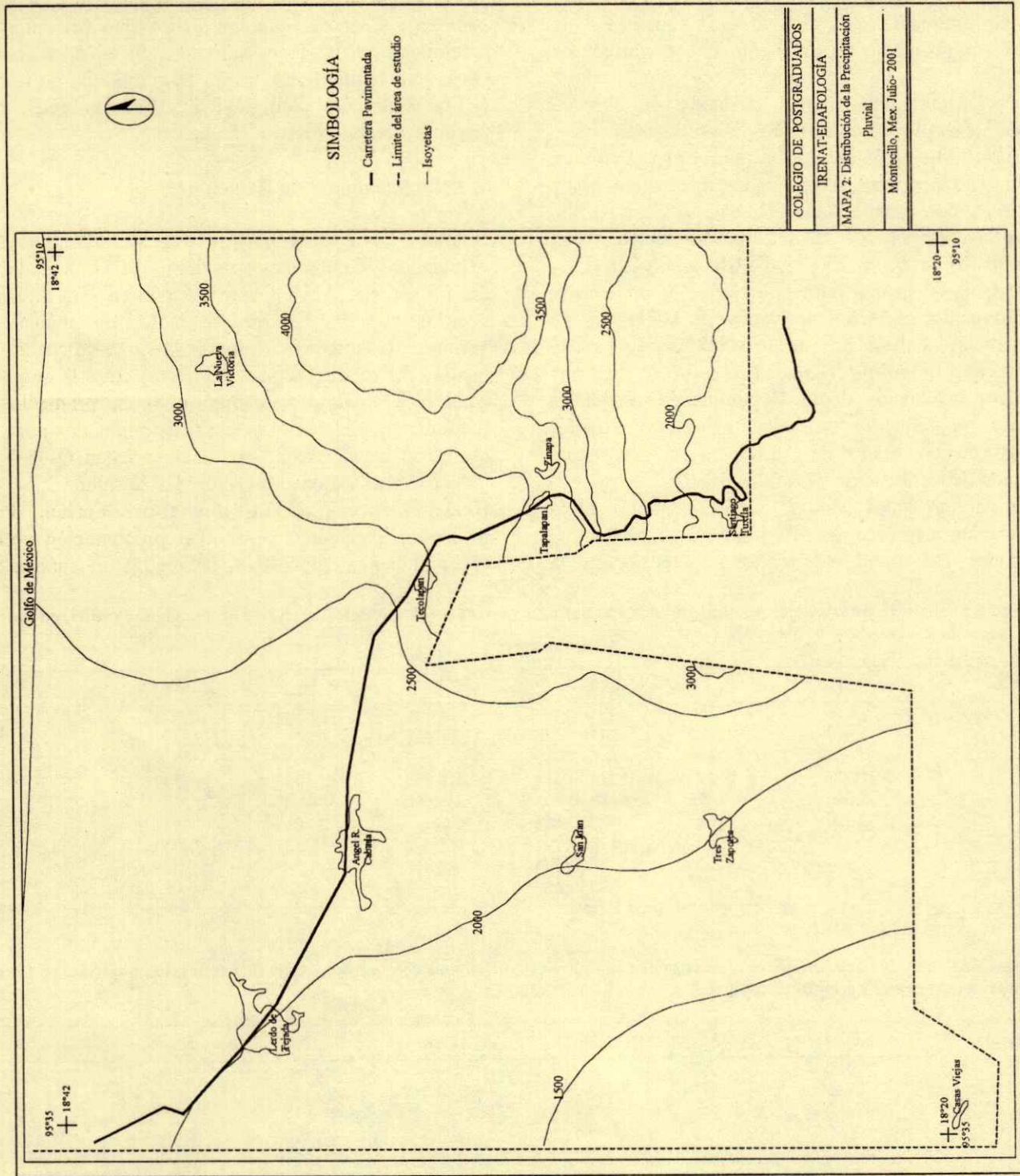
El análisis de la producción de la caña se limitó sólo a las variedades que cubren una superficie mayor que 10% de la zona, por lo que se seleccionaron las variedades Q-68, Q-96 y CP72-2086. Estas variedades se distribuyen en diferente número de clases de tierra; la variedad Q-68 se cultiva en 22 clases, la variedad

Q-96, en 18 clases y la variedad CP72-2086, únicamente en 13 clases. Al analizar los datos de producción, se observó una tendencia a la disminución en el rendimiento conforme transcurren los ciclos de producción (socas), que difiere con la clase de tierra y con la variedad cultivada (Cuadro 4).

Cuadro 4. Rendimiento promedio por clase de tierra y ciclo de producción para la variedad Q-68.

Clase de tierra	Rendimiento					
	Plantilla	Soca	R1	R2	R3	R4
	----- t.ha ⁻¹ -----					
AMe	67.8	65.0	57.0	48.0	sd	sd
ANc	92.5	81.0	75.1	68.7	62.2	sd
ARa2	93.7	76.0	62.5	51.4	sd	sd
BAj	84.8	73.3	64.1	59.6	45.6	sd
BAn	78.0	74.7	67.7	63.6	59.7	sd
BLb	88.1	78.3	72.7	68.1	65.0	57.1
BLp	92.3	84.6	85.1	73.6	65.6	57.3
BLz	97.7	84.9	71.8	63.7	56.4	sd
BRa	93.4	86.3	83.1	66.4	41.6	sd
BRc	83.2	75.6	65.0	53.1	36.0	sd
BRn	88.3	85.5	75.0	69.5	67.5	57.5
CHp	77.7	62.7	66.3	56.3	45.3	sd
COj	85.6	70.3	65.6	58.6	53.3	sd
NEa1	78.8	78.3	65.5	57.5	52.0	sd
NEa2	118.0	107.6	86.1	73.0	sd	sd
NEf1	95.0	87.0	79.0	65.0	61.1	56.0
NEf3	102.0	88.4	80.1	71.0	60.4	62.1
NEI	102.8	89.9	76.5	63.9	57.1	43.3
NEp	83.3	73.3	67.5	64.1	sd	sd
PVh	98.3	81.0	68.3	64.4	60.0	sd
REp	71.1	65.5	63.8	53.6	sd	sd
ROp	90.6	79.6	69.2	63.3	52.7	sd

R = resoca; sd = sin datos.



Mapa 2. Distribución de la precipitación pluvial.

Este comportamiento es similar para las otras dos variedades analizadas; se determinó que la variedad más productiva por ciclo de cultivo es la CP72-2086, con una producción durante el ciclo "plantilla" de 96 t ha⁻¹ en promedio, mientras que en las variedades Q-68 y Q-96 se obtienen 84 y 94 t ha⁻¹, respectivamente. Esta misma tendencia se observó durante los siguientes cinco ciclos de producción.

En la bibliografía se reporta que la producción de la caña de azúcar está determinada por el suelo donde se cultive; por ejemplo, para Hawai, se observó que los **Andosoles mólicos** son los más productivos, con rendimientos de 200 a 250 t ha⁻¹ (Clements, 1980); en Queensland, Australia, para este cultivo se prefieren a los **Fluvisoles eútricos**, derivados de basalto y de granito, con rendimientos de 160 a 200 t ha⁻¹ en el primer ciclo de cultivo (King *et al.*, 1965); mientras que para los suelos de la República Mexicana, el máximo rendimiento se encontró en **Vertisoles pélicos**, en el estado de Morelos, con una dosis adecuada de fertilización (Andrade, 1991).

En el presente estudio, y considerando a la clasificación científica, se determinó que para las tres variedades estudiadas, los mejores suelos para la

producción de caña de azúcar son los **Fluventic Hapludolls** (taxonomía de suelos) o los **Fluvisoles mólicos** (WRB) con un rendimiento mayor que 100 t ha⁻¹; mientras que los suelos que presentan el rendimiento más bajo son los clasificados como **Oxyaquic Udifluvents**, según la taxonomía de suelos y **Fluvisoles úmbrico-glético** según la WRB, con rendimientos inferiores a 75 t ha⁻¹.

4. Establecimiento de Relaciones

Relación clase de tierra-producción. Para las tres variedades dominantes y con la finalidad de determinar si el rendimiento del cultivo está afectado por las clases de tierra, se realizaron análisis de varianza (Cuadro 5). Al dividir la suma de cuadrados medios del modelo (clases de tierra) entre la suma de cuadrados totales, se estimó que, en promedio, el rendimiento del cultivo está determinado por las clases de tierra en 62% para la variedad Q-68 y en 68% para las variedades Q-96 y CP72-2086.

Relación precipitación pluvial-producción. Para determinar el efecto de la precipitación sobre el rendimiento del cultivo, se realizaron análisis de

Cuadro 5. Análisis de varianza del rendimiento de caña para las variedades dominantes y ciclo de producción plantilla, en función de las clases de tierra.

Variedad	F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fo	Pr > F	Ft
Q-68	CT	21	33483.359	1594.445	19.58	0.0001	1.943
	Error	260	21169.679	81.422			
	Total	281	54653.039				
Q-96	CT	17	21460.113	1262.359	21.06	0.0001	1.850
	Error	147	8810.335	59.9342			
	Total	164	30270.448				
CP72-2086	CT	12	17382.106	1488.508	14.51	0.0001	2.305
	Error	160	15970.703	99.817			
	Total	172	33352.809				

CT = Clase de tierra.

Cuadro 6. Análisis de varianza del rendimiento de caña para las variedades dominantes y ciclo de producción plantilla, en función de la distribución de la precipitación pluvial.

Variedad	F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fo	Pr > F	Ft
Q-68	PP	4	15107.798	3776.949	26.46	0.0001	3.399
	Error	277	39545.241	142.762			
	Total	281	54653.039				
Q-96	PP	4	7692.530	1923.132	13.63	0.0001	3.447
	Error	160	22577.917	141.112			
	Total	164	30270.448				
CP72-2086	PP	5	11174.532	2231.906	16.83	0.0001	3.132
	Error	167	22178.276	132.804			
	Total	172	33352.809				

PP = precipitación media anual.

varianza de acuerdo con el ciclo de producción y con la variedad cultivada (Cuadro 6). Los resultados muestran que el factor precipitación pluvial afecta a la producción del cultivo de la siguiente manera: en la variedad Q-68, se encontró un coeficiente de determinación de 27%; en la variedad Q-96, de 25%; y en la variedad CP72-2086, de 34%.

Rendimiento del Cultivo por Ciclo de Producción

Con el objeto de probar la hipótesis de que las clases de tierras tienen una alta correlación con el rendimiento de caña, se generaron modelos de regresión lineal utilizando datos promedio por ciclo de producción para cada clase de tierra y variedad cultivada (Cuadro 7).

De acuerdo con estos resultados, se determinó que la producción en cada clase de tierra está influenciada en más de 80% por el ciclo del cultivo. Por otra parte, también fue posible agrupar a las clases de tierra, tanto por la disminución de la producción por ciclo de cultivo, determinada por la pendiente del modelo de regresión, como por su producción potencial, considerando la ordenada al origen.

En el caso de la variedad Q-68, se observó que las clases de tierra que menos reducciones presentan en la producción por hectárea y por ciclo son: AMe, ANc, BAn, BLb, BLp, BRn, COj, CHp, NEa1, NEp y REp (< 8 t) y las clases que mayores pérdidas tienen son: ARa2, BRa y NEa2 (> 12 t).

Con el análisis a la variedad Q-96, se encontró que las clases de tierra que presentan menor disminución en su productividad por ciclo son: ARa1, BRc, BRr, NEa2, POi y REp (< 7 t) y las que se ven más afectadas son: ANz, ARj, BLb, COj y NEI (> 10 t).

Cuadro 7. Modelos de regresión estimados en algunas clases de tierra.

Variedad	Clase de tierra	Modelo de regresión	R ²
Q-68	NEa2	Y = -15.708 X + 135.53	0.9835
	ANc	Y = -7.2893 X + 97.804	0.9803
	AMe	Y = -6.5355 X + 76.039	0.9587
Q-96	NEa2	Y = -6.6454 X + 122.170	0.8410
	BAj	Y = -7.5505 X + 95.475	0.9061
	REp	Y = -5.1778 X + 77.214	0.8610
CP72-2086	NEa2	Y = -9.0592 X + 133.22	0.8811
	NEf3	Y = -9.100 X + 105.500	0.9935
	BRa	Y = -4.8667 X + 83.600	0.9321

Y = rendimiento (t ha⁻¹), X = ciclo de cultivo (1 = plantilla, 2 = soca, 3 = resoca 1, etc.).

Para la variedad CP72-2086, las clases de tierra BLb y BRa presentan las menores reducciones en su producción (< 7 t) y las clases más afectadas son: ARj, BRr y PVa (> 10 t).

De acuerdo con los valores de la ordenada al origen, se estableció que para la variedad Q-68, las clases de tierra que presentan el máximo potencial productivo son: NEa2, NEI y BRa, con más de 110 t ha⁻¹, mientras que las clases AMe y REp tienen un potencial de menos de 80 t ha⁻¹; en el caso de la variedad Q-96, las clases con mayor potencial son: NEa2, NEf3 y NEI, con más de 115 t ha⁻¹, mientras que las que presentan una menor productividad son: BRr y BRc, con un potencial cercano a 80 t ha⁻¹; y para la variedad CP72-2086, el máximo potencial se reporta en la clase ANz, con más de 120 t ha⁻¹, mientras que el menor rendimiento se espera en la clase BRa con 83 t ha⁻¹.

Duración del Cultivo en Campo

Una aplicación práctica del presente estudio es la estimación del número de ciclos que se recomienda cultivar una variedad en cada clase de tierra, ya que se ha observado que rendimientos de campo inferiores a 50 t ha⁻¹ son incosteables, tanto para productores, como para los ingenios azucareros (García, 1973); este proceso se determinó con base en los modelos de regresión (Cuadro 8).

Cuadro 8. Ciclos productivos con rendimiento superior a 50 t ha⁻¹, de acuerdo con la variedad cultivada.

Variedad	Ciclo de producción	Clases de tierra	
Q-68	4	AMe, ARa2, BAj, BRa, BRc	
	5	BLz, COj, CHp, NEa1, NEa2, NEI, NEp, PVh, REp, ROp	
	6	ANc, BAn, NEf1	
	7	BLb, BRn, NEf3	
	8	BLp	
	Q-96	4	ARj, BRr, CCj
		5	ANz, ARa2, BLb, BRa, REp
		6	ANc, BAj, BLz, BRc, BRn, NEf3, NEI
CP72-2086	7	ARa1, POi	
	10	NEa2	
	3	ARj, BRr	
	5	PVa, ANc	
	6	BRa, NEf3, NEI	
	7	ANz, BLb, POi, PVh	
	9	NEa2	

Cuadro 9. Factores limitativos de las clases de tierras para la producción de caña de azúcar, de acuerdo con Sys *et al.* (1993).

Factor	Clasificación			
	MA	A	mA	NA
Pendiente	PVm	BRr COj, PVa, CHp		
Drenaje	ARa2, BAn, BLb, BLz, BRp, BRc, CHh, NEf1, PVa, REp,	BRr, NEp	ROp	
Textura	BAAs, BRc, NEf1, POi, PVa	ARj, BLz, NEa1, NEa2, NEI		ANz, PVh
Fragmentos gruesos	BRa, REp	ANz, PVh		
Profundidad	NEe, BLb, REp, ARa2, ANc, BRr	AMe, CHh, NEp, ROp		
Saturación de bases (%)	AMe, ARj, CHh, NEa2, NEe, POi, PVm, ROp	ANc, ARa2, BAj, BRa, BRn, BRp, BRr, COj, CHp, NEa1, NEf2, NEf3, NEI, NEp, REp	ARa1, BAn, BAAs, BRc, BLz, NEf1, PVa	
Suma de bases intercambiables		BLb, NEp	ARa1, BAn, BLz, CHh, NEf2, NEI	ARa2, BAj, BRa, BRn, BRp, CHp, COj, NEf1, NEf3, PVa, REp, ROp
pH	ANz, ARa2, BLb, NEa2, NEf1, NEp, PVa, PVm,	ARa1, BAj, BAn, BAAs, BRc		
Carbono orgánico	ARa2, BAn, NEf1	ANc, ANz, ARa1, BAj, BAAs, NEf2		

MA = muy apta, A = apta, mA = marginalmente apta, NA = no Apta.

Factores Limitativos para la Producción de Caña de Azúcar

En la zona de estudio se determinó que la productividad de las clases de tierra está relacionada con sus características edafológicas (textura, profundidad, contenido de materia orgánica, pH, y PSB). Por una parte, la presencia de limitaciones físicas, como horizontes endurecidos en el subsuelo (clases AMe y REp) o niveles freáticos cercanos a la superficie (ROp), contribuyen a la baja en el rendimiento del cultivo y, por otro lado, cuando se tienen condiciones favorables para el desarrollo de los cultivos, pueden esperarse altos rendimientos como en el caso de las clases de tierra NEa2 y ANz, propiciados por alto contenido de materia orgánica (> 4%), buen drenaje, consistencias friables y valores de pH cercanos a la neutralidad (Cuadro 9).

CONCLUSIONES

Con el conocimiento del recurso suelo por parte de los campesinos, fue posible identificar las principales limitantes (estratos endurecidos y niveles freáticos cercanos a la superficie) y las mejores condiciones edafológicas (alto contenido de materia

orgánica, drenaje, textura, y pH) para la producción de caña de azúcar en la región de estudio.

El factor suelo expresado en términos de clases de tierra es más importante que el factor clima (precipitación pluvial) en la producción del cultivo, ya que explican 60 y 30%, respectivamente, de la variación del rendimiento.

El conocimiento local de los suelos tiene una alta correlación con la producción de caña de azúcar (más de 80%) en la zona de estudio. Además, se determinó que las mejores clases de tierra desde el punto de vista productivo son la Negra arenosa (NEa2) y la Arenosa de Zinapa (ANz); mientras que con relación al número de ciclos de cultivo con rendimientos superiores a 50 t ha⁻¹, son la Negra arenosa (NEa2) y Barrialosa del Paraíso (BLp), con más de ocho.

LITERATURA CITADA

- Alfaro O., E.R., C.A. Ortiz S., C.A. Tavarez E., Ma del C. Gutiérrez C. y A. Trinidad S. 2000. Clasificaciones técnicas de suelos en combinación con el conocimiento local sobre tierras, en Santa María Jajalpa, Estado de México. Terra 18: 93-101.
- Anderson, M. 1995. Indigenous soil conservation in the highlands of Northern Thailand. M.Sc. Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.

- Andrade C., M. 1991. Diagnóstico nutrimental en caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) para la recomendación de la fertilización usando índices Kenworthy. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Calderón A., G. 1983. Caracterización y utilidad de la clasificación campesina de suelos en dos zonas chinamperas del valle de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Clements, H.F. 1980. Sugarcane crop logging and crop control: Principles and practices. The University Press of Hawaii. Honolulu, Hawaii.
- Cruz B., R. 1994. La clasificación campesina de tierras para la generación y transferencia de tecnología agrícola entre pequeños productores: Caso del maíz en la región central de Veracruz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Cuanalo de la C., H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 3a ed. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- García C., L.R. 1997. La agroindustria azucarera de México frente a la apertura comercial. Colección Estructura y dinámica de sistemas agroindustriales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- García E., A. 1973. Manual de campo en caña de azúcar. Comisión Nacional de la Industria Azucarera. Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar. México, D.F.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1981. Atlas Nacional del Medio Físico. México D.F.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1984. Carta edafológica 1:250 000 E15-1-4. Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1993. Espaciograma 1:250 000 E-15-1-4. Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1999. Anuario Estadístico del Estado de Veracruz, Tomo II. Aguascalientes, México.
- ISSS-ISRIC-FAO. International Society of Soil Science-International Soil Reference and Information Center-Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 84. Rome, Italy.
- King, N.J., R.W. Mungomery y C.G. Hughes. 1965. Manual of cane-growing. Australian Agricultural and Livestock Series. Angus and Robertson Ltd. Sydney, Australia.
- Licona V., A.L. 1991. Metodología para el levantamiento de tierras campesinas a nivel regional y la técnica de producción agrícola en ejidos del centro de Veracruz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Luna O., P. 1982. Estudio comparativo sobre la clasificación campesina de suelos en dos comunidades del valle de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Lleverino G., E., C.A. Ortiz S. y Ma. del C. Gutiérrez C. 2000. Calidad de los mapas de suelos en el ejido de Atenco, Estado de México. Terra 18: 103-113.
- Marten, G.G. y P. Vityakon. 1986. Soil management in traditional agriculture. pp. 199-225. In: G.G. Marten (ed.). Traditional agriculture in South-East Asia: A human ecology perspective. Westview Press. Boulder, CO.
- Maskey, S.L. y S. Bhattarai. 1984. Use of indigenous plant materials as fertilizers. Nepalese J. Agric. 15: 125-150.
- McRae, S.G. 1988. Practical pedology. Studying soils in the field. Ellis Horwood Publishers. London, England.
- Ortiz S., C.A. 1999. Los levantamientos etnoedafológicos. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Ortiz S., C.A., D. Pájaro H. y V.M. Ordaz Ch. 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Palma T., A. 2000. Contribuciones a la metodología del ordenamiento ecológico territorial detallado en México. Estudio de caso de dos comunidades rurales de la cuenca del río Texcoco. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Parra U., G. 1989. Zonificación agroecológica para la producción de caña de azúcar en algunos estados de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Poole, P. 1995. Indigenous peoples, mapping and biodiversity conservation: An analysis of current activities and opportunities for applying geomatics technologies. Peoples and Forest Program Discussion Paper, Biodiversity Support Program. World Wildlife Fund. Washington, DC.
- Quiroz M., J. 1983. Clasificación otomí de tierras en dos sistemas terrestres del valle del Mezquital, estado de Hidalgo. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- SAS Institute Inc. 1989-1996. V.6.12. North Carolina State University. Cary, NC.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soils surveys. 2nd ed. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- SPP. Secretaría de Programación y Presupuesto. 1980. Síntesis geográfica del estado de Veracruz. México, D.F.
- Sys Ir. C., E. van Ranst y F. Beernaret. 1993. Land evaluation, Part I, II y III. Agricultural Publications 7. General Administration for Development Cooperation. Brussels, Belgium.
- Van Reewijk, L.P. 1993. Procedures for soil analysis. Technical paper 9. 4th ed. International Soil Reference and Information Center. Wageningen, The Netherlands.
- Williams, B.J. 1980. Ethno-pedology and social ecology of soils in the 16th century Valley of Mexico. (Informe mimeografiado) Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

DISTRIBUTION OF THE HUMIFIED FRACTIONS AND CHARACTERISTICS OF THE HUMIC ACIDS OF AN ULTISOL UNDER CULTIVATION OF EUCALYPTUS AND SUGAR CANE

Distribución de las Fracciones Humificadas y Características de los Ácidos Húmicos de un Ultisol Sometido al Cultivo de Caña de Azúcar y de Eucalipto

Luciano P. Canellas¹, Ary Carlos X. Velloso¹, Victor M. Rumjanek², Fernando Guridi³, Fábio Lopes Olivares⁴, Gabriel de A. Santos³ y Raimundo Braz-Filho⁵

SUMMARY

We characterized the distribution of the humified fractions of the organic matter of an Ultisol subjected to cultivation with sugar cane and eucalyptus. This was carried out by using humic acids isolated from two soil depths (0 to 5 and 5 to 10 cm) through the use of element analysis, E_4/E_6 ratios, ^{13}C -NMR and infrared spectroscopy, electron scanning microscopy, and chemical analyses as characterizing techniques. The insoluble humified fraction (humin) predominated in the soil organic matter. In the alkali-soluble fraction, the fulvic acid fraction prevailed characterizing the soil humus as fulvatic. Accumulation of humic acids was observed in the soil surface layer with different plant covers. Total acidity and element compositions of the isolated humic acids were shown to be similar to those of the fulvic acids. The IR analyses showed the presence of similar organic functional groups in the humic acids studied, confirmed by ^{13}C -NMR analyses, which permitted verification of certain quantitative differences in the distribution of organic C of the humic acids. No differences were observed in the morphological characteristics of the humic acids obtained from the two crop treatments and soil depths. However, remarkable morphological changes were observed with pH variation, increase in aggregation of the

plates and complexity of the structures, increased thickness, roughness, and reduction of sharp arrests and perforations as pH was reduced from 7.0 to 4.0.

Index words: Soil organic matter, humus, fulvic acids, infrared spectroscopy, ^{13}C -NMR, electronic scanning microscopy.

RESUMEN

Se caracterizó la distribución de las fracciones humificadas de la materia orgánica de un suelo sometido al cultivo de caña de azúcar y de eucalipto a través del fraccionamiento de la materia orgánica y caracterización de los ácidos húmicos aislados de dos profundidades (0 a 5 y 5 a 10 cm) a través de la determinación de la composición elemental, de la relación E_4/E_6 , de los estudios de RMN- ^{13}C , IR, microscopía electrónica de barrido y de análisis químico. En el fraccionamiento de la materia orgánica se presentó un dominio de la fracción humificada insoluble (humina). En la fracción alcalino-soluble predominaron los ácidos fúlvicos, caracterizando por esto al humus del suelo, como fulvático. Se observó la acumulación de ácidos húmicos en la capa superficial del suelo en las diferentes coberturas vegetales. El análisis por IR mostró la presencia constante de grupos funcionales orgánicos semejantes en los ácidos húmicos estudiados, hecho confirmado por el análisis de RMN- ^{13}C , que permitió, además, verificar ciertas diferencias cuantitativas relevantes en la distribución del C orgánico de los ácidos húmicos. No se observaron diferencias en las características morfológicas en los ácidos húmicos obtenidos de las dos coberturas vegetales y profundidades de suelo. Sin embargo, se observaron cambios considerables con la variación del pH, aumento de la agregación de las láminas y de la complejidad de las estructuras, aumento del espesor, rugosidad y disminución de los cantos y perforaciones al reducir el pH de 7.0 a 4.0.

¹ Universidade Estadual do Norte Fluminense, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Laboratório de Solos. Av. Alberto Lamego 2000, 28015-620, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil. (canellas@uenf.br)

² Departamento de Química, ³ Departamento de Solos. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. km 47 da antiga rodovia RJ-SP, 23851-970, Seropédica, RJ, Brasil.

⁴ Universidade Estadual do Norte Fluminense, (UENF/CBB/LBCT).

⁵ Universidade Estadual do Norte Fluminense, (UENF/CCT/LCQUI, Seção de Produtos Naturais).

Palabras clave: *Materia orgánica del suelo, humus, ácidos fúlvicos, espectroscopia infrarroja, RMN¹³C, microscopía electrónica de barrido.*

INTRODUCTION

Most of the soil organic matter is formed by the biological transformation of plant and animal residues into humic substances (fulvic and humic acids, and humins). These substances are determined by classical procedures of fractionation based on solubility in basic/acidic media (Santos and Camargo, 1999). The content and distribution of the organic matter are correlated with the main properties of the soil (Canellas *et al.*, 2000) and they can serve as indicators of the changes in soil quality (McCallister and Chien, 2000).

The ¹³C-NMR spectroscopy has been shown to be a very useful technique in the study of both the distribution of the organic carbon in humic substances (Preston, 1996; Canellas *et al.*, 1999b) and of the alterations caused by soil management (Martin *et al.*, 1998). The analysis of humic substances by ¹³C-NMR spectroscopy reveals that fulvic acids (FA) consist mainly of polysaccharides, while the humins (H) are generally composed of modified lignins. This distribution varies little as a function of soil management and environmental conditions. Since the C distribution in the functional groups in humic acids is altered significantly, this variation can be used for the evaluation of the process of soil organic matter humification (Zech *et al.*, 1997). A decrease in C content is usually observed in areas with agricultural cultivation, with persisting soil C pools which are more resistant to microbiological degradation (Blair *et al.*, 1997).

The main objective of this work was to investigate the distribution of the humified fractions and to characterize the several forms of organic carbon in the humic acids of a Typic Paleudult (Soil Survey Staff, 2001) under sugar cane and eucalyptus cultivation.

MATERIAL AND METHODS

The areas studied are located in Travessão, municipal district of Campos, State of Rio de Janeiro, Brazil, where the soil, according to the Brazilian classification, is a Argissolo Amarelo class (Typic Paleudult, according to Soil Survey Staff, 2001). The soil is at present subjected to three production systems: cultivation with eucalyptus for eight consecutive years, cultivation with eucalyptus for five years with three years of regeneration after one felling for wood exploration, and finally, cultivation with sugar cane for more than eight years. Sugar cane cultivation is a traditional agricultural practice in the Northern State of Rio de Janeiro.

The three areas studied are adjacent to each other with an area of 500 m². Eight soil samples were collected for each area at two soil depths (0 to 5 cm and 5 to 10 cm). The main chemical and physical characteristics of the soil were determined according to the methodology of EMBRAPA-CNPS (1997) (Table 1).

Organic matter fractionation was done with the method of Belchikova-Kononova with the modifications described in detail in Santos (1984). Soil samples were treated with *o*-phosphoric acid (2 mol L⁻¹) to separate the free fulvic acid fraction (FFA). Humic materials were then extracted by adding 100 mL of 0.1 mol L⁻¹ NaOH + Na₄P₂O₇ to 10 g of soil subsamples. Air was displaced by N₂ from the flask, the flask was closed and then shaken for 24 h at room temperature. The dark-colored supernatant solution was separated from the residual soil by centrifugation at 3500 g for 30 min and decanting. Soil residue was resuspended in 50 mL of 0.1 mol L⁻¹ NaOH + Na₄P₂O₇, then shaken for 4 h. The solution was centrifuged again and the supernatant was added to the supernatant collected previously. The alkaline extraction solution containing dissolved humic acids (HA) and fulvic acids (FA) was acidified to pH 1.0 with 6 mol L⁻¹ HCl. After fractionation,

Table 1. Properties of soil samples from two depths in the three areas studied.

Areas	Depth cm	pH	K	Ca	Mg	Na	P	Sand	Lime	Clay
			----- cmol(+) kg ⁻¹ -----				mg kg ⁻¹	----- g kg ⁻¹ -----		
Sugar cane	0-5	4.4	65	0.8	0.3	0.02	4	670	30	300
	5-10	4.3	53	0.8	0.4	0.03	3	650	50	300
Eucalyptus	0-5	4.5	102	2.3	1.2	0.10	4	680	20	300
	5-10	5.4	21	3.5	1.7	0.11	6	680	40	280
Sprout of eucalyptus	0-5	5.7	156	3.0	1.5	0.08	4	690	30	280
	5-10	4.2	50	0.8	0.5	0.04	2	660	50	290

the content of organic carbon in the soluble humified organic matter (FFA, FA and HA) and in the insoluble residues (humins) was determined by a Walkley-Black procedure (Anderson and Ingram, 1996).

Carbon isotope ratios of soil organic matter ($\delta^{13}\text{C}$) from the areas cultivated with eucalyptus for eight consecutive years and sugar cane were measured based on the CO_2 produced after combustion, under pure oxygen atmosphere at 900°C . The gas was then purified and analyzed in a mass spectrometer.

Humic acid (HA) extraction was performed with a 0.5 mol L^{-1} NaOH solution (1:10 soil/solvent ratio) under N_2 atmosphere. To improve the NMR- ^{13}C spectra resolution, KCl was added to the extraction solution under continuous stirring to reach concentrations of 0.03 mol L^{-1} . After precipitation and further centrifugation, the residues were discarded. To isolate the HA, the system was then acidified with HCl 6 mol L^{-1} to pH 1. The redissolution and reprecipitation of the HA was repeated three times. The HA purification was performed by using a diluted mixture of HF-HCl solution and dialyzing against deionized water. Finally, the HA was dried by lyophilization.

Total acidity [$\text{Ba}(\text{OH})_2$ method] and carboxylic acidity [$\text{Ca}(\text{OAc})_2$ method] were determined according to Schnitzer and Gupta (1965) followed by a potentiometric titration. Phenolic acidity was obtained by difference. The elemental composition was determined with a CHN Perkin-Elmer auto analyzer. Molar absorption at 465 and 665 nm (E_4/E_6 ratios) was measured by dissolving 3 mg of HA samples in a 0.05 mol L^{-1} NaHCO_3 solution, by means of a Varian DMS 80 spectrophotometer. The IR spectra were taken with KBr pellets (1 mg HA per 100 mg KBr) with a Perkin Elmer 1420 spectrophotometer. The ^{13}C -NMR spectra were run in solution with a Bruker AC-200 spectrometer (50.30 MHz for ^{13}C) with 150 mg of HA dissolved in 1 mL of NaOH 0.5 mol L^{-1} (9:1 $\text{H}_2\text{O}:\text{D}_2\text{O}$), using the INVGATE sequence (inverse decoupling), with a pulse of 90° , acquisition time of 0.2 s, 16K size and about 200 000 transients for each sample. The chemical shift ($\delta^{13}\text{C}$) is expressed on a scale relative to tetramethylsilane (TMS $\delta^{13}\text{C} = 0$). For electron scanning microscopy (ESM), a 0.01 gL^{-1} solution was prepared by dissolving 10 mg HA in 5 mL 0.1 mol L^{-1} NaOH, diluting to 1000 mL with distilled water and pH adjusted to 7.0, 5.5, and 4.0 with a diluted HCl solution. A drop of purified HA solution was then

placed on a ESM specimen stub and processed according to the liquid N_2 freeze-drying method, described by Tan (1985). Prior to analysis by ESM, the samples on the stubs were coated once for 85 s with a BAL-Tec SCD 050 sputter coater. The samples were then analyzed by means of a DSEM 962 Zeiss ESM at 15-20 kV.

RESULTS AND DISCUSSION

The distribution of the humified fractions of the organic matter was specific for each soil type reflecting the characteristics of formation. Soil use can definitively alter the distribution of the most recalcitrant fractions. The results of the organic matter fractionation are shown in Table 2. The FFA, the least condensed and highest mobility alkali-soluble fraction, varied from 1 to 5% of the total organic carbon, where accumulation was observed with depth. The FA content associated to the HA fractions was higher than the FFA content and showed a tendency to accumulate. The behavior of HA was reverse, its concentration was higher on the surface. This result is in agreement with that observed by Orlov (1998), who inferred that the greater biological activity on the surface probably promotes the formation of condensed alkali-soluble humic substances with greater stability. Consequently, larger HA/FA ratios were found at the surface.

The HA/FA ratios were used as an indicator of the humus quality. In the three areas of study, the humus showed a fulvatic nature, that is, there was a prevalence of FA in the alkali-soluble fraction. This ratio represents an important characteristic of organic matter as an agronomic indicator of soil quality. In acidic soils, fungi development is favored and promotes the degradation of lignins to polyphenols which give rise to less polymerized humic substances. The low content of exchangeable bases in the soil may also decrease the intensity of the humification process i.e., condensation and synthesis. Consequently, the HA/FA ratio is smaller in these soils. According to Ortega (1982), both the increase in acidity (carbonic acid generation) of the system and the formation of carboxylic groups (oxidation of phenolic OH) are favored during litter oxidation. The alkali present, either in the litter or in the soil, may neutralize these acidic products. In the case of a low concentration of alkali, the decomposition products have low pH values and promote H-saturation of the exchange

Table 2. Organic matter fractions in the three areas studied.

Sites	Depth cm	Co g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	FFA	FA	HA	H	HS	HA/FA
Sugar cane	0-5	13.7 a (100%)	0.6 a	21.1 a	0.5 a (4%)	1.7 a (12%)	0.8 a (6%)	10.7 a (78%)	11.7 b (85%)	0.54 a
	5-10	13.4 a (100%)	0.6 a	22.5 a	0.7 b (5%)	0.9 a (7%)	0.1 b (0.7%)	10.5 a (78%)	12.5 ab (93%)	0.004 c
Eucalyptus	0-5	26.9 b (100%)	1.3 b	24.6 a	0.4 a (1%)	1.5 a (6%)	1.2 c (4%)	12.1 a (45%)	15.3 a (57%)	0.62 a
	5-10	22.3 b (100%)	1.1 b	27.8 a	0.6 b (3%)	3.8 b (2%)	0.2 b (0.9%)	16.7 b (75%)	20.7 a (93%)	0.03 c
Sprout of eucalyptus	0-5	28.3 b (100%)	1.11 b	34.6 b	0.7 b (2%)	1.5 a (5%)	2.1 d (7%)	12.7 a (45%)	17.1 a (60%)	0.92 b
	5-10	25.3 b (100%)	0.9 ab	23.9 a	1.0 c (4%)	2.1 b (8%)	0.1 b (0.4%)	12.7 a (50%)	15.2 a (60%)	0.008 c
Mean		21.7	0.9	25.8	0.7	1.9	0.7	12.1	15.4	0.35
CV (%)		15.4	28.4	43.6	14.1	25.8	50	13.8	13.3	41.6

Values followed by the same letter in a column are not statistically different. Tukey, P = 0.05.

C_o = total organic carbon; FFA = free fulvic acid; HA = humic acid; FA = fulvic acid H = humin; HS = humic substances.

complex, decreasing the microbial activity, and promoting the synthesis of condensed humic substances. Furthermore, the mobile fractions, FFA and FA, are responsible for the breakdown of the soil mineral fraction and the formation of soluble quelates with metallic cations, thus playing a major role in the pedogenetic process called queluviation.

Although the soil organic matter exhibits a fulvatic character, the humification rate was quite high, varying from 56 to 95% of the soil organic carbon (Table 2). This is probably due to the stabilization of organic compounds via the association with the mineral fraction and/or the preservation of organic compounds of nonpolar nature in the humin fraction. The humin contents found were within the range of values considered by Dabin (1981), who classified them from strong to very strong. These contents are considered characteristic of tropical environments. In this study, the observed accumulation with depth of the humin fraction was accompanied by an increase in the alkali-soluble fractions, suggesting that this transport may also be important in the process of organic matter stabilization.

The HA presented general features (e.g., presence of oxygenated functional groups, aromatic and aliphatic chains, optical coefficients, etc.), which classify them as a fraction of the humified organic matter. These characteristics were altered as a

function of the way these HA were formed, and also because of the management of the soils. The quantitative results of this study support this statement. Thus, it can be inferred that as the HA is accumulated on the surface (higher biological activity), drastic decrease with depth occurred as a response to the less favorable ecological conditions found for humification (e.g., smaller partial pressure of O₂). Differences in its structural features may reflect that the production system may serve as a stable indicator of organic matter quality.

The HA element composition is presented in Table 3. The C content in HA was significantly lower than the values observed for HA of pedogenic origin, which, according to Stevenson (1994), varies from 53.8 to 58.7%. This result suggests that, besides the fulvatic nature of the soil organic matter, the alkali-soluble fraction that precipitates in weakly acidic conditions (pH 4.2-5.7, Table 1) is not well developed, thus showing a small degree of condensation, with a behavior similar to that of fulvic acids. The isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}\text{‰}$) of the organic matter of the areas where eucalyptus and sugar cane were cultivated during eight years led to that conclusion. The values of -17.55 and -18.53‰ for $\delta^{13}\text{C}$ for the soil depths of 0-5 cm and 5-10 cm, respectively, found in the sugar cane area were within the expected range for C4 plants (-9 to -19‰, Balesdent *et al.*, 1987) and the values $\delta^{13}\text{C}$ of -24.30 and -24.97‰ for depths of 0-5 cm and 5-10 cm,

Table 3. Element composition, atom ratio, ash content, E₄/E₆ ratio, total acidity, carboxylic and phenolic OH content in the three areas studied.

Parameters	Sugar cane		Eucalyptus		Sprout of eucalyptus	
			Depth (cm)			
	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10
C (%)	32.2	33.5	32.4	38.0	27.4	28.5
H (%)	4.1	4.3	4.0	5.0	3.4	4.1
N (%)	2.7	3.0	2.2	2.7	1.8	2.3
O (%)	61.0	59.3	61.0	54.8	66.9	65.5
C/N	12	12	17	12	16	12
C/H	8	8	8	8	8	7
O/C	2	2	2	1	2	2
Ash (%)	2	3	3	2	3	3
E ₄ /E ₆	3.4	3.6	3.0	2.8	3.4	2.6
Total acidity (cmol kg ⁻¹)	1340	1627	1331	1451	1030	1360
COOH (cmol kg ⁻¹)	1227	1520	1321	1220	1224	926
Phenolic - OH (cmol kg ⁻¹)	113	107	111	130	103	135

respectively, in the area with eucalyptus, were in the expected range for C3 plants (-23 to -40‰, Balesdent *et al.*, 1987). These values indicated an active and accelerated process of soil organic matter degradation-formation where only eight years of cultivation sufficed to produce a relative enrichment of total soil organic carbon with isotopic ¹³C. Adopting an exponential model for organic matter decomposition, it is possible to establish the mean residence time of the organic residues in the studied areas. For an 8-yr period (8 yr/ln (13.4 gC kg⁻¹/26.9 gC kg⁻¹)) the mean turnover time was 11.5 yr. The intensity of the degradation process, transformation and renewal of the soil organic matter was considered high, forming HA with a low carbon content.

The N content found in HA was within the range usually observed (between 0.8 and 4%, according to Stevenson, 1994). The C/N ratios for HA in the sugar cane area were practically the same at the soil depths of 0-5 and 5-10 cm, while in the eucalyptus areas a tendency to decrease was verified with depth, indicating probably the presence of stable structures. In the sugar cane cultivated area, the values of C/H ratio in the HA fraction was the same, regardless of depth. However, a decrease in C/H ratio with depth in the eucalyptus areas was observed, suggesting a low biopolymer transformation on the soil surface (Martin *et al.*, 1998). In the eucalyptus area lower values of O/C ratio were found at 5-10 cm than at 0-5 cm, more evidence of the presence of more stabilized structures deeper in the soil, since the beginning of the humification process is usually characteristic of the presence of oxygenated functional groups in high concentrations. This can be confirmed where high values of the total acidity were observed (Table 3).

The HA studied presented total acidity and carboxylic group contents similar to those found in the fulvic acid fraction. High acidity indicated a small degree of evolution, consistent with the high oxygen and low carbon contents.

The values found for the E₄/E₆ ratio were within the observed range for HA (< 5.0) decreasing with depth, and indicating a higher degree of condensation of HA. The values for E₄/E₆ were higher in the area with sugar cane than in those with eucalyptus, suggesting a larger participation of a less unsaturated group in the humic acid structures.

The IR spectra exhibited similar features in the HA (Figure 1). These were: a broad band around 3300 to 3400 cm⁻¹ (undissociated - OH groups), a small shoulder at 3070 cm⁻¹ (aromatic C-H stretch), a peak at 2930 cm⁻¹ (aliphatic C-H stretch), a small shoulder around 1700 cm⁻¹ (C=O of COOH), a well-pronounced peak at 1630 at 1660 cm⁻¹ (aromatic C=C, COO⁻, H-bonded C=O), a small sharp peak at 1500 cm⁻¹ (C=C aromatic rings), a broad peak in the 1100 to 1040 range cm⁻¹ (C-O stretch of polysaccharides) and a peak around 900 cm⁻¹ (C=C aromatic). In general, the IR spectra presented features consistent with the HA absorption spectra (Stevenson, 1994).

The ¹³C-NMR quantitative analysis of the functional groups was carried out by integration of the signals of the carbon atoms. The ¹³C-NMR spectra of HA are shown in Figure 2 and the assignments of the main signals are presented according to Wilson (1987). The ¹³C-NMR spectra of the HA in the sugar cane area and in the eucalyptus area continuously cultivated for eight years showed intense absorption signals in the sp³ C atom region (δ_c 40 to 0), due to

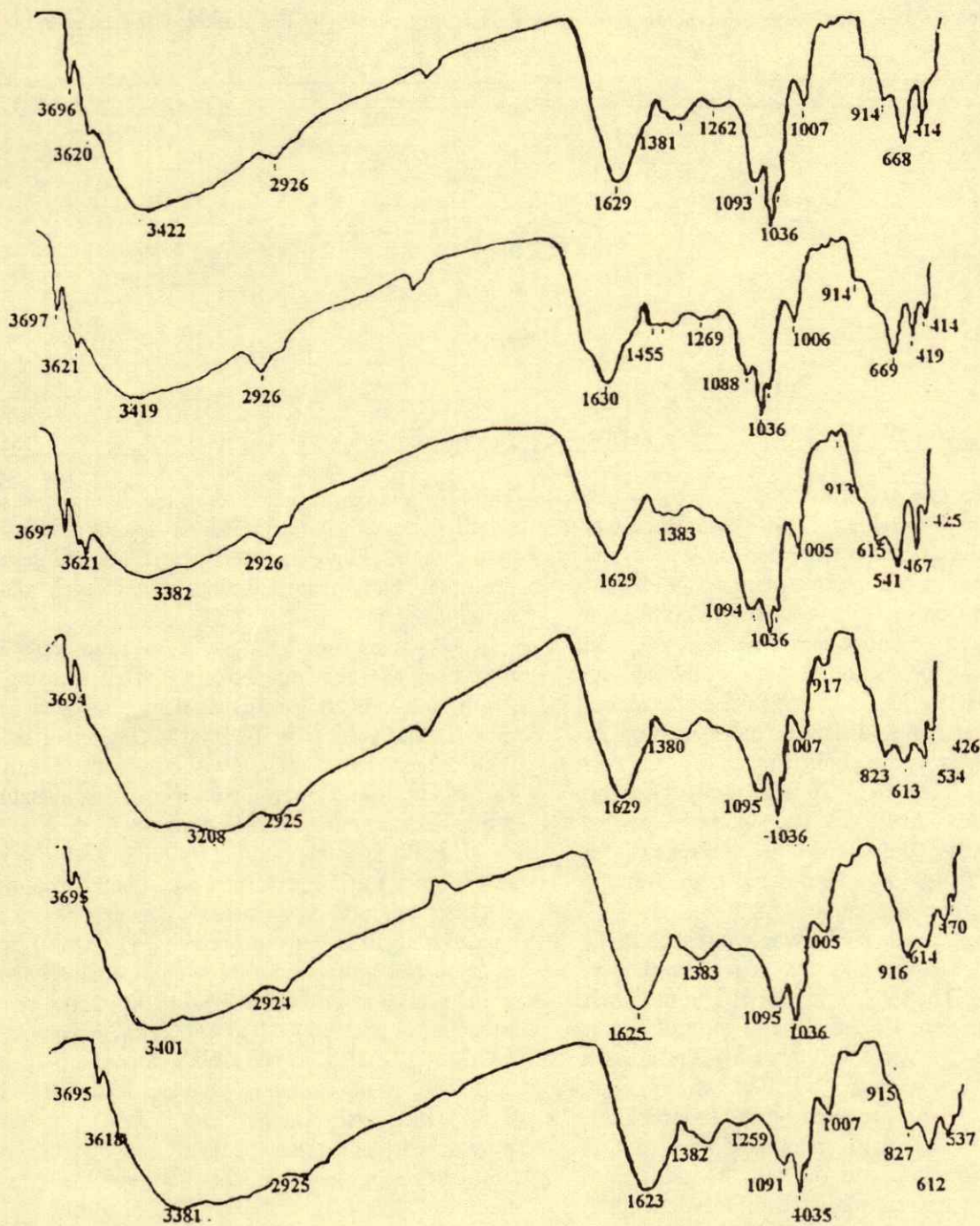


Figure 1. Infrared spectra of HA from eucalyptus (A and B), eucalyptus sprout (C and D) and Sugar cane (E and F) in two depth (0-5 and 5-10 cm).

CH_2 and CH_3 groups in the biopolymeric chains of the structures of difficult decomposition. Around $\delta_c 15$, the spectra showed signals characteristic of terminal methyl groups. The signals at $\delta_c 36.5, 44.0, 51.5$, and

54.5 can be assigned to sp^3 carbon atoms, including the C bound to N in amino acids and due to OCH_3 groups at $\delta_c 57.0$. The signal around $\delta_c 65$ can be assigned to a carbinolic C of primary alcohols and at

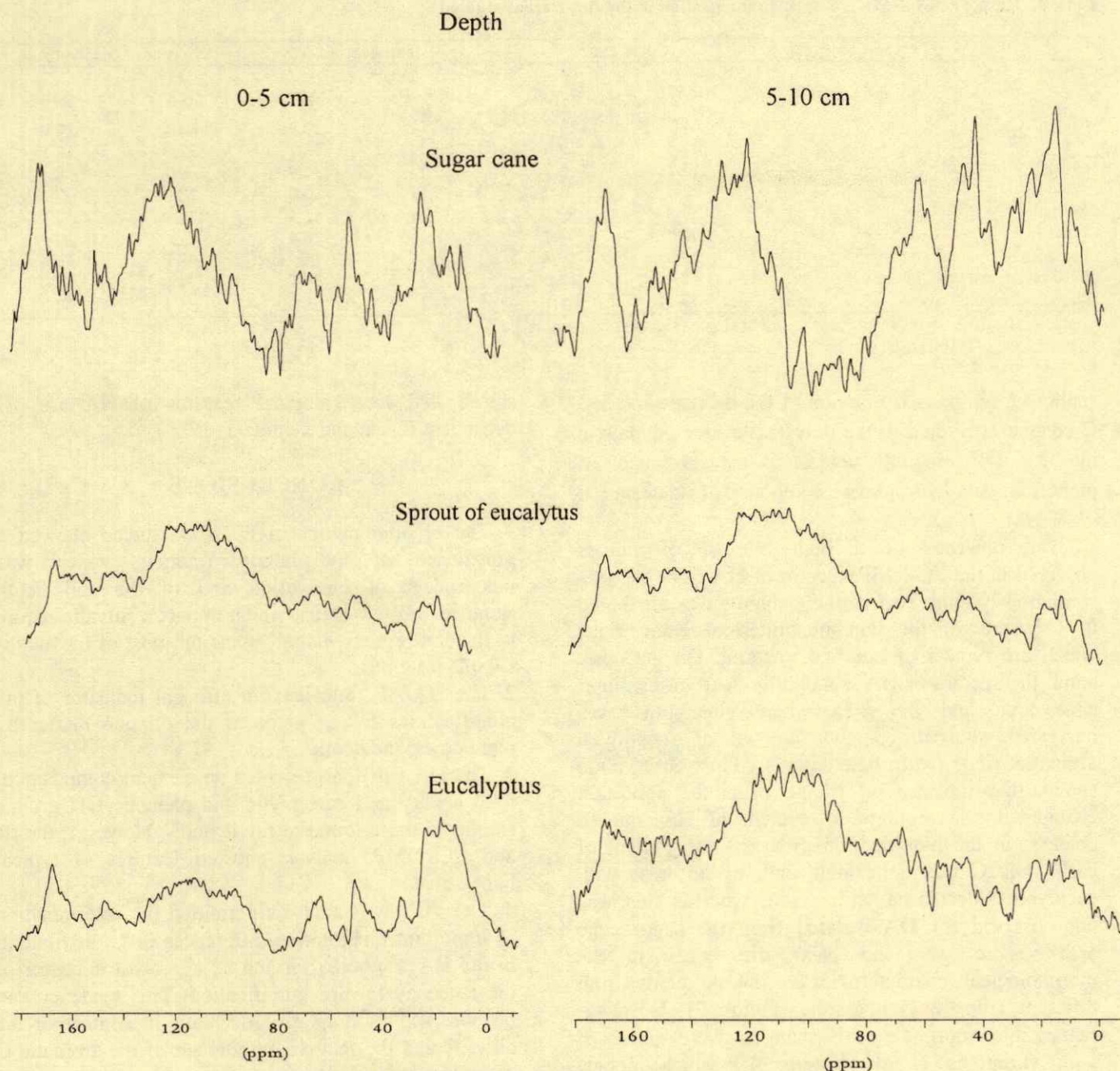


Figure 2. ^{13}C NMR spectra of humic acid from three areas studied.

the δ_c 70.2 to sp^3 C atoms bound to N and/or O. The presence of sp^3 carbon atom bound to two atoms of oxygen (aketal or ketal) found in carbohydrates, may be suggested by the signals present around δ_c 99.0. The signal at δ_c 130 can be assigned to sp^2 aromatic-C atoms. The δ_c 160-185 region showed signals corresponding to carboxylic-C atoms.

The quantitative analysis of the ^{13}C NMR spectra, based on the intensity of signals allowed the

recognition of the presence of a common process of humification in the areas studied (Table 4). In the case of the HA, isolated from the areas with sugar cane and sprout of the eucalyptus forest, there was an accumulation of alkyl-C atoms on the surface, originating from plant debris, mainly of rigid and hydrophobic structures such as suberins attributed to the polymethylene signals $(-\text{CH}_2-)_n$ in δ_c 0-40. Also, there is an increase in the aromatic nature of HA at a

Table 4. Humic acids NMR ^{13}C spectra integration in the three areas studied.

δ_{C} (mg kg $^{-1}$)	Sugar cane		Eucalyptus Depth (cm)		Sprout of eucalyptus	
	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10
Alkyl-C	61.7	29.7	47.5	37.9	64.1	27.9
0-40	35.8	19.0	29.3	18.2	32.8	12.1
40-70	13.2	6.7	9.1	9.9	9.1	8.1
70-110	12.6	4.0	9.1	10.0	22.2	7.7
Aromatic-C	29.8	53.1	37.4	52.4	28.9	57.3
110-140	ns [†]	3.4	37.4	28.9	ns	10.9
140-150	29.8	49.7	ns	ns	28.9	46.4
Carboxylic, esters and amidas -C	8.4	17.2	15.2	9.7	14.8	6.9
Degree of aromaticity [‡]	59.1	64.1	44.1	58.0	31.1	67.3

[†] non significative: signals very near to the baseline (signals/noise ratios).

[‡] (% aromatic-C*100) / (% alkyl-C + % aromatic-C).

shallower depth, as a function of the decrease in alkyl C content attributed to the polysaccharides. Signals in the δ_{C} 0-40 region suggested the presence of phytotoxic and hydrophobic compounds (Skjemstad *et al.*, 1998).

The presence of a high number of signals observed in the ^{13}C NMR spectra of HA from the area continuously cultivated with eucalyptus was attributed to C atoms of the non-substituted aromatic rings which are typical of lignified material. On the other hand, the spectra of HA isolated, both from the sugar cane area and the area where eucalyptus was harvested, showed a higher amount of substituted aromatic rings with heteroatoms. This observation shows that intense soil tillage promotes important changes in the aromatic C content of HA, due to changes in the humification process. The content of carboxylic C was quite high, and, in the areas with eucalyptus, decreased with depth, whereas this was not observed for HA isolated from the sugar cane area. There were no clear differences in the morphological characteristics of humic acids from different crops or soil depths (Figure 3). However, remarkable morphological changes were observed with variations in pH (Figure 4), which include increased aggregation of the plates with complex randomized structure, increased thickness, increased roughness and reduction of sharp edges, and perforation with the reduction of pH from 7.0 to 4.0. At pH 7.0, a fine sheet-like structure with parallel orientation was observed. At 5.5, the same sheet-like structures with parallel orientation and elongated fibers were visible but aggregation of macromolecules could also be seen. Finally, at pH 4.4 the condensed layers became more prominent. This observation

shows that morphological features of HA are pH dependent (Chen and Schnitzer, 1989).

CONCLUSIONS

1. The organic matter in the soil studied showed a prevalence of the humin fraction, which was independent of cultivation and of the soil depth sampled. Fulvic acids, which impart a fulvatic nature to the soil organic matter, made up most of the alkali-soluble fractions.
2. The HA/AF ratio was an efficient indicator of the modifications taking place in the organic matter by plant cover and depth.
3. The HA fraction presented an element composition, total acidity and carboxylic and phenolic OH groups similar to those found in fulvic acids. However, the IR and ^{13}C NMR analysis showed features of typical humic acid.
4. The ^{13}C NMR analysis permitted the determination of important quantitative differences in C distribution in the HA fractions, serving as a general indicator of the tendency toward humification. This tendency can be observed as a relative decrease in content of the alkyl C and the relative enrichment of the aromatic C according to its depth.
5. The SEM analysis showed the presence of sheet-like structures in HA at pH 7.0 and 5.5. At pH 4.0 these sheets formed more aggregated and condensed structures.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) for the financial support (grant E-26/150.619/1999). The

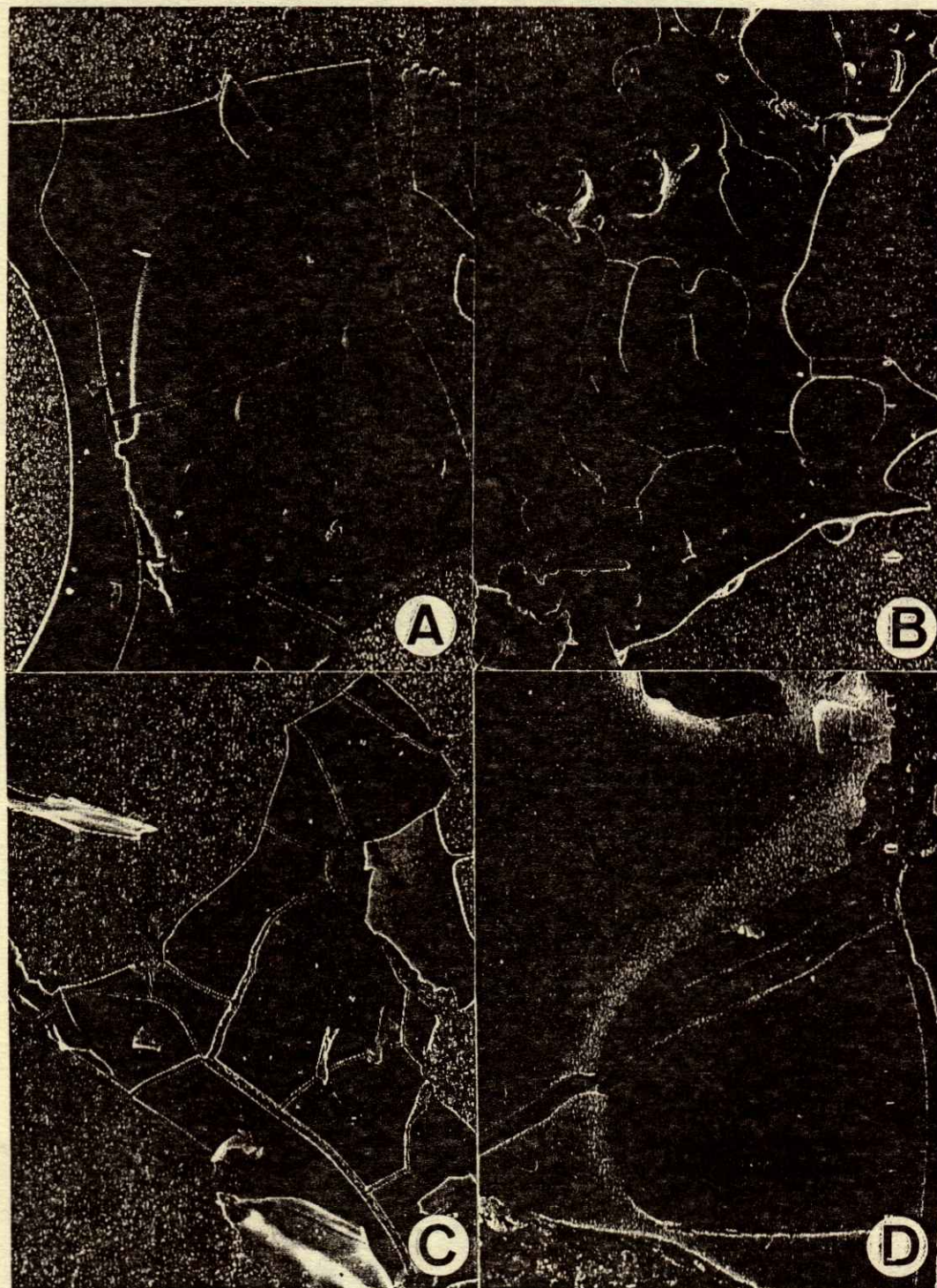


Figure 3. Electron scanning micrographs (SEM) of humic acids (HA) stabilized at pH 7.0 followed by freeze drying. A, C: structure in monolayer with smooth surface and prominent corners. B: SEM of the border of the structure showing less regular corners and well defined number of pores. D: detail of a broken porous showing the internal arrangement. Scale: A: 200 x; B: 135 x; C: 130 x; D: 1000 x.

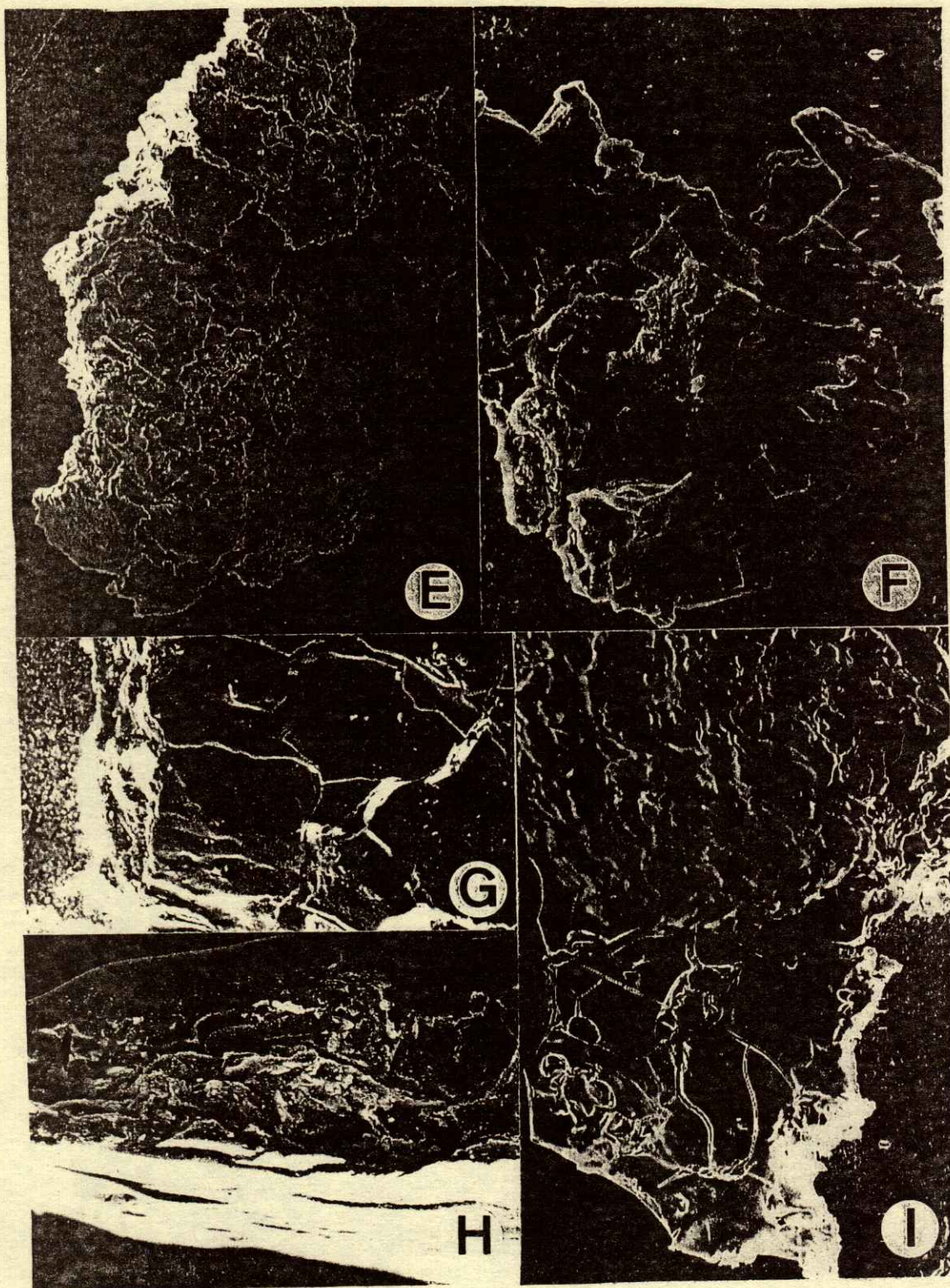


Figure 4. Electron scanning micrographs (SEM) of humic acids (HA) stabilized at pH 5.0 and pH 4.0 followed by freeze drying. E and F show HA at pH 4.0. Note the remarkable morphological changes in the structures comprising aggregation with randomized arrangement. G, H, and I show HA at pH 5.0. Note a clear transition in the morphology obtained from pH 4.0 and 7.0, showing an increase in roughness at the surface and increase in thickness (H), aggregation and reduction of edges (G).

Scale: E: 100x; F: 500 x; H: 200 x; I: 500x.

authors are grateful to the anonymous reviewers for their useful comments and suggestions.

REFERENCES

- Anderson, J.M. and J.S.I. Ingram. 1996. Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. 2nd ed. CAB-International. Wallingford, England.
- Balesdent, J., A. Mariotti, and B. Gaudet. 1987. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biology Biochemistry* 1: 25-30.
- Blair, G.J., R.D.B. Lefroy, B.P. Singh, and A.R. Till. 1997. Development and use of a carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate. pp. 273-282. *In*: G. Cadisch and K.E. Giller (eds.). *Driven by nature: Plant litter quality and decomposition*. CAB. Oxford, England.
- Canellas, L.P., G. de A. Santos, and N.M.B.A. Sobrinho. 1999a. Reações da matéria orgânica do solo. pp. 69-90. *In*: G. de A. Santos and F.A.O. Camargo (eds.). *Fundamentos da matéria orgânica ecossistemas tropicais e subtropicais*. Gênese. Porto Alegre, Brasil.
- Canellas, L.P., A.A. Moraes, V.M. Rumjanek, and G. de A. Santos. 1999b. Aplicación de la espectroscopía RMN de ^{13}C en la caracterización de la materia orgánica del suelo. *Educación Química* 10: 114-118.
- Canellas, L.P., P.G. Berner, S.G. Silva, M. Barros e Silva, and G. de A. Santos. 2000. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no Estado do Rio de Janeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 35: 133-143.
- Chen, Y. and M. Schnitzer. 1989. Sizes and shapes of humic substances by electron microscopy. pp. 622-638. *In*: M.H.B. Hayes, P. MacCarthy, R.L. Malcolm, and R.S. Swift (eds). *Humic substances. II: In search of structure*. John Wiley. New York.
- Dabin, B. 1981. Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés. *Cah. ORSTOM. sér. Pédol.* 28: 197-215.
- EMBRAPA-CNPS. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Centro Nacional de Pesquisa em Solos. 1997. *Manual de análises de solo*. EMBRAPA. Brasília, Brasil.
- Martin, D., P.C. Srivastava, D. Ghosh, and W. Zech. 1998. Characteristics of humic substances in cultivated and natural forest soil of sikkim. *Geoderma* 84: 345-362.
- McCallister, D.L. and W.L. Chien. 2000. Organic carbon quantity and forms as influenced by tillage and cropping sequence. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31: 465-7479.
- Orlov, P. 1998. Organic substances of Russian soils. *Eurasian Soil Sci.* 31: 1049-1057.
- Ortega, F. 1982. *La materia orgánica de los suelos y el humus de los suelos de Cuba*. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana, Cuba.
- Preston, C.M. 1996. Applications of NMR to soil organic matter analysis: History and prospects. *Soil Sci.* 161: 144-166.
- Santos, G. de A. 1984. Contribution a l'étude des interactions matière organique et phosphore dans un sol ferrallitique. Ph. D. Tesis. Institut National Polytechnique d'Lorraine. Nancy, France.
- Santos, G. de A. and F.A.O. Camargo. 1999. *Fundamentos da matéria orgânica: Ecossistemas tropicais e subtropicais*. Gênese. Porto Alegre, Brasil.
- Schnitzer, M. and U.C. Gupta. 1965. Determination of acidity in soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Proc.* 27: 274-277.
- Skjemstad, J.O., L.J. Janik, and J.A. Taylor. 1998. Non-living soil organic matter: What do we know about it? *Aust. J. Exp. Agric.* 38: 667-680.
- Soil Survey Staff. 2001. *Keys to soil taxonomy*. Technical Monograph 19. AID, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, SMSS. Pocahontas Press. Virginia.
- Stevenson, F.J. 1994. *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions*. Wiley. New York.
- Tan, K.H. 1985. Scanning electron microscopy of humic matter as influenced by methods of preparation. *Soil Sci. Am. J.* 49: 1185-1191.
- Wilson, M.A. 1987. *NMR techniques and applications in geochemistry and soil chemistry*. Pergamon Press. Oxford, England.
- Zech, W., N. Senesi, G. Guggenberger, K. Kaiser, J. Lehmann, T.M. Miano, A. Miltner, and G. Schroth. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79: 117-161.

COMPARACION DE DOS PRUEBAS PARA DIAGNOSTICAR NITROGENO EN SORGO

Comparison of Two Tests for Nitrogen Diagnostic in Sorghum

J.A. Rangel-Lucio^{1†}, G. Alcántar González¹, J.Z. Castellanos R.², E. García-Moya¹,
C. Trejo López¹ y H. Vaquera Huerta³

RESUMEN

El objetivo del estudio consistió en determinar la relación existente entre los métodos rápidos para medir la concentración de N-NO₃, clorofila y azúcar en el extracto de jugo celular de sorgo y comparar su capacidad de predicción del estado nutrimental de nitrógeno en sorgo, con los resultados de la determinación analítica convencional para N total. Las variedades Pénjamo '96 y D-65 se sembraron a una densidad de 530 mil plantas ha⁻¹ en un diseño experimental completamente aleatorio, y se fertilizaron con 0, 120, 240 y 360 kg de N ha⁻¹, complementados con 60 kg de P₂O₅ ha⁻¹. En las etapas fenológicas de macollamiento, anthesis, llenado de grano y cosecha, se obtuvo el extracto de jugo celular de la nervadura principal de sorgo y se midió la concentración de N-NO₃ con el ionómetro/Horiba, el azúcar con un refractómetro y la clorofila con el medidor portátil SPAD-502. En el tejido vegetal seco de la planta utilizada en el procedimiento anterior, se obtuvo la concentración de N total con la técnica analítica microkjeldahl. Las etapas apropiadas para detectar el grado de asociación entre las pruebas rápidas y la técnica microkjeldahl para determinar el nitrógeno de la planta fueron: macollamiento, anthesis y llenado de grano. En función del muestreo de la etapa fenológica y de la variedad de sorgo, existe la posibilidad de sustituir las determinaciones de nitrógeno que se realizan en laboratorio, y complementar los resultados con el contenido de azúcar en el extracto de jugo celular y la medición de la clorofila. No obstante, las pruebas rápidas no

estiman la cantidad de nitrógeno necesario para corregir deficiencias potenciales durante el crecimiento del sorgo.

Palabras clave: Extracto de jugo celular, nitratos, azúcar, clorofila, diagnóstico, Sorghum bicolor Moench.

SUMMARY

The objective of this study was to find the relationship among the rapid methods of measuring N-NO₃, chlorophyll and sugar in sorghum cell juice and to compare their power of prediction of N levels in sorghum plants with the results for total N obtained from the conventional microkjeldahl test. The Pénjamo '96 and D-65 cultivars were sown with a density of 530 000 plants ha⁻¹ in field with a completely randomized experimental design and they were fertilized with 0, 120, 240, and 360 kg N ha⁻¹, plus 60 kg P₂O₅ ha⁻¹. At tillering, anthesis, grain filling and harvest phenological stages, sorghum leaf cell juice was obtained and the N-NO₃ concentration was measured with an ionometer/Horiba, sugar with a refractometer and chlorophyll with a chlorophyll-meter. In the same sampled plant, total N was determined by microkjeldahl test. Tillering, anthesis and grain filling phenological stages were appropriate to find the relationship between fast tests and microkjeldahl test to determine N in sorghum. Depending on the phenological stage and sorghum cultivar, the N test of the cell juice may partially change the routine N test in laboratory, and complement it with the results of sugar and chlorophyll tests measured in sorghum. The tests did not regard N concentration in plants in order to correct N deficiencies of sorghum growth.

Index words: Cell juice, nitrate, sugar, chlorophyll, diagnosis, Sorghum bicolor Moench.

INTRODUCCION

La concentración de un nutrimento en el tejido vegeta es un valor integral que representa el efecto de

In memoriam: Dr. Andrés Aguilar Santelises. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México, México.

¹Instituto de Recursos Naturales, ³Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México, México. [†](arangel_1@yahoo.com)

²Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-CIR-CENRO. Apartado Postal 112, 38000 Celaya, Guanajuato, México.

Recibido: Marzo de 2001. Aceptado: Abril de 2002.
Publicado en Terra 20: 383-390.

todos los factores del crecimiento e incluso de la disponibilidad de los nutrientes (Munson y Nelson, 1990). Algunos de los factores que intervienen en ello son: tipo de suelo, clima, genotipo y prácticas de manejo (Jones *et al.*, 1991), por lo que los requerimientos nutrimentales de las plantas que aparecen en la literatura no pueden aplicarse de forma generalizada (Rashid y Bughio, 1994).

El análisis mineral para evaluar el estado nutrimental de las plantas ofrece la oportunidad de diagnosticar las deficiencias y los excesos, aunque también brinda información para proponer y corregir los programas de fertilización (Plank, 1992). El análisis de tejido vegetal involucra el conocimiento cuantitativo de la concentración total de los nutrientes. Este tipo de pruebas exige consumo de tiempo y costos elevados y, con frecuencia, se hace uso de equipo de laboratorio sofisticado; además, se refiere sólo a un estado histórico de la condición nutrimental de la planta durante algún período, semanas e incluso meses. Los métodos de cenizas, consistentes en la destrucción de la fracción orgánica (He *et al.*, 1998), y la digestión en húmedo, son empleados en diversos laboratorios para el análisis mineral de tejido vegetal.

Recientemente ha surgido el interés por emplear el extracto de jugo celular como una prueba rápida en campo. En Australia, este extracto es utilizado para recomendar la aplicación de N a los cereales (King, 1992; Handson y Sheridan, 1993), papa (Williams y Maier, 1991) y cultivos hortícolas (Lyons y Barnes, 1987; Lyons *et al.*, 1991). Las pruebas rápidas de análisis son un procedimiento alternativo para determinar la concentración de nutrientes solubles o libres, presentes en formas inorgánicas en las plantas y brindan un conocimiento aproximado del estado nutrimental de la planta al "instante" o en el momento del muestreo (Smith, 1987; Hochmuth, 1994). He *et al.* (1996) señalaron que el análisis del extracto de jugo celular es una técnica rápida y fácil, para diagnosticar el estado nutrimental del tomate en hidroponía. Comparado con los procedimientos analíticos de tejido vegetal tradicionales, el análisis del extracto es una propuesta alternativa por el fácil manejo de los instrumentos y ahorro de tiempo y dinero.

La clorofila, en sus diversas formas, es el pigmento fotosintético primario en las plantas superiores y su contenido depende de la concentración de N foliar y la dosis de fertilización con N (Lohry y Schepers, 1988).

El objetivo del estudio fue comparar una técnica rápida (ionómetro) para estimar la concentración de N-NO₃ en el extracto de jugo celular de sorgo, contra la determinación analítica de N total empleada en laboratorio, así como predecir el estado nutrimental de N al medir la clorofila (SPAD-502) y el azúcar (refractómetro) en el extracto de jugo celular de la hoja de sorgo fertilizado con N.

MATERIALES Y METODOS

El experimento se llevó a cabo en un suelo Vertisol pélico (FAO, 1990) en Celaya, Guanajuato, México, durante el ciclo agrícola primavera-verano de 1998. En el desarrollo de las actividades agrícolas de preparación del terreno, se consideraron las recomendaciones para el cultivo de sorgo en la región (CEBAJ, 1989).

El estudio comprendió los factores N (0, 120, 240, 360 kg ha⁻¹) y variedad de sorgo (Pénjamo '96, Pacueco y D-65, DeKalb). La urea, como fuente nitrogenada, se aplicó al suelo en dos etapas: siembra (50%) y el resto 34 días después de la siembra (dds); además, se fertilizó con superfosfato de calcio simple, de acuerdo con la formulación química de sorgo en El Bajío (240-60-00). Las variedades de sorgo presentan un ciclo de producción intermedio (140 a 160 días), pero distinto tiempo de liberación: D-65 es más antigua y posee mayor preferencia por los productores. La siembra de sorgo en "punta de riego" se realizó el 20 de mayo a una densidad de 530 mil plantas ha⁻¹, en parcelas de seis surcos de 0.75 x 5 m, con un diseño experimental completamente aleatorio de los tratamientos, con cuatro repeticiones. Durante el resto del ciclo se practicaron tres riegos adicionales.

El muestreo de dos plantas se hizo en la parcela útil (15 m²) para realizar las pruebas rápidas *in situ* y el análisis de tejido vegetal. La primera de ellas se efectuó en la séptima hoja a 26 (macollamiento) y 62 (anthesis) dds y en la hoja bandera del sorgo, a 83 (llenado de grano) y 139 (cosecha) dds. Enseguida, con el SPAD-502 (Minolta Camera Co., Ltd., Japan), se determinó el contenido de clorofila en tres distintos lugares de la hoja: proximal, media y distal, y se obtuvo un promedio. Una gota del extracto de jugo celular obtenido de la base de la nervadura, se colocó en el sensor y la valoración de N-NO₃ se hizo con el ionómetro (Horiba, Spectrum Technologies, Inc.). Con el refractómetro (Cole-Parmer International), se estimó la concentración de azúcar en el extracto de jugo celular. En el segundo caso, la determinación de

N en la hoja se practicó de acuerdo con el procedimiento microkjeldahl (Bremner, 1965).

Los resultados se analizaron por el procedimiento de regresión lineal simple con MINITAB ver. 9.2 (1993) y STATISTICA ver. 4.5 (1993), al contrastar el registro de las pruebas rápidas desarrolladas en campo y las determinaciones analíticas en laboratorio.

RESULTADOS Y DISCUSION

Para mayor comprensión, los resultados muestran al N como eje central al afectar, directa o indirectamente, la concentración de clorofila, N total, N-NO₃ y K, y la presencia de azúcar en el extracto de jugo celular como prueba de una buena nutrición; el conjunto de componentes en estudio permitirá apreciar el efecto final en el rendimiento de grano de sorgo.

Rendimiento de Grano

La aplicación de 120 kg de N ha⁻¹ como fertilizante químico resultó en un incremento de 25% del rendimiento de grano de sorgo Pénjamo '96 y de sólo 0.6% en D-65, con relación a la dosis 240 kg ha⁻¹ recomendada en la formulación regional (Figura 1). Es probable que la drástica disminución del rendimiento, observado en Pénjamo '96, haya sido motivo de la falta de una consolidación genético-ambiental; justificación que se relacionaría con el escaso tiempo que tiene de haber sido liberada, y su incidencia final en la nutrición y el rendimiento de la planta. Este hecho se relaciona con los resultados de Gardner *et al.* (1994), al mencionar que los cultivares

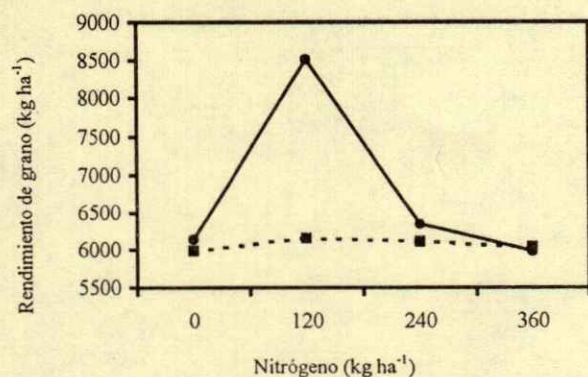


Figura 1. Efecto de la fertilización nitrogenada en el rendimiento de grano de sorgo var. Pénjamo '96 (—•—) y D-65 (---•---).

de sorgo con mayor dosis de fertilización nitrogenada redujeron significativamente el rendimiento de grano. Si bien se apreció un rendimiento de grano semejante en ausencia de fertilizante nitrogenado en ambos materiales de sorgo, éste fue 28% superior en Pénjamo '96, con la dosis 120 kg de N ha⁻¹. Las diferencias genotípicas en la absorción y distribución de N se han consignado en sorgo de grano (Maranville *et al.*, 1980).

Nitrógeno Total y Rendimiento de Grano

El diagnóstico reveló que la concentración de nitratos durante el crecimiento no varió el rendimiento de grano. Sin embargo, pudo participar como integrante del N total de la hoja y su efecto haber influido en el rendimiento de grano (Figura 2), como lo demostró el grado de asociación característico del crecimiento de sorgo D-65, particularmente en la cosecha. Además, es probable que los valores altos de N total con la dosis 120 kg de N ha⁻¹ hayan motivado la mayor producción de grano (Figura 1); mientras que la máxima concentración de N total con la dosis 0 kg de N ha⁻¹, se explicaría por un efecto de dilución menor durante las etapas de macollamiento, anthesis y llenado de grano, que aquél que se presentaría con el secado de grano en la cosecha. Ntamatungiro *et al.* (1999) encontraron que la tasa de incremento en la acumulación total de N por unidad de aumento en el área vegetal, no cambió con el tiempo de muestreo de arroz en diversos años; mientras que Saranga *et al.* (1998) estimaron que la mayor sensibilidad del algodón a la deficiencia de N se manifestó al inicio de la floración, en relación con los períodos tardíos de crecimiento.

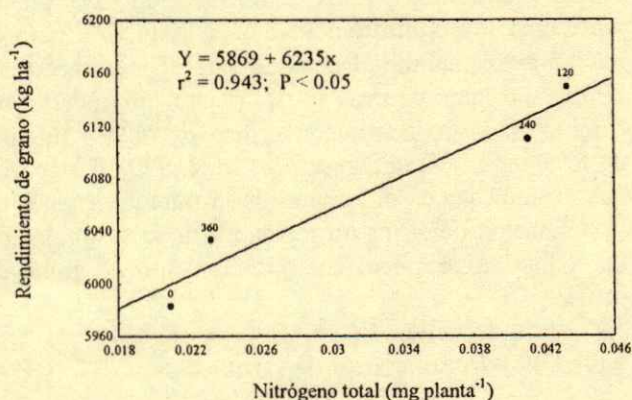


Figura 2. Nitrógeno total en el tejido foliar y rendimiento de grano de sorgo var. D-65 a 139 días de edad, fertilizado con N.

N-NO₃ en el Extracto de Jugo Celular y Nitrógeno Total

A 139 días, se presentó una estrecha relación entre N-NO₃ en el extracto de jugo celular y N total en el tejido de Pénjamo '96 (Figura 3). En el grano, el aumento y la disminución de la concentración de N posiblemente se encuentran vinculados al metabolismo activo que registra este órgano; sin embargo, de manera semejante a lo ocurrido en el grano de sorgo Pénjamo '96 a la cosecha, el incremento en el contenido de N en los granos de cebada continuó hasta esa etapa; indicativo de que la translocación de N reducido en otros sitios permanece constante (Chatterjee *et al.*, 1981). He *et al.* (1994) estimaron que las diferencias en la concentración de NO₃ en las plantas de tomate, al variar los valores de NO₃ en solución, se detectaron en el peciolo de la savia en un estado de crecimiento temprano, a diferencia de la savia foliar. En el mismo sentido, Saranga *et al.* (1998) estimaron que la mayor sensibilidad del algodón a la deficiencia de N se registró al inicio de la floración, comparativamente a los periodos tardíos de crecimiento.

Huett y Rose (1988) encontraron que las concentraciones de NO₃ en la vaina y el peciolo variaron al cuantificar el N foliar. A diferencia de los resultados anteriormente descritos para Pénjamo '96, la variedad D-65 se caracterizó por la ausencia de evidencias estadísticas significativas en la concentración de N-NO₃ en el extracto de jugo celular y las determinaciones analíticas de N total. No obstante, la estrecha relación de estas variables en la antesis del sorgo D-65 podría ser un mecanismo para destacar el efecto del N en los programas de fertilización química. La concentración crítica en un estado particular de crecimiento de la planta representa la concentración mínima requerida para el rendimiento máximo. De modo que el incremento en el tamaño que ocurra en la planta provocaría un cambio en la concentración crítica de N. En función de lo anterior, Ntamatungiro *et al.* (1999) destacaron que el aumento en el tamaño de la planta, después de la aplicación de N, es un indicador de la acumulación de N total y su efecto en el rendimiento de grano de arroz.

Clorofila y Rendimiento de Grano

El rendimiento de grano de Pénjamo '96 se caracterizó por ser alto cuando los valores de clorofila

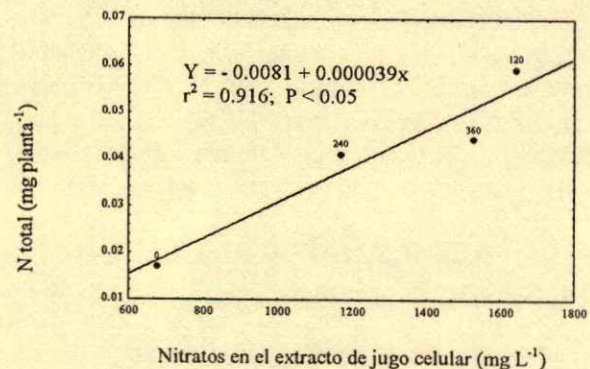


Figura 3. Nitratos en el extracto de jugo celular y nitrógeno total en la hoja de sorgo var. Pénjamo '96 a 139 días de edad, fertilizado con N.

fueron bajos en las distintas etapas de medición, sin efectos estadísticos significativos pero con valores de precisión altos (Figura 4). Feibo *et al.* (1998) encontraron que es posible diagnosticar la condición de crecimiento durante los estados iniciales de la floración de algodón, usando las unidades SPAD, al descubrir regresiones altamente significativas entre estos valores y la dosis de fertilizante nitrogenado. En cambio, durante el macollamiento de D-65, pudo observarse una estrecha relación entre la presencia de la clorofila y el rendimiento de grano, repitiendo la ausencia de resultados estadísticos significativos en las demás etapas. Bullock y Anderson (1998) señalaron que las lecturas SPAD tuvieron una amplitud de variación entre 46.6 y 57.3 durante el ciclo de crecimiento de diversos sitios e híbridos de maíz, valores de correlación bajos pero significativos. Al igual que la clorofila restringió el rendimiento de grano, Ponnampuruma (1972) demostró que la

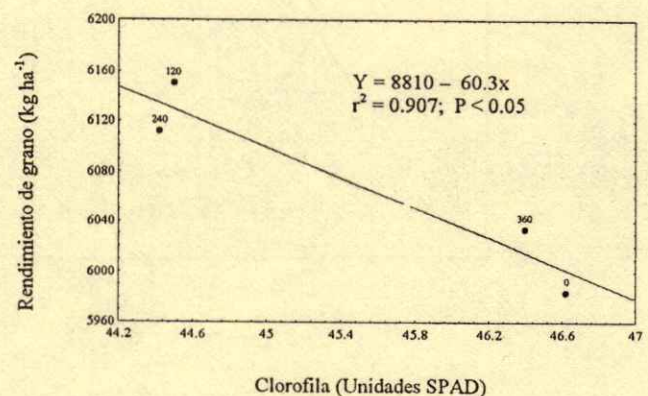


Figura 4. Clorofila en la hoja y rendimiento de grano de sorgo var. D-65 a 26 días de edad, fertilizado con N.

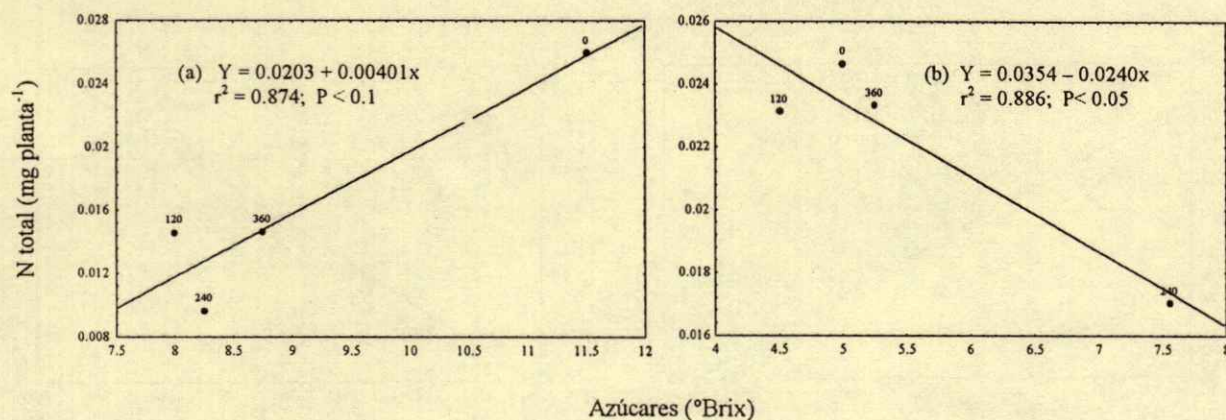


Figura 5. Azúcares en el extracto de jugo celular y nitrógeno total en la hoja de sorgo var. Pénjamo '96 (a) y D-65 (b) a 62 y 83 días de edad, respectivamente, fertilizados con N.

respuesta al fertilizante nitrogenado disminuyó cuando la disponibilidad de N aumentó, pues las lecturas del SPAD no aumentaron al subir la dosis de N por arriba de 67.2 kg ha⁻¹; por lo cual concluyó que este método no es buen indicador del rendimiento de grano, por más que ocurra la acumulación óptima de N.

Los resultados deben tomarse con cautela, pues la clorofila representa menos de 10% de N total vegetal, en cambio, las proteínas están conformadas por 80% de N total (Imsande, 1998). La clorofila y N total no establecieron relación estadística significativa, aunque existió correlación alta durante llenado de grano de Pénjamo '96 ($r^2 = 0.707$) y D-65 ($r^2 = 0.615$).

Azúcar en el Extracto Celular y Nitrógeno Total

El suministro de N (e.g. NO₃ ó NH₄) incrementa localmente la dosis de absorción, y la actividad respiratoria se estimula, y contribuye con la energía necesaria y los esqueletos de carbono para el metabolismo. Las diversas mediciones de azúcar en el extracto de jugo celular no se correlacionaron estadísticamente con el rendimiento de grano de sorgo Pénjamo '96 y D-65. Debe prestarse atención especial a las respuestas obtenidas en el llenado de grano del primero ($r^2 = 0.590$), y antesis y cosecha del segundo genotipo ($r^2 = 0.657$; $r^2 = 0.709$). Los valores más altos en la relación sacarosa:compuestos aminados en la savia del floema ocurren a media vida de la hoja, cuando la función fotosintética por unidad de pérdida transpiratoria es máxima (Pate, 1980), hecho que podría haber sucedido en la antesis de Pénjamo '96

(Figura 5a). Esta situación colocaría a la antesis como una de las etapas apropiadas para conocer el efecto de N en el sorgo, así como descubrir la etapa de mayor conflicto en la demanda del propio fertilizante nitrogenado, por lo cual deberá asegurarse el suministro en la etapa vegetativa. La respuesta positiva de la concentración de azúcares en dicha etapa de crecimiento, justificaría la juvenilidad de la hoja muestreada de sorgo Pénjamo '96. Pate *et al.* (1979) señalaron que la concentración de azúcar declina dramáticamente con la senescencia, al combinar la disminución de la fotosíntesis e incremento de solutos nitrogenados de la hoja; hecho que tal vez ocurrió en la etapa de llenado de grano en D-65, al resultar una relación negativa entre azúcares y N total (Figura 5b). Cuando existe utilización de carbohidratos como fuentes de carbono para los aminoácidos y lípidos, los azúcares acumulados son un medio de ajuste osmótico, una fuerza conductora para la absorción de agua y permanencia de la turgencia, alargamiento celular y substrato de los componentes de la pared celular (Lichtner y Spanswick, 1981).

Nitrógeno Total, N-NO₃ y Potasio en el Extracto Celular

El aumento en el N-NO₃ condicionó negativamente la concentración de K en el extracto de jugo celular al macollar Pénjamo '96 (Figura 6a), e indujo una mayor presencia de K en la antesis del sorgo D-65 (Figura 6b). La concentración crítica en un estado particular de crecimiento de la planta

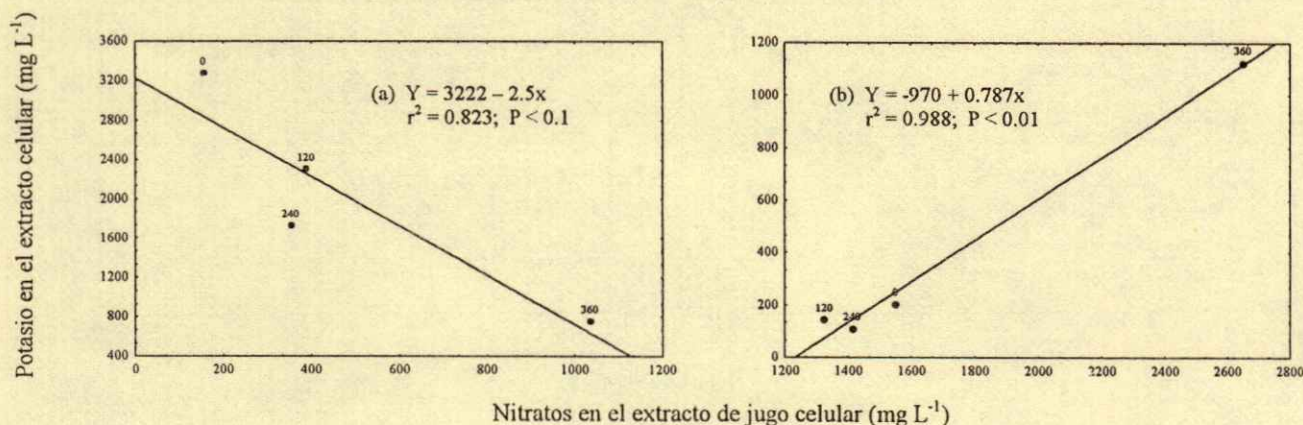


Figura 6. Nitratos y potasio en el extracto de jugo celular de la hoja de sorgo var. Pénjamo '96 (a) y D-65 (b) a 26 días y 62 días de edad, respectivamente, fertilizados con N.

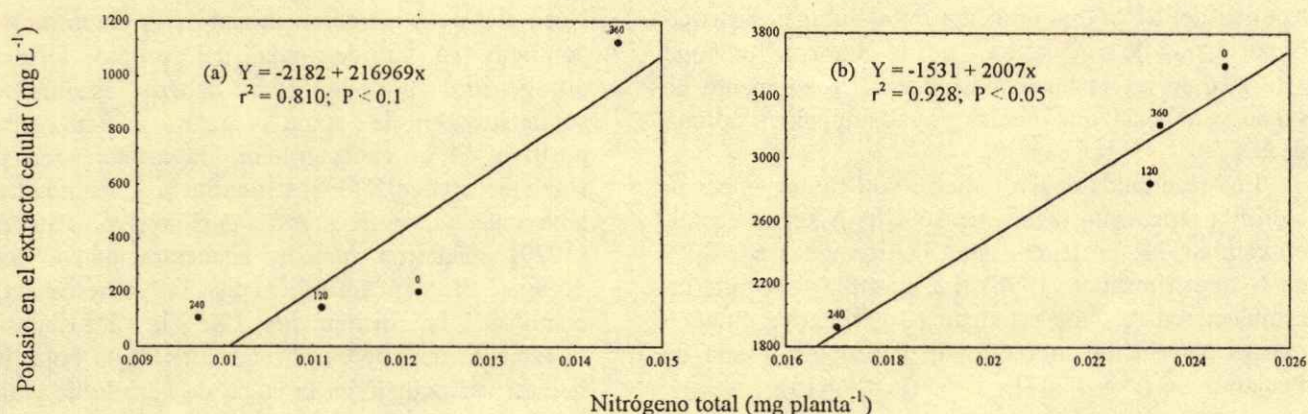


Figura 7. Nitrógeno total y potasio en el extracto de jugo celular de la hoja de sorgo D-65 a 62 (a) y 83 (b) días de edad, fertilizado con N.

representa la concentración mínima requerida para el rendimiento máximo; de tal modo que el incremento en el tamaño provocaría un cambio en la concentración de N y en sus relaciones nutrimentales. De igual forma, los resultados que se presentaron entre el N total y el K del extracto celular en anthesis (Figura 7a) y llenado de grano (Figura 7b) de sorgo D-65, explican el balance que sucede en esta relación nutrimental (Huett, 1995).

Adicionalmente, y dada la existencia de una fuerte relación entre $N-NO_3$ y azúcares en el extracto de jugo celular de Pénjamo '96 a 26 días de edad ($r^2 = 0.996$; $P < 0.01$), así como entre N total y azúcares en la savia a 62 días edad del sorgo Pénjamo '96

($r^2 = 0.869$; $P < 0.1$) y 83 días del genotipo D-65 ($r^2 = 0.884$; $P < 0.1$), también fundamentan el beneficio que representa el uso de pruebas rápidas y, además, la dependencia entre los diversos efectos correlativos al diagnosticar el estado nutricional de sorgo en sus distintas etapas fenológicas. La composición de los solutos nitrogenados cambia durante el desarrollo del cultivo (Pate, 1980). En el estado de plántula, los valores de dichos solutos en el extracto del jugo celular son bajos, pero una vez absorbido el N del suelo, inicia su asimilación proporcional típica en el xilema de la raíz, y se incrementa hasta después de la floración (Pate *et al.*, 1965; Housley *et al.*, 1977). Si bien los valores de

NO₃ en el tallo de maíz (Binford *et al.*, 1990) identifican el efecto de la fertilización nitrogenada, ciertos métodos indican que ni el N en el tallo (Fox *et al.*, 1989), ni en la planta completa (Binford *et al.*, 1992), podrán representar un valor predictivo para estimar el suministro de N en maíz.

CONCLUSIONES

- El rendimiento de grano de sorgo puede estimarse mediante la determinación de N total en sorgo, en particular en la cosecha; aunque deberá ser fertilizado con 120 ó 240 kg de N ha⁻¹. La clorofila, como técnica de valoración rápida, representó una alternativa para diagnosticar el rendimiento de grano en el estado juvenil del sorgo, cuando se aplican las dosis antes descritas.

- Los NO₃ en el extracto de jugo celular indujeron una mayor concentración de N total en Pénjamo '96 y de K en D-65; en cambio, el K en el extracto de jugo celular se disminuyó en Pénjamo '96. En tanto que el N total aumentó la concentración de K en los dos cultivares de sorgo, el incremento de azúcares y NO₃ en el extracto de jugo celular provocó respuestas opuestas entre N total y K en el extracto; hecho que prueba la competitividad entre ellos.

- Las pruebas rápidas fueron procedimientos apropiados para diagnosticar el estado nutricional de plantas de sorgo, en particular en macollamiento, anthesis, llenado de grano y, con menor frecuencia, en la cosecha. Este conocimiento brindaría el tiempo suficiente para realizar aplicaciones adicionales de N.

- Las pruebas rápidas para diagnosticar el estado nutricional del sorgo estimaron o mostraron diferencias en la parte aérea en mucho menor tiempo que las determinaciones convencionales. Sin embargo, dichas pruebas pudieron perder sensibilidad al estimar el N cuando existieron acumulaciones por arriba del óptimo. Este tipo de diagnósticos en sorgo indica la necesidad de N, pero no valoraron la cantidad por aplicar.

LITERATURA CITADA

- Binford, G.D., A.M. Blackmer y M.N. El-Hout. 1990. Tissue test for excess nitrogen during corn production. *Agron. J.* 82: 124-129.
- Binford, G.D., A.M. Blackmer y M.E. Cerrato. 1992. Nitrogen concentration of young corn plants as an indicator of nitrogen availability. *Agron. J.* 84: 971-974.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. *In*: C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis*. (Part 2). (Agronomy 9). American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Bullock, D.G. y D.S. Anderson. 1998. Evaluation of the Minolta SPAD-502 chlorophyll meter for nitrogen management in corn. *J. Plant Nutr.* 21: 741-755.
- CEBAJ. Centro Experimental Bajío. 1989. Guía para producir sorgo en el Bajío. Boletín Informativo. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Celaya, Guanajuato, México.
- Chatterjee, S.R., T.C. POKHRIYAL y Y.P. ABROL. 1981. Nitrogen economy of the main shoot of field grown barley (*Hordeum vulgare* L.) I. Dry weight, duration and nitrate content in different organs. *J. Exp. Bot.* 32: 689-699.
- FAO. Food and Agricultural Organization. 1990. Clasificación Mundial de Suelos. Organización de las Naciones Unidas. Roma, Italia.
- Feibo, W., W. LIANGHUAN y X. FUHUA. 1998. Chlorophyll meter to predict nitrogen sidedress requirements for short-season cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Field Crops Res.* 56: 309-314.
- Fox, R.H., G.W. ROTH, K.V. IVERSEN y W.P. PEIKIELEK. 1989. Soil and tissue nitrate test compared for predicting soil nitrogen availability to corn. *Agron. J.* 81: 971-974.
- Gardner, J.C., J.W. MARANVILLE y E.T. PAPAPOZZI. 1994. Nitrogen use efficiency among diverse sorghum cultivars. *Crop Sci.* 34: 728-733.
- Handson, P. y J. SHERIDAN. 1993. Fast sap tests for better management. *Aust. Grain* 2(3): 42-45.
- He, Y.K., TERABAYASHI y T. NAMIKI. 1994. Fundamental study for diagnosis on nutrient status of tomatoes cultured in hydroponics. *Science Report Kyoto Prefectural University, Agric.* 46: 7-14 (Abstract).
- He, Y.K., TERABAYASHI y T. NAMIKI. 1996. Extraction and preparation of petiole sap of tomato for diagnosis on nutrient status. *Science Report Kyoto Prefectural University, Agric.* 48: 1-6 (Abstract).
- He, Y.K., S. TERABAYASHI y T. NAMIKI. 1998. Comparison between analytical results of plant sap analysis and the dry ashing method for tomato plants cultured hydroponically. *J. Plant Nutr.* 21: 1179-1188.
- Hochmuth, G.J. 1994. Efficiency ranges for nitrate-nitrogen and potassium for vegetable petiole sap quick test. *Horttech.* 4: 218-222.
- Housley, T.L., D.M. PETERSON y L.E. SCHRADER. 1977. Long distance translocation of sucrose, serine, leucine, lysine and CO₂ assimilates. *Plant Physiol.* 59: 217-220.
- Huett, D.O. 1995. Growth, nutrient uptake and tipburn severity of hydroponic lettuce in response to electrical conductivity and K:Ca ratio in solution. *Aust. J. Agric. Res.* 45: 251-267.
- Huett, D.O. y ROSE. 1988. Diagnostic nitrogen concentration for tomatoes grown in sand culture. *Aust. J. Exp. Agric.* 28: 401-409.
- Imsande, J. 1998. Iron, sulfur and chlorophyll deficiencies: A need for an integrative approach in plant physiology. *Physiol. Plant* 103: 139-144.
- Jones, J.B., Jr., B. WOLF y H.A. MILLS. 1991. *Plant Analysis Handbook: A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide*. Micro-Macro Publishing. Athens, GA.
- King, P. 1992. Quick sap tests: An aid to nitrogen fertilizer management in cereals. *Aust. Grain* 2(3): 18-19.
- Lichtner, F.T. y R.M. SPANSWICK. 1981. Sucrose uptake by developing soybean cotyledons. *Plant Physiol.* 68: 693-698.

- Lohry, R.D. y J.S. Schepers. 1988. Chlorophyll leaf nitrogen and yield relationships of irrigated corn in Nebraska. p. 241. *In: Agronomy Abstracts*. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Lyons, D.J. y J.A. Barnes. 1987. Field diagnostic test for nitrate in tomato petiole sap. *Quart. J. Agric. Anim. Sci.* 44: 37-42.
- Lyons, D.J., R.L. Williams y L.E. McCaullun. 1991. Sap analysis for the prediction of stem yield and the need for extra nitrogen fertiliser for kenaf. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22: 659-666.
- Maranville, J.W.M., R.B. Clark y W.M. Ross. 1980. Nitrogen efficiency in grain sorghum. *J. Plant Nutr.* 2: 577-589.
- MINITAB. 1993. Minitab, Inc. Version 9.2. State College, PA 16801-3008.
- Munson, R.D. y W.L. Nelson. 1990. Principles and practices in plant analysis. pp. 359-387. *In: R.L. Westerman (ed.)*. Soil testing and plant analysis. 3rd ed. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Ntamatungiro, S., R.J. Norman, R.W. McNew y B.R. Wells. 1999. Comparison of plant measurements for estimating nitrogen accumulation and grain yield flooded rice. *Agron. J.* 91: 676-685.
- Pate, J.S. 1980. Transport and partitioning of nitrogenous solutes. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31: 313-340.
- Pate, J.S., J. Walker y W. Wallace. 1965. Nitrogen-containing compounds in the shoot system of *Pisum arvense* L. II. The significance of amino acids and amides released from nodulated roots. *Ann. Bot.* 29: 475-493.
- Pate, J.S., C.A. Atkins, K. Hamel, D.L. McNeil y D.B. Layzell. 1979. Transport of organic solutes in phloem and xylem of a nodulated legume. *Plant Physiol.* 63: 1082-1088.
- Plank, C.O. 1992. Plant analysis reference procedures for the southern region of the United States. Bull. 368. Georgia Agricultural Station, Southern Cooperative Serv. University of Georgia. Athens, GA.
- Ponnamperuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.* 24: 29-96.
- Rashid, A. y N. Bughio. 1994. Plant analysis diagnostic indices for phosphorus nutrition of sunflower, mungbean, maize and sorghum. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25: 2481-2489.
- Saranga, Y., A. Landa, Y. Shekel, A. Bosak y U. Kafafi. 1998. Near-infrared analysis of cotton leaves as a guide for nitrogen fertilization. *Agron. J.* 90: 16-21.
- Smith, D.L. 1987. Rockwool in horticulture. Grower Books. London, England.
- STATISTICA. 1993. StatSoft, Inc. Version 4.5. New York.
- Williams, C.M.J. y N.A. Maier. 1991. Determination of the nitrogen status of irrigated potato crops. Critical nutrient ranges for nitrate-nitrogen in petioles. *J. Plant Nutr.* 13: 971-984.

DEMANDA DE POTASIO DEL TOMATE TIPO SALADETTE

Potassium Demand of Processing Tomato

R. Bugarín-Montoya¹, A. Galvis-Spinola², P. Sánchez-García² y D. García-Paredes¹

RESUMEN

El contenido de potasio en el tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) suele asociarse a la calidad de sus frutos en términos cualitativos; sin embargo, la cantidad de K que satisface a la demanda de este cultivo aún no está definida claramente. Por lo tanto, en el presente trabajo se determinó la influencia de la nutrición potásica sobre el rendimiento y la calidad de frutos de tomate saladette var. Yaqui, y se definió el requerimiento interno de K (RIK) en la biomasa aérea total. Para ello, se realizaron dos experimentos en invernadero con hidroponía. En el primero, se cuantificó el efecto de diferentes concentraciones de K ($Q_k = 3, 6$ y 9 meq L^{-1}) en la solución nutritiva sobre la producción y asignación de biomasa aérea, rendimiento y calidad de frutos, contenido y acumulación de K en la biomasa aérea. El segundo experimento tuvo el propósito de repetir la experiencia del experimento uno y verificar si valores mayores de Q_k (6, 9, 12, 15 y 18 meq L^{-1}) incrementaban la calidad de frutos. El contenido de K en la biomasa aérea total y la calidad de frutos (acidez titulable y firmeza) se incrementaron en razón directa al valor de Q_k sólo en el intervalo entre 3 y 9 meq L^{-1} , pero concentraciones mayores que 6 meq L^{-1} no tuvieron efecto significativo sobre la calidad de frutos. El rendimiento de frutos rojos y frutos totales (rojos + verdes) tampoco varió significativamente entre los tratamientos de K. La cantidad de K que demanda el cultivo del tomate para obtener altos rendimientos y excelente calidad puede estimarse de manera satisfactoria, empleando un RIK de 4.11%, lo que equivale a 3.27 kg de K por cada tonelada de fruto fresco producido.

Palabras clave: *Lycopersicon esculentum* Mill., hidroponía, requerimiento interno de potasio, rendimiento, calidad de fruto.

SUMMARY

The content of potassium in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) var. Yaqui is associated to fruit quality; however, the amount required is not yet clearly defined. In this study the influence of potassium nutrition on yield and fruit quality of processing tomatoes was determined. The internal requirement of K (RIK) in the aboveground dry matter was also defined. Two soilless experiments were carried out under greenhouse conditions. In the first experiment the effect of several K levels ($Q_k = 3, 6, \text{ and } 9 \text{ meq L}^{-1}$) in the nutrient solution on production, aerial biomass allocation, harvest index (IC), as well as yield and fruit quality, was studied. The contents and accumulation of K in the aboveground area was also estimated. In the second experiment, higher levels of Q_k (6, 9, 12, 15, and 18 meq L^{-1}) were tested to check their influence on fruit quality. The amount of K in the aboveground area and fruit quality (titrable acidity and fruit firmness) increased in a direct way to the value of Q_k between 3 and 9 meq L^{-1} . Concentrations higher than 6 meq L^{-1} did not increase fruit quality significantly. The accumulation of dry matter and K was higher in fruits as compared to aerial biomass (stems and leaves). Within the treatment of Q_k , statistical effects were found in the IC from 0.54 to 0.60 g g^{-1} . The amount of K required by a tomato crop to obtain higher yields and good quality may be estimated with a RIK of 4.11%, which is equivalent to 3.27 kg K t^{-1} fresh fruit produced.

Index words: *Lycopersicon esculentum* Mill., soilless culture, internal potassium requirement, yield, fruit quality.

INTRODUCCION

La demanda nutrimental de un cultivo agrícola es la cantidad de nutrimento que se requiere para

¹ Facultad de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit, Xalisco, Nayarit. (rbugarin@nayar.uan.mx)

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

satisfacer sus funciones metabólicas durante su ciclo de crecimiento y desarrollo, la cual se calcula con base en la meta de rendimiento y el valor del requerimiento interno (RI) del nutrimento en cuestión (Rodríguez, 1990).

El RI se refiere a la concentración nutrimental óptima en la biomasa aérea total en el momento de la cosecha (Greenwood *et al.*, 1980). Este parámetro se ha validado exitosamente para N y P en cultivos anuales y praderas (Rodríguez, 1990; Galvis *et al.*, 1998), sin embargo, en hortalizas como el tomate aún no se ha definido claramente. Una forma de proceder para encontrar el valor del RI es mediante ensayos de campo con dosis crecientes del nutrimento de interés; sin embargo, la técnica de cultivos hidropónicos ofrece la posibilidad de controlar de manera más eficiente las concentraciones de nutrimentos en la solución nutritiva y observar su efecto en las plantas, lo cual representa una ventaja comparativa con los ensayos en suelo. El índice de cosecha (IC = rendimiento económico/biomasa aérea total) representa un valor que permite calcular la biomasa aérea total a partir del dato del rendimiento para un determinado sistema de producción y, con el requerimiento interno, es posible estimar la demanda nutrimental del cultivo y diferentes cantidades de producción (Rodríguez y Galvis, 1989).

Es común encontrar reportes que indican que el tomate rojo, al igual que muchos otros cultivos hortofrutícolas, requieren grandes cantidades de K acumulado en los frutos para lograr incrementar su calidad pero no definen esta magnitud (Adams, 1994). El criterio de la calidad es controvertido debido a que se define con base en las características organolépticas, las cuales dependen del genotipo (Poysa, 1992), manejo del agua (Mitchell y Shennan, 1991), salinidad (Adams, 1991; Li *et al.*, 2001), estado nutricional de la planta y condiciones ambientales en la raíz y parte aérea (Ho y Adams, 1995), así como el manejo de postcosecha (Kader *et al.*, 1978) e incluso el rendimiento es independiente de la calidad de los frutos cosechados (Ho, 1996). En tomates tipo saladette y bola, el principal atributo de calidad para consumo en fresco es la apariencia externa, en el que se incluyen color, tamaño, forma, firmeza, ausencia de defectos de maduración y frescura del cáliz cuando está presente en el fruto cosechado (Hobson y Kilby, 1984). También el sabor es una característica importante, la cual está relacionada con la cantidad de azúcares y ácidos orgánicos presentes en el fruto (Ho, 1996). En tomate

para proceso industrial, los parámetros de calidad más empleados son el contenido de sólidos solubles totales (°Brix), color, firmeza, pH y acidez titulable (AVRDC, 1994). Aun cuando la calidad del fruto está definida por varios atributos que dependen del manejo cultural y del genotipo, la nutrición potásica constituye un aspecto de manejo agronómico que permite incrementar la acidez titulable, firmeza, uniformizar la maduración y lograr un mejor sabor de fruto (Ho y Adams, 1995).

Con base en lo anterior, los objetivos del presente trabajo fueron a) determinar la influencia de la nutrición potásica sobre el rendimiento y la calidad de frutos de tomate; y b) definir el requerimiento interno de potasio (RIK), considerando la calidad del fruto.

MATERIALES Y METODOS

Se desarrollaron dos experimentos en condiciones de invernadero, empleando un sistema hidropónico de circuito cerrado. En el primer experimento, se evaluó la influencia de tres concentraciones de K ($Q_k = 3, 6$ y 9 meq L^{-1}) en la solución nutritiva sobre la producción y asignación de biomasa aérea e índice de cosecha (IC), así como en el rendimiento y la calidad de frutos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) var. Yaqui tipo saladette de crecimiento determinado y se cuantificó el contenido y la acumulación de K en la biomasa aérea. En el segundo, se amplió el intervalo de exploración del K adicionado ($Q_k = 6, 9, 12, 15$ y 18 meq L^{-1}) con el propósito de verificar el efecto de este nutrimento sobre la calidad del fruto y fundamentar la obtención del RIK en tomate. En el primer experimento, el cultivo de tomate se inició mediante siembra directa en recipientes de PVC de 20 dm^3 con escoria volcánica basáltica¹ negra como sustrato, con una granulometría de 3 a 6 mm de diámetro. Se empleó un sistema de microchorro por capilares de 0.4 mm de diámetro para aplicar los riegos con la solución nutritiva, regulándolos con un temporizador automático y manteniendo la frecuencia de riego en periodos de una hora con duración de 5 min cada uno y un volumen aproximado de 720 mL por recipiente. En el periodo de germinación (cinco días), los riegos se suministraron con agua potable acidulada a pH 6.5 (± 0.1) con HNO_3 1N y su composición química fue la siguiente (en meq L^{-1}): 2.93 Na^+ , 0.22 K^+ , 0.38 Mg^{2+} , 0.39 Ca^{2+} , 0.1 SO_4^{2-} , 1.8 HCO_3^- y 1.97 Cl^- (CE 0.409 dS m^{-1} , pH 7.2;

¹ Localmente se conoce con el nombre de tezontle negro.

RAS 4.72: clasificación Normas Riverside; C₂S₁). Posteriormente, los riegos se iniciaron con una solución nutritiva diluida: i) a una tercera parte [conductividad eléctrica (CE) 0.6 dS m⁻¹] de su concentración original, hasta el estado de 2 a 3 hojas verdaderas; ii) a la mitad de su concentración original (CE 1.2 dS m⁻¹) hasta la formación de 5 a 6 hojas y, iii) utilizando la solución completa sin diluir de acuerdo con los tratamientos de K (CE de 1.9, 2.1 y 2.4 dS m⁻¹ para Qk de 3, 6 y 9 meq K⁺ L⁻¹, respectivamente). Los tratamientos consistieron en el suministro de estas tres concentraciones de K en la solución nutritiva y se estudiaron usando un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones.

La solución nutritiva empleada fue una modificación que se realizó a partir de la solución universal de Steiner (1961) y su composición base fue la siguiente (en meq L⁻¹): 10 NO₃⁻, 0.83 H₂PO₄⁻, 5.67 SO₄²⁻, 6 K⁺, 3.1 Mg²⁺ y 7.4 Ca²⁺. Las cantidades de micronutrientes adicionados fueron (en mg L⁻¹): 12 Fe, 1.6 Mn, 0.023 Zn, 0.011 Cu y 0.865 B. Para proveer los macronutrientes, se utilizaron las siguientes fuentes comerciales: KNO₃, Ca(NO₃)₂·4H₂O, KH₂PO₄, K₂SO₄ y MgSO₄·7H₂O. Las fuentes de micronutrientes fueron sustancias grado reactivo: H₃BO₃, MnSO₄·4H₂O, ZnSO₄·7H₂O y CuSO₄·5H₂O. No se incluyó ninguna fuente específica de Mo. El Fe se suministró en forma de EDTA-Fe, preparado de acuerdo con la metodología propuesta por Steiner y Van Winden (1970). Cada 5 a 7 días se renovó la solución nutritiva y diariamente se ajustó el pH a 6-6.5 con HNO₃ 1N.

Durante el experimento, se realizaron siete muestreos del cultivo a 20, 34, 48, 62, 74, 98 y 144 días después de la siembra. Cada muestreo consistió en cosechar la planta completa, separando parte vegetativa y frutos; posteriormente, se lavaron con agua destilada y luego se secaron en estufa a 65 °C durante 72 h. Una vez obtenido el peso seco de cada una de las partes de la planta, el material se molió y se pasó a través de un tamiz de 20 mallas. El contenido de K en el tejido vegetal se analizó mediante digestión de las muestras con una mezcla de HNO₃-HClO₄ y se determinó K por flamometría (Alcántar y Sandoval, 1999). También se cuantificó el rendimiento (kg planta⁻¹) de frutos rojos y producción total (frutos rojos + verdes), así como el número de frutos por planta, peso promedio de frutos (g fruto⁻¹), contenido de materia seca en frutos (%), producción de materia seca total (g planta⁻¹) e índice de cosecha

(IC, g g⁻¹). Las características externas de los frutos se evaluaron considerando el color obtenido mediante la relación de los índices de cromaticidad a/b (colorímetro Hunter Lab, modelo 15062); la firmeza (gramo fuerza) se midió en términos de la deformación producida en el fruto colocado de manera horizontal, por compresión mediante puntal cónico en un medidor de fuerza (penetrómetro Chatillón, modelo FDV-30) con penetración de 2 mm. Para analizar las características internas de los frutos, se midió su pH directamente en la pulpa macerada; los sólidos solubles totales (°Brix) se determinaron con un refractómetro digital (Palette Atago PR-100) y la acidez titulable (% de ácido cítrico) se cuantificó neutralizando 10 mL de jugo de tomate con NaOH 0.1N para lo cual se utilizó fenolftaleína como indicador; la titulación finalizó al llegar a un pH de 8.3. Finalmente, el índice de madurez (adimensional) se calculó mediante la relación °Brix/acidez titulable. Valores en el intervalo de 12 a 18 indican un índice de madurez apropiado en muchas variedades de tomate (AVRDC, 1994).

Con el propósito de confirmar y fundamentar el valor del RIK en tomate, se estableció un segundo experimento en el cual se estudió un mayor ámbito de exploración de K (Qk = 6, 9, 12, 15 y 18 meq L⁻¹) en la solución nutritiva. Esto permitió observar si concentraciones mayores de K que las examinadas en el primer experimento incrementaban la calidad de frutos, lo cual pudiera modificar el valor del RIK previamente encontrado en dicho experimento. En este caso, se utilizó un sistema hidropónico por subirrigación, compuesto por bancales (0.4 x 2.5 x 0.4 m) elevados a 0.5 m con respecto al suelo. Se mantuvo una relación de 20 L de solución nutritiva por planta en cada riego para lograr mayor capacidad de amortiguamiento en la solución. El manejo del cultivo así como los materiales y métodos fueron similares al experimento anterior, y las variables medidas fueron sólo aquellas concernientes a la calidad del fruto en el momento de la cosecha del primer racimo: color, índice de madurez, °Brix, acidez titulable (% de ácido cítrico), pH y firmeza.

RESULTADOS Y DISCUSION

Rendimiento de Frutos y Biomasa Seca Aérea

El rendimiento de frutos rojos se incrementó linealmente con la concentración de K (Qk) en la solución nutritiva, aunque no se encontraron

diferencias significativas (Cuadro 1). El rendimiento total de frutos (rojos + verdes) tampoco difirió entre los tratamientos de potasio. Se presentó una tendencia negativa entre Qk y el peso promedio de fruto debido a que las plantas produjeron menor cantidad de frutos a valores bajos de Qk.

En el tratamiento de 3 meq K L⁻¹ en la solución nutritiva se presentó una deficiencia típica de K en las hojas de tomate, pero esto no ocasionó que disminuyera la acumulación de materia seca en la biomasa aérea en comparación con los demás tratamientos (Cuadro 1). Al respecto, Pujos y Morard (1997) encontraron que una deficiencia permanente o temporal de K en plantas jóvenes de tomate con hábito de crecimiento indeterminado no ocasionó una disminución significativa en el peso seco de la parte vegetativa ni de frutos, lo que concuerda con lo obtenido en la presente investigación.

La acumulación de biomasa seca fue mayor significativamente ($P < 0.01$) en los frutos (246.5, 257.9 y 209.8 g planta⁻¹) que en la parte vegetativa (tallos + hojas) con valores de 164.3, 198.5 y 189.6 g planta⁻¹ para Qk de 3, 6 y 9 meq L⁻¹, respectivamente. La mayor acumulación de materia seca en los frutos con respecto al resto de la planta durante la etapa de fructificación también se ha reportado previamente en tomate de crecimiento indeterminado (Hurd *et al.*, 1979; Heuvelink y Marcelis, 1989). Existen evidencias que dicha relación es producto de una alta demanda metabólica y ocurre aun cuando existen diferencias fenotípicas entre las distintas variedades de dicha especie; sin embargo, el orden de prioridad en la asignación de asimilados cambia con la etapa fenológica, esto es, durante la floración se tiene el orden siguiente: raíces > hojas jóvenes > flores, mientras que en la fructificación es:

frutos > hojas jóvenes > flores y raíces (Ho, 1996), lo cual explica lo encontrado en la presente investigación.

El hecho de propiciar menor asignación de biomasa en el dosel vegetal al emplear Qk de 3 meq L⁻¹ con respecto a los demás tratamientos y una biomasa muy similar en los frutos en todos los tratamientos, permitió obtener un índice de cosecha (IC) mayor para este tratamiento que con Qk de 6 y 9 meq L⁻¹ (Cuadro 1). Los valores del IC en estos últimos dos tratamientos son comparables con los reportados por Mitchell *et al.* (1991) en tomate cv. UC82B. El alto valor de IC, obtenido con el tratamiento de 3 meq K L⁻¹, fue producto de que hubo una restricción del crecimiento del dosel vegetal debida a la falta de una adecuada nutrición potásica, lo que ocasionó que el cociente (rendimiento económico/biomasa aérea total) que define el IC se incrementara. Dicha restricción coincidió con la aparición de un amarillamiento en el borde de los folíolos, síntoma asociado a una deficiencia de K. Por lo tanto, las concentraciones de 6 y 9 meq K L⁻¹ en la solución nutritiva promovieron mejor crecimiento vegetal que 3 meq K L⁻¹.

En el Cuadro 1, se observa también que no existió ganancia en la concentración porcentual de materia seca en el fruto con la adición creciente de K y difiere de lo obtenido por Adams y Grimmett (1986). Probablemente esto se explique por el hecho de que el fruto de tomate acumula más agua que cualquier otro órgano de la planta, llegando a valores de 94% (De Koning, 1989) y, por consiguiente, sea difícil incrementar la materia seca en el fruto mediante la adición de K, dado que este elemento tiene un efecto hidratante en la célula (Marschner, 1986).

Cuadro 1. Efecto de la concentración de K en la solución nutritiva (Qk) sobre las variables de rendimiento de tomate var. Yaqui, cultivado en hidroponía.

Qk meq L ⁻¹	Peso fresco de frutos		PPF [†] g planta ⁻¹	NFR [‡]	MSF [§] %	MST [¶] g planta ⁻¹	IC [#] g g ⁻¹
	Rojo	Rojo + verde					
3	4.67	5.63	112.0	41.8 b	4.38	426.6	0.60 a
6	5.58	5.93	103.4	53.5 ab	4.35	444.0	0.54 b
9	5.68	5.78	102.7	53.8 a	3.63	439.3	0.56 b
ANAVA: probabilidad >F							
Qk	0.1585	0.8752	0.1243	0.0352	0.5774	0.8776	0.0301

[†] PPF = Peso promedio de fruto; [‡] NFR = Número de frutos rojos por planta; [§] MSF = Contenido de materia seca en frutos; [¶] MST = Materia seca total; [#] IC = Índice de cosecha. Cifras con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$).

Cuadro 2. Efecto de la concentración de K en la solución nutritiva (Qk = 3, 6 y 9 meq L⁻¹) sobre las variables de calidad de frutos (rojo-maduro) de tomate var. Yaqui, cultivado en hidroponía. Primer experimento.

Qk	Indice de color a/b	Firmeza	°Brix	AT [†]	IM [†]	pH
		gramo fuerza		% ac. cítrico	°Brix/AT	
3	1.42	182	3.90	0.199 b	19.79 a	5.13
6	1.43	210	3.96	0.300 a	13.20 b	5.23
9	1.30	229	4.20	0.323 a	12.98 b	5.16
ANAVA: Probabilidad > F						
Qk	0.4145	0.3480	0.5462	0.0002	0.0079	0.5008

[†]AT = Acidez titulable; [†]IM = Índice de madurez. Cifras con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$).

Calidad de Frutos

En el Cuadro 2, se presentan los resultados obtenidos al evaluar diferentes concentraciones de K en la solución nutritiva (Qk = 3, 6 y 9 meq L⁻¹) sobre la calidad del fruto. Existió un incremento significativo ($P < 0.01$) en el contenido de acidez titulable (porcentaje de ácido cítrico) con la adición de cantidades crecientes de K. Al igual que otros ácidos orgánicos, la acumulación de ácido cítrico en los frutos se debe al mecanismo de balance de carga catión-anión que tiene lugar cuando el K⁺ es transportado sin un anión acompañante, por ejemplo, NO₃⁻ hacia el interior del citoplasma (Marschner, 1986).

Con respecto a la firmeza, se observó que la fuerza aplicada para producir la deformación de los frutos de tomate fue 0.15 y 0.25 veces mayor con Qk de 6 y 9 meq L⁻¹, respectivamente, que 3 meq K L⁻¹, pero esta diferencia fue no significativa (Cuadro 2). Los sólidos solubles totales (°Brix) aunque también se relacionaron con Qk no tuvieron diferencias significativas y el pH del fruto tampoco se modificó con los tratamientos de K (Cuadro 2).

Mediante el segundo experimento, en el cual se amplió el ámbito de exploración de Qk (6, 9, 12, 15 y 18 meq L⁻¹), se confirmó que incrementos en la concentración de K superiores a 6 meq L⁻¹ en la solución nutritiva no permitieron obtener mayor ganancia en los parámetros de calidad (Cuadro 3), comparados con el primer experimento (Cuadro 2). Sólo se encontraron diferencias estadísticas en el pH de los frutos con valores de 4.8 a 5.0 entre tratamientos (Cuadro 3), pero en la práctica esto no representa mayor importancia. A cada uno de los parámetros identificados en el primer experimento como principales indicadores de calidad de frutos de tomate (acidez titulable, °Brix y firmeza) que se relacionaron más estrechamente con el K adicionado

en la solución nutritiva, se les ajustó una función exponencial ascendente que resultó estadísticamente significativa ($P < 0.01$) (Cuadro 4), lo cual confirma la tendencia asintótica entre el valor de Qk y los parámetros de calidad evaluados.

El interés de definir las ecuaciones del Cuadro 4, estriba en que éstas permitieron calcular por interpolación los valores máximos de Qk a partir de los cuales ya no fue posible seguir incrementando los valores de los parámetros considerados. Por ejemplo, en el caso de acidez titulable (% de ácido cítrico), el valor de Qk estimado (7.4 meq K L⁻¹) mediante la ecuación ajustada representa la concentración de K en la solución nutritiva a partir de la cual ya no es posible seguir incrementando el valor de acidez titulable (0.35% de ácido cítrico) en relación con el valor máximo obtenido (0.40% de ácido cítrico) en los experimentos. Una explicación similar a lo anterior es para el caso de °Brix y firmeza de frutos. Cabe aclarar que el valor de los parámetros de las ecuaciones ajustadas puede cambiar para los diversos genotipos de tomate, puesto que de manera natural se encuentran variaciones en los valores de los índices de calidad (AVRDC, 1994). Sin embargo, el efecto de la adición de K en la solución nutritiva sobre los índices de calidad del fruto pudo ser representado mediante estas

Cuadro 3. Efecto de la concentración de K en la solución nutritiva (Qk = 6, 9, 12, 15 y 18 meq L⁻¹) sobre las variables de calidad en frutos (rojo-maduro) de tomate, var. Yaqui, cultivado en hidroponía. Segundo experimento.

Variable	Probabilidad > F
Indice de color a/b	0.4875 ns
Firmeza (gramo fuerza)	0.4972 ns
°Brix	0.1053 ns
Acidez titulable (% ac. cítrico)	0.4832 ns
Indice de madurez (°Brix/AT)	0.6539 ns
pH	0.0200 *

ns = diferencias estadísticas no significativas.

* Significativas con $\alpha = 0.05$.

Cuadro 4. Modelos de regresión empleados para ajustar la tendencia de la acidez titulable, grados brix y firmeza de frutos en estado rojo-maduro en función de la concentración de K (Qk) en la solución nutritiva (Datos de Experimentos 1 y 2).

Modelo teóricos ajustados [†]	R ²	Qk estimado [‡]	Valor del índice de calidad [§]
AT [§] = 0.40[1-exp(-0.28Qk)]	0.95 **	7.4	0.35
°Brix = 4.40[1-exp(-0.5Qk)]	0.77 **	5.4	4.1
FF [¶] = 250[1-exp(-0.22Qk)]	0.74 **	7.6	203.0

** P < 0.01.

[†] Ecuaciones matemáticas del tipo $Y = A[1 - \exp(-bx)]$. Donde: Y representa el valor estimado de la variable dependiente, A valor de la asíntota, b pendiente de la función exponencial y x es el valor de la variable independiente.

[‡] Valores obtenidos por interpolación a partir de las ecuaciones exponenciales.

[§] AT = acidez titulable (% de ácido cítrico). [¶] FF = firmeza de fruto (gramo fuerza).

ecuaciones exponenciales, lo que permite establecer que mayores dosis de K no incrementarán la calidad del fruto.

Otros aspectos del manejo agronómico que pueden considerarse para incrementar el contenido de sólidos solubles (°Brix) y acidez titulable sin disminución del rendimiento, son el empleo de períodos cortos de déficit de agua y el aumento en la salinidad, dado que afectan la acumulación de agua en los frutos (Mitchell *et al.*, 1991). Ho *et al.* (1987) sugirieron que las sales de K regulan el potencial osmótico del fruto de tomate en condiciones de alta salinidad en virtud que participan en 49% del potencial hídrico en los frutos. Asimismo, indican que en condiciones de déficit hídrico, las más altas concentraciones de K en frutos se debieron sólo a que existió una reducción en el contenido de agua en el fruto, por lo que ocurrió mayor concentración y no porque se haya incrementado la importación de K al fruto. Adams y Ho (1989) lograron incrementar la concentración de materia seca en el fruto de 5.4 a 7.7% al aumentar la salinidad de la solución nutritiva. Sin embargo, cuando se cultiva tomate en un ambiente salino con una CE superior a 5 dS m⁻¹, se reduce el rendimiento y se incrementa la pudrición apical de frutos (Li *et al.*, 2001). En el presente estudio, los valores de CE de la solución nutritiva en los tratamientos de K fueron menores que 2.4 dS m⁻¹ y no incrementaron la concentración porcentual de materia seca en el fruto, lo cual explica por qué el contenido de °Brix se mantuvo sin variación significativa entre los tratamientos de K.

El color de los frutos determinado por la relación entre los índices de cromaticidad a/b fue similar, oscilando de 1.30 a 1.42 en todo el espacio de exploración de Qk (Cuadro 2). Si se considera esta referencia como indicador de la madurez (que es el procedimiento común en el comercio), la evaluación de calidad en el presente estudio se realizó en el mismo estado de madurez de frutos para todos los tratamientos de K y las variaciones obtenidas fueron resultado del suministro variable de K en la solución nutritiva. Sin embargo, es conveniente mencionar que el índice de madurez obtenido a partir de la relación °Brix/acidez titulable alcanzó un valor máximo de 19.79 para Qk 3.0 meq L⁻¹, atribuido en su mayor parte a un bajo valor en la acidez titulable. En los demás tratamientos, este índice fue de 13.2 y 12.98 para 6 y 9 meq L⁻¹ de K, respectivamente. Un bajo abastecimiento de K altera esta relación, por lo que los frutos retrasan su maduración, aunque se tenga el mismo índice de color a/b. Esto indica que, además del color a/b, es necesario emplear la relación °Brix/acidez titulable como indicador del grado de madurez y calidad del fruto.

Contenido y Extracción Nutricional de K.

El contenido de K en la planta no tuvo asociación con el rendimiento de frutos, pero sí influyó de manera significativa sobre la calidad de los mismos, aunque su efecto se restringió en un intervalo pequeño de Qk (3 a 6 meq L⁻¹). Esto indica que es indispensable hacer un manejo racional del K, ya que aplicaciones excesivas de este nutriente no repercutirán en una mejor calidad de la producción. En el Cuadro 5, se presenta la variación en el contenido porcentual y extracción de K en la parte vegetativa y frutos, así como en la biomasa aérea total en función de Qk.

A medida que existió un incremento en el suministro de K (Qk), el contenido de K en el dosel vegetal y frutos aumentó, lo que ocasionó que las cantidades de K extraído por la biomasa aérea total, así como en la parte vegetativa y frutos también se incrementara de manera significativa (Cuadro 5; Figura 1).

La acumulación de K extraído en la biomasa aérea total aumentó de manera directa con el valor de Qk, y dicho elemento se distribuyó principalmente en los frutos (Figura 1), pero no repercutió sobre el rendimiento de frutos ni en la producción de materia

Cuadro 5. Efecto de la concentración de K en la solución nutritiva (Qk) sobre la concentración y extracción de K en la parte aérea vegetativa (B_{AV}), frutos y biomasa aérea total (B_{BAT}) de tomate var. Yaqui en el momento de la cosecha.

Qk	Contenido de K		Extracción de K			K _{BAT} [†]
	B _{AV}	Frutos	B _{AV}	Frutos	B _{BAT}	
meq L ⁻¹	----- %	-----	----- g planta ⁻¹	-----	-----	%
3	1.50 b	4.29 c	2.47 b	11.25 b	13.72 b	3.20 a
6	2.43 ab	5.47 b	4.83 a	13.42 ab	18.25 ab	4.11 b
9	3.28 a	6.09 a	6.24 a	15.21 a	21.45 a	4.88 c
ANAVA: Probabilidad > F						
	0.0032	0.0001	0.0055	0.0324	0.0089	0.0001

[†]K_{BAT} = K en la biomasa aérea total. Cifras con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$).

seca (Cuadro 1) aunque sí en la calidad de los frutos (Cuadro 2). Los frutos de tomate en estado de crecimiento activo constituyeron el principal órgano demandante de K con valores de hasta 70 a 80% de la cantidad total de K extraída por la planta de tomate variedad Yaqui (Cuadro 5), el cual es requerido para uniformar la maduración e incrementar la acumulación de ácidos orgánicos en los frutos, logrando con ello buena calidad y sabor (Van Lune y Van Goor, 1977; Ho y Adams, 1995). En tomates indeterminados, 60% de K extraído por la planta es debida a los frutos (Tapia y Gutiérrez, 1997). El K constituye de 86 a 90% de los cationes totales acumulados en el fruto de tomate (Besford y Maw, 1975) y de esta cantidad, aproximadamente 64% del K total absorbido por los frutos está localizado en el pericarpio (Mitchell *et al.*, 1991). Esta acumulación intensiva de K por los frutos de tomate es

principalmente a partir de la savia del floema junto con los asimilados (Ho y Adams, 1995).

Por las razones anteriormente expuestas, un aspecto importante a considerar en el cálculo de la demanda de potasio en hortalizas de fruto como el tomate, a diferencia de cultivos de cereales, es su efecto significativo en la calidad del producto cosechado.

Requerimiento Interno de K

La concentración de K en la biomasa aérea (K_{BAT}) se incrementó de 3.2% de K para Qk de 3 meq L⁻¹ a 4.11 y 4.88% para Qk de 6 y 9 meq L⁻¹, respectivamente, de acuerdo con el primer experimento (Cuadro 5). Por lo tanto, cualquiera de estas dos últimas concentraciones de K en la biomasa aérea podrían corresponder al valor del requerimiento interno de potasio (RIK), dado que los tratamientos donde se obtuvieron promovieron el máximo rendimiento y calidad de frutos (Cuadros 1, 2 y 3). Al no encontrar diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de 6 y 9 meq K L⁻¹ resulta más favorable en la práctica seleccionar 4.11% de K como el valor del RIK para tomate, puesto que el consumo de fertilizante potásico sería menor con el consiguiente ahorro económico que esto representa sin desmeritar la calidad del producto cosechado.

Los resultados del segundo experimento demostraron que concentraciones de Qk mayores que 6 meq L⁻¹ no propiciaron un incremento significativo en la calidad de los frutos, puesto que fue similar en todos los casos (Cuadro 3) e incluso al incrementar Qk arriba de esta concentración se propició una mayor producción de frutos con pudrición apical (datos no mostrados) por una probable deficiencia de calcio inducida por antagonismo con el K (Van Lune y Van Goor, 1977). En este sentido, de acuerdo con el concepto de RI propuesto por Greenwood *et al.*

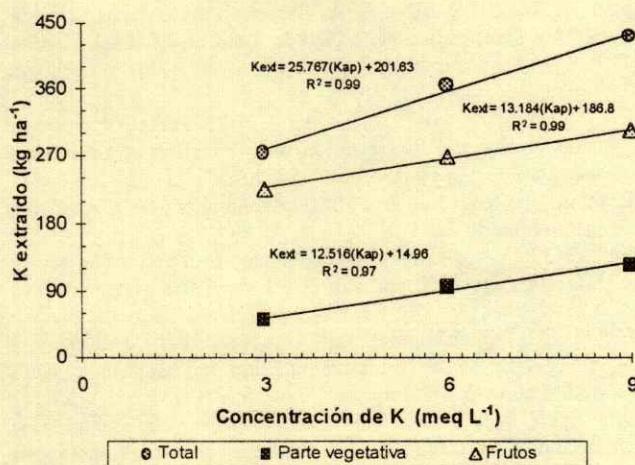


Figura 1. Variación del K extraído (Kext) a la cosecha en la parte vegetativa (tallos + hojas), frutos y biomasa aérea total del tomate var. Yaqui en función de la concentración de K (Kap) en la solución nutritiva.

(1980), el valor de 4.11% K en la biomasa aérea que se obtuvo con el tratamiento de 6 meq L⁻¹ (definido en el primer experimento) adquiere mayor fundamento. Estos investigadores demostraron que el porcentaje de K en la materia seca de varios cultivos hortícolas en el momento de la cosecha fue un buen indicador de la restricción del crecimiento vegetal debida a este nutrimento. Por lo tanto, a partir de la relación entre la concentración del nutrimento y el peso de materia seca total, es posible estimar la extracción del nutrimento para distintas producciones de biomasa.

En función del rendimiento de frutos y extracción total de K, fue posible también calcular la cantidad de K extraído por tonelada de fruto producido dando valores de 2.95, 3.27 y 3.77 kg t⁻¹ de fruto cosechado, para Qk de 3, 6 y 9 meq L⁻¹, respectivamente. Sin embargo, dado que con Qk de 6 meq L⁻¹ fue posible lograr el máximo rendimiento y óptima calidad de frutos, se determinó que el valor de 3.27 kg de K t⁻¹ de fruto producido es una alternativa para calcular la demanda nutrimental de K en tomate saladette var. Yaqui.

CONCLUSIONES

El contenido y la acumulación de K en la biomasa aérea de tomate varió en relación directa con la concentración de K presente en la solución nutritiva (Qk). Sin embargo, esto no repercutió sobre la producción de materia seca total y rendimiento de frutos. La mayor calidad de frutos se obtuvo a partir de Qk igual a 6 meq L⁻¹ y se mantuvo indistintamente de la concentración de K aplicada (Qk > 6 meq L⁻¹). Por lo tanto, se concluye que el cultivo de tomate saladette var. Yaqui demanda 3.27 kg de K t⁻¹ de frutos para obtener un óptimo rendimiento y calidad de tomates, lo que equivale a 4.11% de requerimiento interno de potasio.

LITERATURA CITADA

- Adams, P. 1991. Effects of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrient or sodium chloride on the yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. *J. Hortic. Sci.* 66: 210-217.
- Adams, P. 1994. Nutrition of greenhouse vegetables in NFT and hydroponics systems. *Acta Horticulturae* 361: 245-257.
- Adams, P. y M.M. Grimmett. 1986. Some responses of tomatoes to the concentration of potassium in recirculating nutrient solutions. *Acta Horticulturae* 178: 29-35.
- Adams, P. y L.C. Ho, 1989. Effects of constant and fluctuating salinity on the yield, quality and calcium status of tomatoes. *J. Hortic. Sci.* 64: 725-732.
- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- AVRDC. Asian Vegetable Research and Development Center. 1994. AVRDC 1993 Progress Report. Shanhua, Tainan, Taiwan (ROC).
- Besford, R.T. y G.A. Maw. 1975. Effect of potassium nutrition on tomato plant growth and fruit development. *Plant Soil* 42: 395-412.
- De Koning, A.N.M. 1989. Development and growth of a commercially grown tomato crop. *Acta Horticulturae* 260: 267-273.
- Galvis S., A., E. Alvarez S. y J.D. Etchevers B. 1998. A method to quantify N fertilizer requirement. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51: 155-162.
- Greenwood, J.D., T.J. Cleaver, M.K. Turner, J. Hunt, K.B. Niendorf y S.M.H. Loquens. 1980. Comparison of the effects of potassium fertilizer on the yield, potassium content and quality of 22 different vegetable and agricultural crops. *J. Agric. Sci. Camb.* 95: 441-456.
- Heuvelink, E. y L.F.M. Marcelis. 1989. Dry matter distribution in tomato and cucumber. *Acta Horticulturae* 260: 149-157.
- Ho, L.C. 1996. Tomato. pp. 709-728. In: E. Zamsky y A.A. Schaffer. Photoassimilate distribution in plants and crops. Marcel Dekker. New York.
- Ho, L.C. y P. Adams. 1995. Nutrient uptake and distribution in relation to crop quality. *Acta Hort.* 396: 33-44.
- Ho, L.C., R.I. Grange y A.J. Picken. 1987. An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. *Plant, Cell and Environment* 10: 157-162.
- Hobson, G.E. y P. Kilby. 1984. Rapid assessment of tomato composition during high quality fruit production and distribution. *Acta Hort.* 163: 47-54.
- Hurd, R.G., A.P. Gay y G.A. Mountfield. 1979. The effect of partial flower removal on the relation between root, shoot and fruit growth in the indeterminate tomato. *Ann. Appl. Biol.* 93: 77-89.
- Kader, A.A., L.L. Morris, M.A. Stevens y M. Albright-Holton. 1978. Composition and flavor quality of fresh market tomatoes as influenced by some postharvest procedures. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 103: 6-13.
- Li, L.Y., C. Stanghellini y H. Challa. 2001. Effect of electrical conductivity and transpiration on production of greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae* 88: 11-29.
- Marschner, H. 1986. Mineral nutrition on higher plants. Academic press. London, UK.
- Mitchell, J.R. y C. Shennan. 1991. Tomato fruit yields and quality under water deficit and salinity. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 116: 215-221.
- Mitchell, J.P., C. Shennan y S.R. Grattan. 1991. Developmental changes in tomato fruit composition in response to water deficit and salinity. *Physiol. Plant* 83: 177-185.
- Poysa, V. 1992. Use of *Lycopersicon cheesmanii* and *L. chmielewskii* to increase dry matter content of tomato fruit. *Can. J. Soil Sci.* 73: 273-279.
- Pujos, A. y P. Morard. 1997. Effects of potassium deficiency on tomato growth and mineral nutrition at the early production stage. *Plant Soil* 189: 189-196.
- Rodríguez S., J. 1990. Fertilización de cultivos. Un método racional. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

- Rodríguez S., J. y A. Galvis-Spinola. 1989. Dinámica del potasio en los suelos del país. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Steiner, A.A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil* 15: 134-154.
- Steiner, A.A. y H. van Winden. 1970. Recipe for ferric salts of ethylenediaminetetraacetic acid. *Plant Physiol.* 46: 862-863.
- Tapia L., M. y V. Gutiérrez. 1997. Distribution of dry weight, nitrogen, phosphorus, and potassium through tomato ontogenesis. *J. Plant Nutrition* 20(6): 783-791.
- Van Lune, P. y B.J. van Goor. 1977. Ripening disorder of tomatoes as affected by the K/Ca ratio in the culture solution. *J. Hort. Sci.* 52: 173-180.

ACUMULACION DIARIA DE MATERIA SECA Y DE POTASIO EN LA BIOMASA AEREA TOTAL DE TOMATE

Daily Accumulation of Aboveground Dry Matter and Potassium in Tomato

R. Bugarín-Montoya¹, A. Galvis-Spinola², P. Sánchez-García³ y D. García-Paredes¹

RESUMEN

Se generó un método para estimar la acumulación diaria de materia seca (MS_{BAT}) y potasio (K_{BAT}) en la biomasa aérea total del tomate en el período de crecimiento (P_C) entre la fecha de plantación y cosecha, cuya aplicación se espera que sea válida indistintamente del hábito de crecimiento del cultivo, manejo o condiciones ambientales. El procedimiento consistió en convertir la MS_{BAT} y K_{BAT} durante el P_C en términos proporcionales al valor máximo alcanzado en cada caso, codificando la MS_{BAT} , K_{BAT} y P_C con el valor de 0.0 en la plantación y 1.0 en la cosecha. Los valores intermedios se asignaron proporcionalmente al máximo observado (MS_{BATp} , K_{BATp} , P_{Cp}) y se ajustó cada tendencia a los siguientes modelos teóricos:

1.1

$$MS_{BATp} = \frac{\text{-----}}{[1 + \exp(3.5-5.7 P_{Cp})]}$$

1.2

$$K_{BATp} = \frac{\text{-----}}{[1 + \exp(5.0-6.6 P_{Cp})]}$$

Para validar ambos modelos, se emplearon datos de experimentos realizados por otros autores en diversos países, con diferentes ambientes de producción y manejo. La MS_{BAT} y K_{BAT} estimados con los modelos propuestos concordaron con los observados en los ensayos independientemente de las condiciones en que se desarrolló el cultivo de tomate, por lo que se concluye que los modelos propuestos pueden emplearse para estimar la acumulación diaria de materia seca y potasio en la biomasa aérea del

tomate, lo cual constituye una herramienta valiosa para coadyuvar a regular la aplicación de potasio en fertirrigación mediante riego por goteo.

Palabras clave: *Lycopersicon esculentum* Mill., demanda de potasio, periodo de crecimiento.

SUMMARY

A method was generated to estimate the daily accumulation of dry matter biomass (MS_{BAT}) and potassium (K_{BAT}) during the growth period (P_C) of tomato plants from planting date to harvest time. This approach is expected to be valid regardless of plant growth habit, management practices or environmental conditions. Maximum values of MS_{BAT} , K_{BAT} and P_C were converted, in all cases, to proportional terms to the maximum value reached in each one and were codified with 0.0 and 1.0 on the planting and harvest date, respectively. The intermediate values were assigned proportionally to the maximum value observed (MS_{BATp} , K_{BATp} , and P_{Cp}) and the trend was adjusted according to the following theoretical models:

1.1

$$MS_{BATp} = \frac{\text{-----}}{[1 + \exp(3.5-5.7 P_{Cp})]}$$

1.2

$$K_{BATp} = \frac{\text{-----}}{[1 + \exp(5.0-6.6 P_{Cp})]}$$

To validate both models, data from other researchers from several countries, under different environments and managements were used. The MS_{BAT} and K_{BAT} estimated with the proposed models coincided with the ones obtained by using experimental data from cultivated plants without climatic stress. It is concluded that the models proposed can be used to estimate the daily accumulation of dry matter and potassium in the aboveground tomato biomass. This estimation

¹ Facultad de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit. Xalisco, Nayarit. (rbugarin@nayar.uan.mx).

² Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México. (galvis@colpos.colpos.mx; promet@colpos.colpos.mx)

Recibido: Junio de 2001. Aceptado: Marzo de 2002.

Publicado en Terra 20: 401-409.

constitutes a valuable tool in regulating the potassium supply in fertigation with trickle irrigation.

Index words: *Lycopersicon esculentum Mill., potassium demand, growth period.*

INTRODUCCION

Ante la creciente escasez de recursos hídricos destinados para la agricultura y el alto costo de los insumos agrícolas, resulta indispensable buscar alternativas tecnológicas que reduzcan los costos de producción y que, al mismo tiempo, se obtengan altos rendimientos con la mayor calidad posible sin detrimento de los recursos naturales. En este sentido, el fertirriego ha resultado una técnica promisoriosa en agrosistemas hortícolas intensivos para abastecer adecuadamente con agua y nutrimentos a estos cultivos durante su ciclo de producción mediante el empleo de sistemas de microirrigación (Bar-Yosef, 1999). Aunque se ha demostrado que el fertirriego es una técnica exitosa, aun persisten problemas que son indispensables resolver como es precisar la dosis de fertilizantes que deben aplicarse para incrementar la eficiencia de aprovechamiento de los nutrimentos y fomentar la rentabilidad de la producción sin deterioro de los recursos naturales. Una forma de proceder es mediante la cuantificación de la demanda nutrimental diaria del cultivo de interés, lo que permitiría hacer los ajustes necesarios en el manejo de la fertilización.

Para calcular la demanda total de un cultivo, Galvis *et al.* (1994) sugirieron hacerlo a través de la meta de rendimiento en materia seca total y el requerimiento interno del nutrimento de interés. Aunque esto se ha validado exitosamente (Rodríguez *et al.*, 2001), este procedimiento no permite conocer la demanda parcial durante un periodo determinado del ciclo de crecimiento y desarrollo del cultivo. La distribución de la materia seca entre varias partes de la planta se ha descrito como un equilibrio funcional (Brouwer, 1962) o como funciones de distribución dependientes del tiempo o estado de desarrollo (Heuvelink y Marcelis, 1989); esto ha facilitado predecir de manera razonable la producción de materia seca a lo largo del ciclo de crecimiento en cultivos de crecimiento determinado, como maíz y trigo. Sin embargo, en plantas de crecimiento indeterminado como tomate, pepino y pimiento morrón es necesario considerar otros factores, ya que la dinámica de acumulación de materia seca es diferente (De Koning, 1989).

Mediante el empleo de modelos de simulación, es factible estimar la producción de materia seca en diversos cultivos. En tomate, se ha estimado la producción de materia seca para diferentes épocas del año (Heuvelink, 1995), pero este tipo de modelos tienen el inconveniente de requerir datos de entrada difíciles de conseguir o que, a menudo, no se cuenta con éstos (eficiencia fotoquímica, eficiencia de uso del CO₂, coeficientes de extinción lumínica, valores de Q₁₀, índices respiratorios para hojas, tallos, raíces y frutos y eficiencia de conversión de carbohidratos a materia seca), como es el caso de los modelos TOMSIM(1.0) (Spitters *et al.*, 1989) y TOMGRO(1.0) (Jones *et al.*, 1991). Con ambos modelos, se simuló de manera satisfactoria la producción de materia seca total en tres de cuatro experimentos y en el cuarto ensayo se subestimó en 35% (Bertin y Heuvelink, 1993). Esto sugiere que la inclusión de múltiples parámetros en el algoritmo de un modelo no necesariamente mejora la predicción de la producción de materia seca o absorción nutrimental (Gary *et al.*, 1998).

Los modelos que emplean múltiples parámetros como variables de entrada son convenientes para estudiar las interacciones del cultivo con el medio de producción y entender los efectos del manejo agrícola sobre el cultivo y el ambiente, pero no son apropiados para emplearlos en la toma de decisiones prácticas por la dificultad de su validación (Van Keulen y Wolf, 1986; Rodríguez, 1990). Para estos casos, es necesario el desarrollo de modelos cuyos parámetros de entrada sean los menos posibles y accesibles, cuyo propósito esencial es de empleo totalmente pragmático pero eficiente. Un ejemplo de ello, es el modelo de Tap y Van Straten (1995), quienes simplificaron el modelo propuesto por De Koning (1993) que originalmente requería 364 variables de entrada y ahora sólo requiere cinco, sin perder precisión en la simulación de la distribución de la materia seca en plantas de tomate. Por lo tanto, el esfuerzo en la construcción de un algoritmo debe centrarse en identificar los factores más limitativos de la producción y en los objetivos que se persigan para emplear el modelo; esto es, ya sea para tomar decisiones pragmáticas o entender el sistema de producción (Galvis, 1998).

El cultivo de tomate se ha estudiado en diferentes aspectos; sin embargo, es escasa la información disponible que oriente al productor sobre la cantidad diaria de potasio que requiere este cultivo para satisfacer sus necesidades metabólicas, lo cual tiene relevancia cuando se practica la fertirrigación. Por lo

tanto, en el presente trabajo se propone estimar la acumulación diaria de materia seca y potasio en la biomasa aérea total del tomate con base en sendos modelos teóricos, derivados del método propuesto por Galvis (1998) para trigo, cuya aplicación pueda ser válida para diferentes condiciones de producción y hábitos de crecimiento (determinado o indeterminado), empleando como variable de entrada el rendimiento esperado y la duración del período de crecimiento del cultivo.

MATERIALES Y METODOS

Modelos Teóricos Propuestos

Para generar los modelos teóricos, se estableció un experimento con tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) tipo saladette var. Yaquí de crecimiento determinado, empleando un sistema hidropónico con recirculación de la solución nutritiva. Se evaluaron tres concentraciones de K ($Q_k = 3, 6$ y 9 meq L^{-1}) en la solución nutritiva con un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones. El cultivo de tomate se realizó en invernadero mediante siembra directa en recipientes de PVC con capacidad de 20 dm^3 y como sustrato se empleó escoria volcánica basáltica. La composición base de la solución nutritiva fue (en meq L^{-1}): 10 NO_3^- , $0.83 \text{ H}_2\text{PO}_4^-$, 5.67 SO_4^{2-} , 6 K^+ , 3.1 Mg^{2+} y 7.4 Ca^{2+} . Las cantidades de micronutrientes adicionados fueron (en mg L^{-1}): 12 Fe , 1.6 Mn , 0.023 Zn , 0.011 Cu y 0.865 B . Las fuentes de nutrientes, el sistema de riego, manejo del cultivo, muestreos de plantas y análisis químico de K han sido descritos en detalle por Bugarín *et al.* (2002). Se cuantificó la acumulación de materia seca y potasio en la biomasa aérea de las plantas de tomate colectas a 20, 34, 48, 62, 74, 98 y 144 días después de la siembra (dds). Con el fin de construir el modelo teórico, se utilizaron sólo los datos de estas dos variables del mejor tratamiento de K (6 meq L^{-1}) con el cual se obtuvo el más alto rendimiento y calidad de tomate en dicho experimento.

Los datos obtenidos de la acumulación de materia seca y potasio en la biomasa aérea se manejaron de acuerdo con el método propuesto por Galvis (1998) para trigo, con el propósito de generar el modelo teórico del tomate procediendo de la siguiente manera: a) la variable independiente fue el tiempo transcurrido entre la fecha de plantación y la cosecha (P_c); b) la variable dependiente fue la materia seca (MS_{BAT}) o potasio (K_{BAT}) acumulados en la biomasa

aérea total durante el P_c , según haya sido el caso; c) las tres variables (P_c , MS_{BAT} y K_{BAT}) se codificaron asignando a cada una el valor de 0.0 en la plantación y 1.0 al valor máximo a la cosecha; los datos intermedios se codificaron proporcionalmente al máximo observado; d) mediante un proceso iterativo se ajustó una función logística a los datos experimentales codificados (MS_{BAT} y K_{BAT}) para obtener los parámetros de cada modelo teórico.

Validación de los Modelos Teóricos Propuestos

La validación de los modelos teóricos propuestos para estimar la acumulación diaria de materia seca y K en la biomasa aérea total se realizó utilizando datos reportados por otros autores en la literatura nacional e internacional, los cuales incluyen distintas variedades, hábitos de crecimiento, sistemas de riego y condiciones de producción (invernadero y a campo abierto). En los Cuadros 1 y 2, se resumen las principales características de la información utilizada en la validación de los modelos teóricos propuestos para estimar la MS_{BAT} y K_{BAT} , respectivamente. Con base en el rendimiento de frutos o materia seca total y duración del ciclo del cultivo que reportó cada autor citado en los dos cuadros en discusión, con los respectivos modelos teóricos propuestos, se estimó la cantidad de materia seca y K acumulados durante el período de crecimiento y desarrollo del tomate.

La precisión de la estimación para cada caso se evaluó mediante regresión lineal simple considerando los valores observados como la variable independiente y los estimados como la dependiente. La significancia estadística de las regresiones y sus respectivos coeficientes de determinación fueron los parámetros de referencia para evaluar la eficacia de los modelos teóricos propuestos en este trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Modelos Teóricos Propuestos

En la Figura 1, se presentan los resultados de la acumulación de materia seca (MS_{BAT}) y de potasio (K_{BAT}) en la biomasa aérea total a lo largo del ciclo de crecimiento del tomate que se obtuvieron en el ensayo realizado en condiciones de invernadero e hidroponía y su respectiva codificación de acuerdo con el método propuesto.

El inicio de floración se presentó a 30 días después de la siembra (dds), el cuajado de frutos

Cuadro 1. Experimentos empleados para validar el modelo propuesto que estima la acumulación diaria de materia seca en la biomasa aérea total del cultivo de tomate.

Ensayo	Cultivo	Lugar del ensayo	Sistema de riego	Suelo	Rendimiento	Ciclo	Cita
					t ha ⁻¹	ddp [§]	
MS 01	Tipo bola, indeterminado "Divino"	Culiacán, México	Goteo superficial en campo abierto	Vertisol	155.6	148	Burgueño <i>et al.</i> (1994)
MS 02	Tipo saladette, industrial determinado "M82-1-8 VF"	Gilat, Israel	Goteo subsuperficial en campo abierto	Haploxeralf	178.9	105	Martínez (1992)
MS 03						134	
MS 04						105	
MS 05						100	
MS 06	Tipo bola, indeterminado "Counter"					99	
MS 07						100	
MS 08		Wageningen, Holanda	Goteo superficial en invernadero	†	‡	104	Heuvelink (1995)
MS 09	De Ruiter Seeds, Bleiswijk					100	
MS 10						95	
MS 11						106	
MS 12						112	
MS 13						140	
MS 14						120	

† No se especifica. ‡ Sólo se reporta el valor de materia seca total a la cosecha. § ddp = días después de la plantación

inició a 37 dds, el crecimiento acelerado de frutos comenzó a 45 y, finalmente, el inicio de cosecha a 87 dds. Estas cuatro etapas son las que definieron la acumulación de materia seca. Durante la primera etapa de crecimiento del cultivo, que corresponde

desde la plantación hasta el inicio de la floración, hubo una escasa acumulación de materia seca (3% de la acumulación total). Posteriormente, en las etapas de amarre y crecimiento de frutos es donde ocurre una acumulación intensa de biomasa aérea; al inicio

Cuadro 2. Experimentos empleados para validar el modelo propuesto que estima la acumulación diaria de potasio en la biomasa aérea total del cultivo de tomate.

Ensayo	Tipo de tomate	Lugar del ensayo	Sistema de riego	Suelo	Rendimiento	Ciclo	Cita
					t ha ⁻¹	ddp [§]	
K 01	Saladette para proceso industrial "M82-1-8 VF"	Israel	Goteo superficial	Arcilloso [†]	160.0	100	Dafne (1984)
K 02	Tipo bola indeterminado "Hyb 675"	Israel	Goteo superficial	Arenoso [†]	127.0	150	Bar-Yosef <i>et al.</i> (1982)
K 03	Saladette para proceso industrial "Campbell 37"	EUA	Gravedad	‡	‡	112	Halbrooks y Wilcox (1980)
K 04	Tipo bola indeterminado "Divino"	Culiacán, México	Goteo superficial	Vertisol	155.6	148	Burgueño <i>et al.</i> (1994)
K 05	Tipo bola indeterminado "Divino"	Culiacán, México	Goteo superficial	Vertisol	150.0	150	Burgueño <i>et al.</i> (1995)

† No se indica clasificación de suelo. ‡ No reportado § ddp = días después de la plantación.

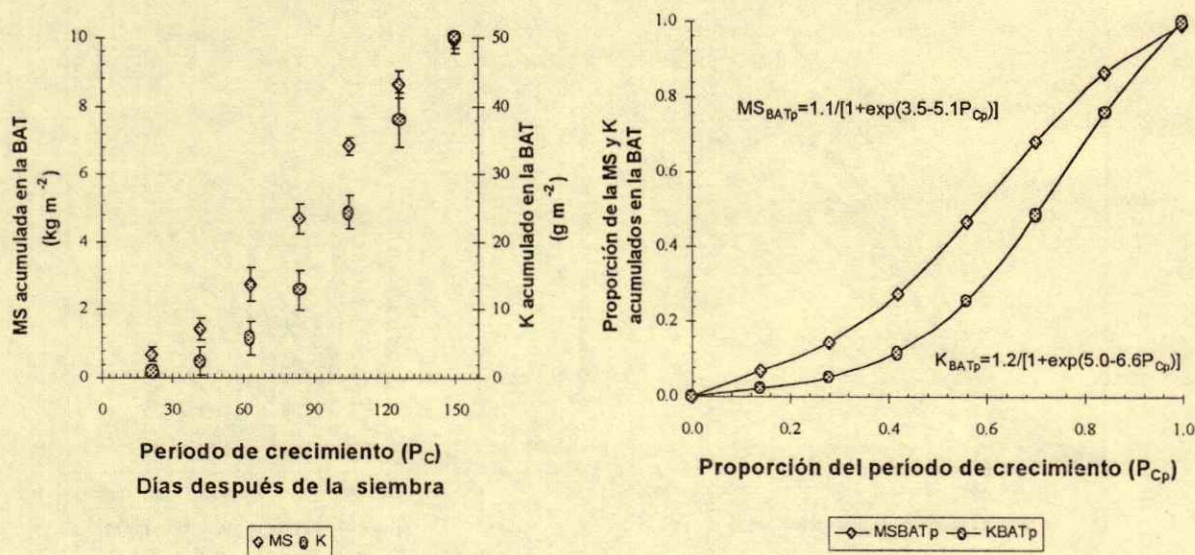


Figura 1. Tendencia de la acumulación de materia seca (MS) y potasio (K) en la biomasa aérea total (BAT) del tomate entre la fecha de siembra y la cosecha (P_C): a) Resultados experimentales (las barras verticales indican la desviación estándar de las repeticiones por muestreo); b). Codificación a valores proporcionales de materia seca (MS_{BATp}), potasio (K_{BATp}) y P_C (P_{Cp}).

de cosecha, el cultivo de tomate llega a 30% y el resto ($\pm 70\%$) durante la etapa de cosecha. Lo anterior indica que en el transcurso del período de corte de frutos es cuando el cultivo demanda mayor cantidad de nutrientes y, en consecuencia, cualquier déficit nutricional durante dicho lapso repercutirá, de manera negativa, sobre el rendimiento del cultivo.

Después del establecimiento del cultivo de tomate, se observa que la acumulación de K, al igual que la materia seca aérea, comienza a incrementarse de manera acelerada después de que ha ocurrido aproximadamente 30% del período de crecimiento y continúa en forma lineal ascendente hasta la cosecha cuando ocurre el crecimiento de los frutos. El incremento acelerado en la extracción de K es debido, en gran parte, a la formación y el crecimiento de frutos, los cuales llegan a constituir el principal órgano demandante de K, con valores de 70 a 80% de la cantidad total extraída por la planta (Bugarín *et al.*, 2002).

El hecho de acotar el período de crecimiento del cultivo de tomate en términos proporcionales en el modelo teórico propuesto, permite estimar la acumulación de materia seca y K en la biomasa aérea total para cualquier período del cultivo y, por ende, es posible calcular tanto la tasa de crecimiento, como de absorción de K.

Las variaciones que se presentan en las condiciones edafoclimáticas v.g. temperatura,

humedad relativa, radiación solar, pH y contenido de humedad edáfico, que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas, son considerados de manera implícita en el modelo teórico porque se parte de la premisa que en el rendimiento del cultivo se expresa, de forma indirecta, el grado de estrés ocasionado por uno o más factores del ambiente en que se conduce el cultivo.

Validación de los Modelos Teóricos Propuestos

Acumulación diaria de materia seca. En la Figura 2, se presenta la tendencia de la acumulación de materia seca total del tomate entre la fecha de plantación y la cosecha, para cada uno de los ensayos evaluados, así como su respectiva simulación con el modelo teórico propuesto. La acumulación de materia seca mostró un incremento exponencial, seguido por una fase de crecimiento lineal, o sea, una tasa de crecimiento constante del cultivo. Con el modelo teórico propuesto se especula que la acumulación diaria de materia seca, independiente del hábito de crecimiento y tipo de tomate (saladette o bola), siga una tendencia similar en todos los casos, independientemente de las condiciones ambientales o manejo del cultivo. Cuando los valores absolutos de acumulación de materia seca (en Mg ha⁻¹) se transformaron a valores proporcionales, toda la dispersión ocurrida se ajustó al modelo teórico y en cada situación se depende sólo de

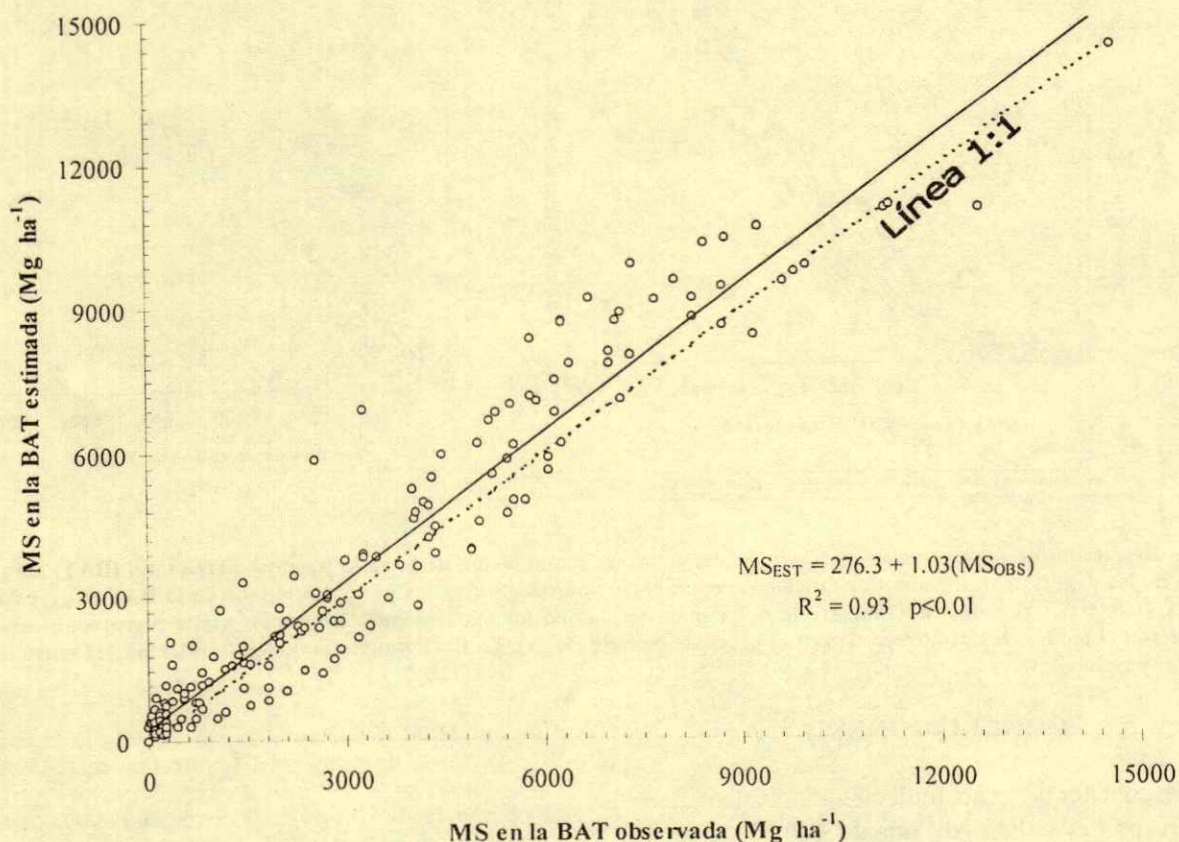


Figura 3. Comparación entre la materia seca acumulada (MS_{OBS}) en la biomasa aérea total (BAT), medida durante las diferentes etapas de crecimiento y desarrollo del tomate en los experimentos evaluados y sus correspondientes valores estimados (MS_{EST}) con el modelo teórico propuesto en el presente trabajo. La línea punteada indica la relación 1:1 entre los valores observados y estimados.

anterior permitirá decidir en forma acertada sobre la dosificación correcta del fertilizante potásico durante el ciclo de cultivo sobre todo cuando se manejan sistemas de fertirrigación mediante riego por goteo. A título de ejemplo, en los datos reportados por Dafne (1984) las tasas de absorción de K en tomate saladette variaron durante los primeros 40 ddp entre 0.10 y 2.30 $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$. Después de este lapso, la tasa de absorción de potasio se incrementó entre 8.00 y 9.20 $kg\ ha^{-1}\ día^{-1}$ hasta un poco antes de la cosecha. En el caso de tomate bola para consumo en fresco, de acuerdo con Bar-Yosef *et al.* (1982), la tasa de absorción durante los primeros 70 ddp, osciló de 0.40 a 0.60 $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$, mientras que en etapas posteriores varió de 2.20 a 7.80 $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$. Sin embargo, estos valores sobre la absorción de K a través del tiempo

serán diferentes para otras condiciones climáticas distintas a las que prevalecieron cuando se obtuvieron estos datos. Por tal motivo, el hecho de acotar el período de crecimiento del cultivo de tomate en términos proporcionales en el modelo teórico propuesto permite estimar de manera aproximada la acumulación y las tasas de absorción de potasio a través del tiempo.

Finalmente, al considerar una situación en donde no existe restricción sobre el suministro edáfico de potasio, entonces la tasa de absorción de nutrientes estará gobernada en un grado importante por la demanda de la planta, la cual depende a su vez de la edad de la planta y de las condiciones meteorológicas, así como del nivel de rendimiento.

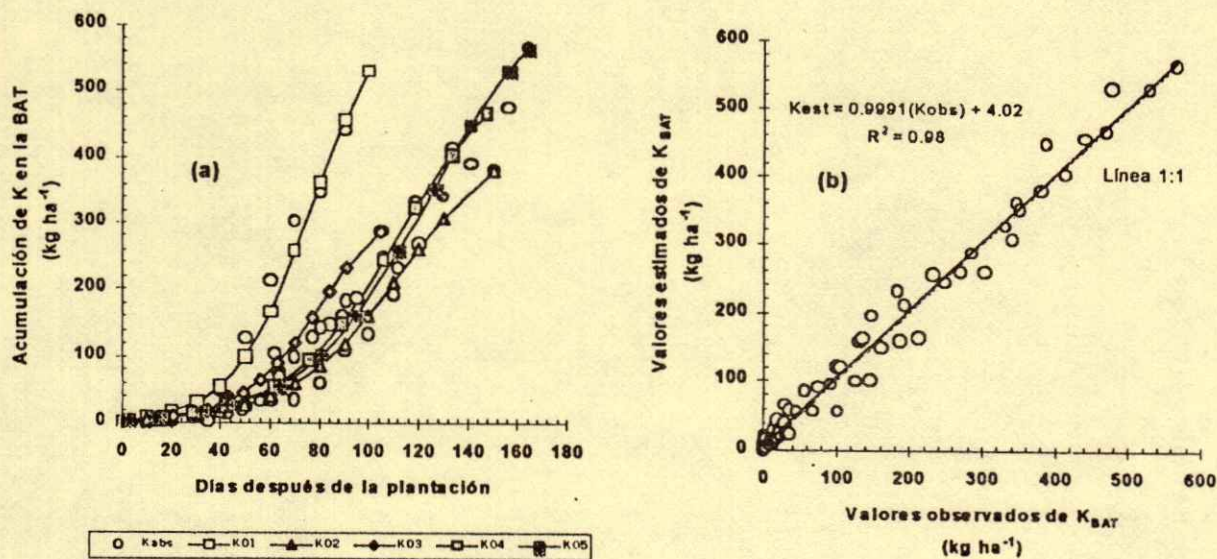


Figura 4. Resultados de la simulación de K. a) Tendencia de la acumulación de K en la biomasa aérea total (BAT) del tomate en cada uno de los experimentos evaluados; b) comparación entre valores observados de K acumulado en la BAT (K_{BAT}) durante las diferentes etapas de crecimiento y desarrollo del tomate (K_{OBS}) en los experimentos evaluados y sus correspondientes valores estimados con el modelo teórico propuesto en el presente trabajo (K_{EST}). La línea punteada indica la relación 1:1 entre los valores observados y estimados.

CONCLUSIONES

La estimación de la acumulación diaria de materia seca y K por el cultivo de tomate con los modelos teóricos propuestos ($R^2 = 0.93$ y 0.98 , respectivamente) se validó de manera satisfactoria, independientemente del rendimiento obtenido, hábito de crecimiento del cultivo, condiciones edafoclimáticas y manejo practicado. Por lo tanto, el empleo de esta herramienta metodológica facilitará la toma de decisiones para regular la administración del K en el tomate cultivado con sistemas de fertirrigación mediante riego por goteo.

LITERATURA CITADA

- Adams, P. 1994. Nutrition of greenhouse vegetables in NFT and hydroponics systems. *Acta Horticulturae* 361: 245-257.
- Bar-Yosef, B. 1999. Advances in fertigation. *Adv. Agron.* 65: 1-77.
- Bar-Yosef, B., S. Kramer y S. Ben Basat. 1982. Trickle irrigation and fertilization in the northern Arava Valley in Israel: Fresh tomatoes (cv. 975). Annual report. (in Hebrew). Agricultural Research Organization. Bet Dagan, Israel.
- Bertin, N. y E. Heuvelink. 1993. Dry-matter production in a tomato crop: Comparison of two simulation models. *J. Hort. Sci.* 68: 995-1011.
- Brouwer, R. 1962. Distribution of dry matter in the plant. *Neth. J. Agric. Sci.* 10: 361-376.
- Bugarin, M.R., A. Galvis S., P. Sánchez G. y D. García P. 2002. Demanda de potasio del tomate tipo saladette. *Terra* 20: 391-399.
- Burgueño, H., F. Uribe y M. Valenzuela. 1994. La fertirrigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Vol 1. BURSAG S.A. de C. V. Culiacán, Sinaloa, México.
- Burgueño, H., J. Gómez R. y I. Montoya M. 1995. La fertirrigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Vol 2. BURSAG S. A. de C. V. Culiacán, Sinaloa, México.
- Dafne, O. 1984. Nitrogen effect on dry matter production, mineral absorption, yield and quality of processing tomatoes. MSc thesis submitted to the Faculty of Agriculture (in Hebrew). The Hebrew University of Jerusalem. Israel.
- De Koning, A.N.M. 1989. Development and growth of a commercially grown tomato crop. *Acta Horticulturae* 260: 267-273.
- De Koning, A.N.M. 1993. Growth of tomato crop. Measurements for model validation. *Acta Horticulturae* 328: 141-146.
- Galvis, S.A., J. Etchevers B. y J. Rodríguez S. 1994. A system approach for determining NP fertilizer recommendations for annual crops. pp. 440-441. In: Vol. 5. II. Nutrient demand. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México.
- Galvis, S.A. 1998. Diagnóstico y simulación del suministro de nitrógeno edáfico para cultivos anuales. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Gary, C., J.W. Jones y M. Tchamitchian. 1998. Crop modelling in horticulture: State of the art. *Scientia Horticulturae* 74: 3-20.
- Halbrooks, M.C. y G.E. Wilcox. 1980. Tomato plant development and elemental accumulation. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 105(6): 826-828.

- Heuvelink, E. 1995. Growth, development and yield of a tomato crop: Periodic destructive measurements in a greenhouse. *Scientia Horticulturae* 61: 77-99.
- Heuvelink, E. y L.F.M. Marcelis. 1989. Dry matter distribution in tomato and cucumber. *Acta Horticulturae* 260: 149-157.
- Jones, J.W., E. Dayan, L.H. Allen, H. van Keulen y H. Challa. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Trans Am. Soc. Agric. Eng.* 34: 663-672.
- Martínez, H.J.J. 1992. Plant response to subsurface fertigation with P and N fertilizers. Thesis Doctor of Philosophy submitted to The Hebrew University of Jerusalem. Israel.
- Rodríguez, S.J. 1990. La Fertilización de los cultivos. Un método racional. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, Chile.
- Rodríguez, S.J., D. Pinochet T. y F. Matus B. 2001. Fertilización de los cultivos. Lom ediciones. Santiago de Chile, Chile.
- Spitters, C.J.T., H. van Keulen y D.W.G. van Kraalingen. 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS 87. pp. 147-181. *In: R. Rabbinge, A.S. Ward y H.H. van Laar (eds.). Simulation and system management in crop protection.* PUDOC. Wageningen, The Netherlands.
- Tap, R.F. y G. van Straten. 1995. Development of a reduced order tomato model. pp 1-6. *In: Vol. VI.A.2. Proceeding First International Symposium on Mathematical Modelling and Simulation in Agriculture and Bio-Industries.* Brussels, 9-12 May 1995.
- Van Keulen, H. and J. Wolf. 1986. Modelling of agricultural production: Weather, soils and crops. PUDOC. Wageningen, The Netherlands.

EFICIENCIA DE USO DE NITROGENO Y FOSFORO EN GENOTIPOS DE TRIGO, TRITICALE Y MAIZ

Nitrogen and Phosphorus Use Efficiency in Wheat, Triticale and Corn Genotypes

Gerardo Cruz-Flores¹, David Flores Román², Gabriel Alcántar González³,
Antonio Trinidad Santos³ y Rafael Vivanco Escobar¹

RESUMEN

Se estimó la eficiencia nutrimental de N y P en genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.), triticales (*X Triticosecale* Wittmack) y maíz (*Zea mays* L.) para diferenciarlos como más eficientes (+E) y menos eficientes (-E), mediante el uso de índices que incluyen biomasa en peso seco, acumulación de N y P y distribución de biomasa en parte aérea, raíz y total, así como longitud total de la raíz. Se encontró en trigo, que los criollos que se desarrollan en suelos ácidos (San Cayetano y Temporalero) acumularon mayor cantidad de N y P y su producción de biomasa fue más alta (hasta 50% mayor) en comparación con trigo (-E), lo que se indica por los índices evaluados. Para el triticales, la separación de (+E) y (-E) fue más compleja, pues los intervalos de eficiencia entre ellos fueron más estrechos y no presentaron diferencia estadística; sin embargo, San Lucas y Lamb-2, tuvieron mayor eficiencia nutrimental, debida más a la alta producción de biomasa que a la diferencia en acumulación de N y P. Las variedades de maíz, a diferencia de los criollos y los híbridos desarrollados por INIFAP para suelos ácidos, tuvieron mayor eficiencia en uso de N y P, lo cual se debe más a su mayor acumulación de P que a la de N, por que los híbridos acumularon mayor cantidad de N, pero su eficiencia nutrimental, expresada como producción de biomasa fue menor.

Palabras clave: Cereales, genotipos más eficientes, genotipos menos eficientes, solución nutritiva.

¹ FES Zaragoza-Universidad Nacional Autónoma de México. Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal. Batalla 5 de mayo 66, Col. Ejército de Oriente, 09230 México, DF.

² Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.

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

Recibido: Junio de 2001. Aceptado: Mayo de 2002.
Publicado en Terra 20: 411-422.

SUMMARY

The nutrient efficiency of N and P was estimated in wheat (*Triticum aestivum* L.), triticales (*X Triticosecale* Wittmack) and corn (*Zea mays* L.) genotypes, in order to classify them as more efficient (+E) and less efficient (-E) through the use of indexes, which include biomass (dry weight), N and P accumulation, total root length, and biomass partition in shoot, root and total. It was found that in wheat the local races that grow in acid soils (San Cayetano and Temporalero) accumulated greater amounts of N and P, and their production of biomass was higher (up to 50% higher) than that of wheat (-E), indicated by the indexes evaluated. For triticales, separation of (+E) and (-E) was less clear because the efficiency intervals were narrower and they did not show significant statistical difference. However, San Lucas and Lamb-2 triticales showed better nutrient efficiency, more because of a higher biomass production than of the difference in N and P accumulation. The corn varieties V-23 and V-105, unlike the local breeds and hybrids developed by INIFAP for acid soil, had a higher N and P use efficiency, due mainly to a higher accumulation of P than of N, but their nutrient efficiency, expressed as biomass production was lower.

Index words: Cereals, more efficient genotypes, less efficient genotypes, nutritive solution.

INTRODUCCION

El N y el P ocupan una posición excepcional en la nutrición vegetal por la alta cantidad que las plantas requieren de ellos. Las concentraciones de N y P en tejido vegetal, dependiendo de la especie de planta, tipo y edad del tejido y la disponibilidad de esos elementos en el suelo, se encuentran normalmente en el intervalo de 0.5 a 5% y 0.1 a 1.2%, respectivamente, del peso total de la materia seca. La deficiencia de P es uno de los factores que más limitan

la producción anual de cultivos en suelos ácidos de regiones templadas y tropicales (Fageria y Baligar, 1997). En los suelos tropicales ácidos existen altas concentraciones de Al y Mg que pueden llegar a ser tóxicos; además de la deficiencia de P, se presentan fuertes carencias de N disponible, entre otros nutrimentos (Baligar *et al.*, 1997).

Las diferencias en absorción de nutrimentos y el rendimiento se relacionan con el desarrollo de la raíz (elongación y absorción), translocación y demanda por el vástago, del nutrimento absorbido (Fageria y Baligar, 1997). Los genotipos con alta tasa de eficiencia nutrimental [TEN = g (peso seco de parte aérea) (mg⁻¹) nutrimento en parte aérea], cuando crecen en condiciones de estrés en suelos ácidos, pueden tener ventajas adaptativas sobre otros que tienen alto consumo nutrimental y bajo rendimiento en peso seco. La eficiencia nutrimental es un mecanismo de adaptación de las plantas a condiciones de estrés como consecuencia de la baja fertilidad, que se dan en diferentes suelos. Eficiencia nutrimental es la capacidad para producir mayor cantidad de biomasa seca por unidad de mineral aplicado o absorbido. Las diferencias en ésta se atribuyen tanto a la eficiencia en adquisición del nutrimento por las raíces, como a la adecuada utilización de éste por la planta, o a ambas características (Fageria y Baligar, 1997).

La variación de pH en la rizosfera es un mecanismo de tolerancia a bajas concentraciones de nutrimentos, por lo tanto, la capacidad de las plantas para modificar el pH está relacionada con la eficiencia en la absorción nutrimental. El pH de una solución nutritiva es una característica inherente a su composición, cada combinación específica de cationes y aniones tiene un pH específico (De Rijck y Schrevens, 1997). Existen evidencias del efecto de tipo de fuente de N sobre el pH de la rizosfera. La mayor disponibilidad de NO₃⁻, y su consecuente absorción por la planta, implica una tendencia a

excretar iones OH⁻ o HCO₃⁻ con la finalidad de mantener un equilibrio electroquímico en la membrana aunque, por otro lado, con la finalidad de aumentar la absorción de P, las plantas exudan ácidos orgánicos y modifican el pH de la rizosfera, influyendo así sobre la eficiencia mineral.

Con base en lo anterior, se planteó como objetivo de este trabajo evaluar, en genotipos de trigo, triticale y maíz, la eficiencia de uso de N y P, la relación de ésta con la variación de pH de las soluciones nutritivas y su relación con la producción de biomasa en los tres cereales.

MATERIALES Y METODOS

Para evaluar la eficiencia nutrimental de N y P en seis genotipos de trigo, triticale y maíz, cuyo origen se describe en el Cuadro 1, la investigación se efectuó en condiciones de invernadero en dos etapas: otoño (septiembre a diciembre de 1996) e invierno-primavera (febrero a mayo de 1997), con aporte nutrimental completo en solución nutritiva con la siguiente composición: (NH₄)NO₃, Ca(NO₃)₂, K₂SO₄, MgSO₄·7H₂O y NaH₂PO (2, 12, 5, 3 y 1.2 meq L⁻¹, respectivamente); H₃BO₃, MnCl₂, ZnSO₄, CuSO₄ y H₂MoO₄ (2.86, 1.81, 0.22, 0.15 y 0.08 mg L⁻¹); y Fe-EDTA, 2.6 mg L⁻¹. En ambos ensayos, se utilizó un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones, se usaron macetas de plástico pintado de negro con capacidad para 2.5 L con cuatro plantas cada una, sin ningún sustrato, abastecidas en forma permanente con aire filtrado proveniente de un compresor.

Se realizaron cambios semanales de solución nutritiva a la cual se le determinó el pH inicial, para realizar un seguimiento diario y evaluar los cambios de pH (Δ pH) para establecer su posible relación con la eficiencia nutrimental.

Cuadro 1. Genotipos de trigo, triticale y maíz utilizados en evaluación de eficiencia mineral.

Trigo	Origen [†]	Triticale	Origen	Maíz	Origen
San Agustín Altamirano	VV	Eranga 83	CIMMYT	Pico de Gorrión	VV
San Agustín Berros	VA	Met-94 Secano	IT	Negro	VA
San Cayetano	VA	San Lucas	CIMMYT	V-23	IT
Met-95 Galvez	IT	Lamb-2	CIMMYT	V-105	IT
CH 93 Verano	IT	Alamos 83	CIMMYT	H-28	IT
Temporalera 93	VV	Cananea-79	CIMMYT	H-135	IT

[†] VV = Villa Victoria, VA = Villa de Allende, IT = INIFAP Toluca, CIMMYT = Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.

Para determinar ΔpH se midió el pH de la solución nutritiva nueva al suministrarse a las plantas y después de cada uno de los tiempos indicados.

Durante la cosecha, se tomó toda la raíz y vástago (parte aérea) de las plantas a las que se les determinaron la longitud de raíz y el peso fresco después de quitar el exceso del agua utilizada en su lavado. Después, se colocaron en bolsas de papel para secarlas a 80 °C en una estufa con aire forzado hasta que alcanzaron peso constante.

En los ensayos realizados, se determinaron todas las variables que se requieren para la determinación de los índices de eficiencia que se señalan en el Cuadro 2.

Con ayuda del paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System), se efectuó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey $\alpha = 0.05$) para los dos ensayos efectuados y una prueba de correlación entre índices de eficiencia y variación de pH de la solución nutritiva.

A partir de diferentes índices de eficiencia que consideran las relaciones entre acumulación de N y P con biomasa seca total, de raíz y de parte aérea, se propone la clasificación de los genotipos estudiados de cada especie como: más eficiente (+E) y menos eficiente (-E).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eficiencia Nutrimental (NP) en Trigo

Los valores promedio obtenidos, para producción y distribución de la biomasa en seis genotipos de trigo (Cuadro 3), muestran que los criollos San Cayetano y

Temporalero produjeron la mayor biomasa tanto en raíz como en parte aérea y, con excepción para biomasa de raíz en el trigo Temporalero, hubo diferencias significativas entre ellos con las demás variedades de trigo estudiadas. El trigo CH 93 Verano produjo una alta biomasa de raíz, pero su producción de biomasa de parte aérea tuvo un valor intermedio.

La alta producción de biomasa seca de parte aérea y raíz, de las variedades de trigo San Cayetano y Temporalero, está directamente relacionada con la acumulación de los nutrimentos en estudio. Estas variedades presentaron mayor valor en esta variable al extraer N y P de la solución nutritiva hasta en más de 100% respecto a Altamirano y Berros (criollos) y más de 50% respecto a las variedades de trigo CH 93 Verano y Met-95 Gálvez del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Toluca (Figura 1A).

La diferencia en producción de biomasa que existe entre las variedades de trigo muestra que por arriba de 7.5 mg de P planta⁻¹, se tuvo una producción de más de 0.4 g en peso seco y sólo las variedades de trigo San Cayetano y Temporalero superaron este valor, por abajo del cual la producción de biomasa en peso seco fue entre 50 y 100% menor. La mayor acumulación de P en los tejidos vegetales aumenta la necesidad de incorporar mayor cantidad de N y, como consecuencia, si está disponible, aumenta también la producción de biomasa.

La evaluación de eficiencia nutrimental (Figura 2) indica que los índices de eficiencia (IE) para N y P muestran entre sí una correlación significativa.

De la determinación de índices de eficiencia por intercepción radical, expresada como PRUELra y

Cuadro 2. Índices utilizados para evaluar la eficiencia mineral de fósforo y nitrógeno.

Índice		Autor	Modelo
Índice de eficiencia	IE	Furlani y Filho, 1990	$IE = (\text{Biomasa total})^2 / \text{Acumulación total de nutrimentos}$
Eficiencia de uso	UE	Rao <i>et al.</i> , 1995	$UE = \text{Biomasa de vástago} / \text{Acumulación total de nutrimentos}$
Eficiencia en partición de biomasa	R/V	Marschner, 1995	$R/V = \text{Biomasa seca raíz} / \text{Biomasa seca vástago}$
Eficiencia de absorción de la raíz	ER	Jones <i>et al.</i> , 1989	$ER = \text{Acumulación de nutrimentos} / \text{Biomasa seca de raíz}$
Eficiencia en la translocación de la raíz	RUE	Soon, 1992	$RUE = \text{Acumulación de nutrimentos} / (R/V)$
Eficiencia por intercepción radical	RUELra	†	$RUELra = \text{Acumulación de nutrimentos} / (\text{Biomasa seca de raíz})$ (Longitud de raíz)

† Propuesto por los autores.

Cuadro 3. Distribución o partición de biomasa en diferentes genotipos de trigo, triticale y maíz.

Genotipo	Biomasa seca					
	Parte aérea			Raíz		
	sep-dic 1996	feb-may 1997	\bar{X}	sep-dic 1996	feb-may 1997	\bar{X}
----- g planta ⁻¹ -----						
Trigo						
Altamirano	0.48	0.06	0.27 b	0.05	0.03	0.039 b
Berros	0.24	0.04	0.14 b	0.04	0.03	0.035 b
San Cayetano	0.93	0.22	0.57 a	0.09	0.07	0.082 a
Verano	0.49	0.08	0.29 b	0.04	0.12	0.083 a
Galvez	0.24	—	0.24 b	0.04	—	0.04 b
Temporalero	0.73	0.12	0.42 b	0.06	0.05	0.054 b
Triticale						
Cananea	0.51	0.12	0.315 a	0.05	0.05	0.05 a
Eronga	0.76	0.13	0.447 a	0.07	0.05	0.060 a
Secano	0.50	0.07	0.284 b	0.04	0.03	0.038 b
Alamos	0.70	0.12	0.408 a	0.06	0.05	0.055 a
Lamb-2	0.64	0.23	0.435 a	0.06	0.08	0.069 a
San Lucas	0.44	0.30	0.368 a	0.05	0.08	0.066 a
Maíz						
Pico de gorrión	0.72	0.45	0.585 b	0.36	0.2	0.28 b
Negro	0.55	0.29	0.42 b	0.22	0.13	0.175 b
V-23	1.04	0.67	0.855 a	0.45	0.25	0.35 a
V-105	0.73	0.57	0.65 a	0.31	0.21	0.26 b
H-28	0.75	0.24	0.495 b	0.27	0.11	0.19 b
H135	0.64	0.34	0.49 b	0.3	0.23	0.265 b

Dentro de especie, letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Tukey (DHS), $P \leq 0.05$.

NRUELra (absorción por intercepción radical para P y N, respectivamente), se observó que las variedades de trigo San Cayetano, Altamirano y Temporalero fueron de alta eficiencia en intercepción para P y N, mientras que CH 93 Verano y Met-95 Galvez se ubican en lugar intermedio, y Berros se presentó como el menos eficiente. El Cuadro 4 muestra otros índices de eficiencia evaluados. La distribución de biomasa asociada con la eficiencia nutrimental puede estimarse con ayuda de la razón peso seco de raíz/parte aérea. Con la menor razón indicada las variedades de trigo San Cayetano y Temporalero tuvieron estrecha relación con la alta cantidad de nutrimentos que se desplazaron hacia la parte aérea.

San Cayetano y Temporalero produjeron mayor cantidad de biomasa en parte aérea (vástago) y tuvieron los máximos valores de acumulación de P y N y, como consecuencia, los índices de eficiencia de P y de N (IEP e IEN, respectivamente) fueron altos (Figura 2). Respecto a UEP y UEN, propuestos por Rao *et al.* (1995), estos índices representan los miligramos de P y N necesarios para producir un gramo de biomasa en la parte aérea (vástago). Los

genotipos San Cayetano y CH 93 Verano resultan eficientes para P, mientras para N, el Temporalero es más eficiente que los anteriores. Para UEP y UEN, CH 93 Verano resultó eficiente, sin embargo, su razón raíz/vástago es la mayor y así su alta distribución de biomasa hacia la raíz lo hace menos eficiente. Al evaluar los índices RUE y ER en San Cayetano como más eficiente y Berros como menos eficiente, se confirman los valores encontrados con los otros índices utilizados para ambos nutrimentos (Cuadro 4). Con los valores encontrados para los distintos índices evaluados y con la finalidad de encontrar una relación efectiva entre ellos, se planteó una matriz de correlación que muestra sólo aquéllos con mayor significancia.

La matriz de correlación (Cuadro 5) muestra a los índices IEP e IEN (Furlani y Filho 1990), con alta correlación con el índice de razón de biomasa (RAI/VAS) y con el índice RUE que propuso Soon (1992), el cual representa la eficiencia de translocación del nutrimento de la raíz a la parte aérea. En general, hay valores aceptables de correlación de estos índices de la raíz con la eficiencia de absorción

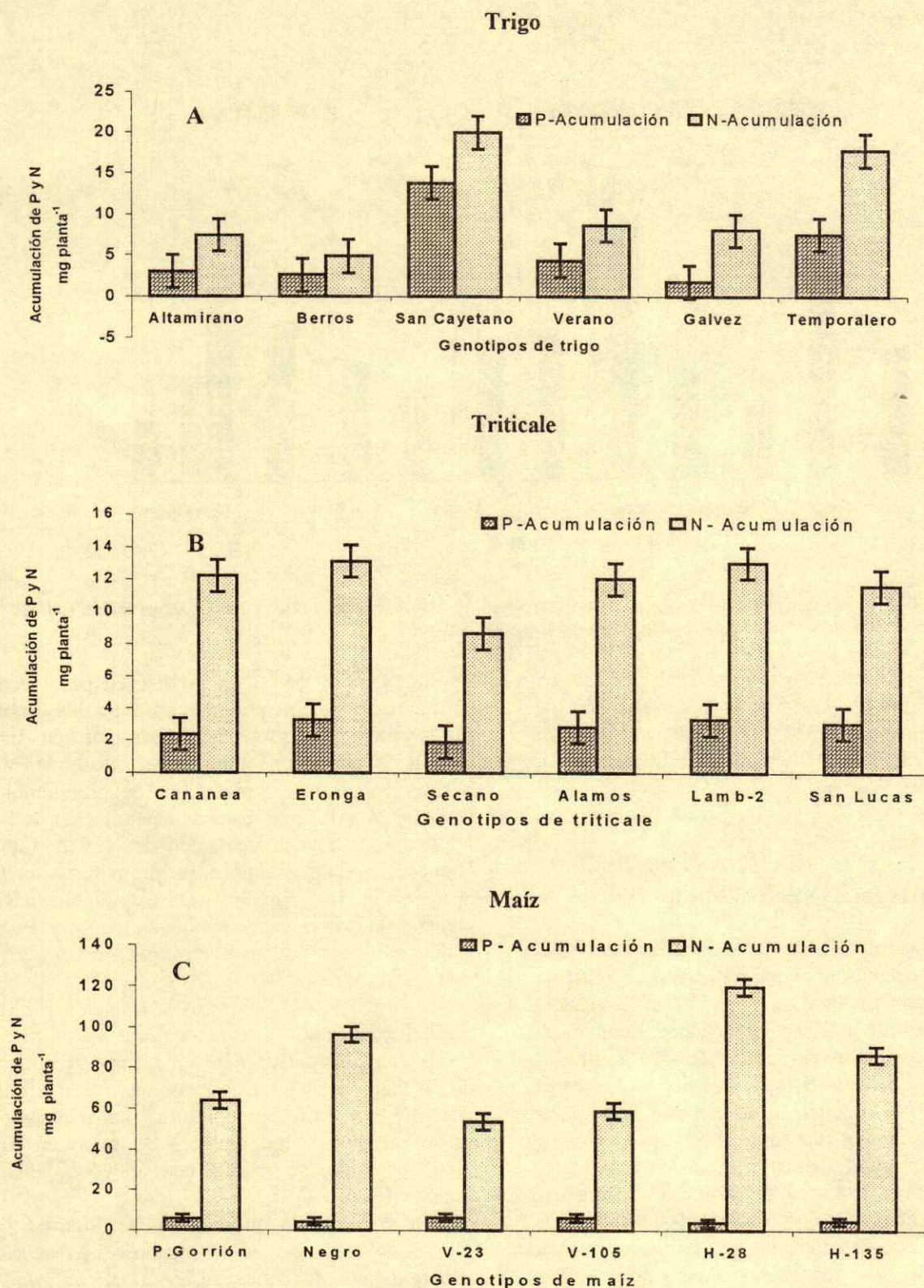


Figura 1. Acumulación, en trigo (A), triticale (B) y maíz (C), de nitrógeno y fósforo en condiciones de suficiencia nutrimental en solución nutritiva. Promedio de dos ensayos sep-dic 1996 y feb-may de 1997.

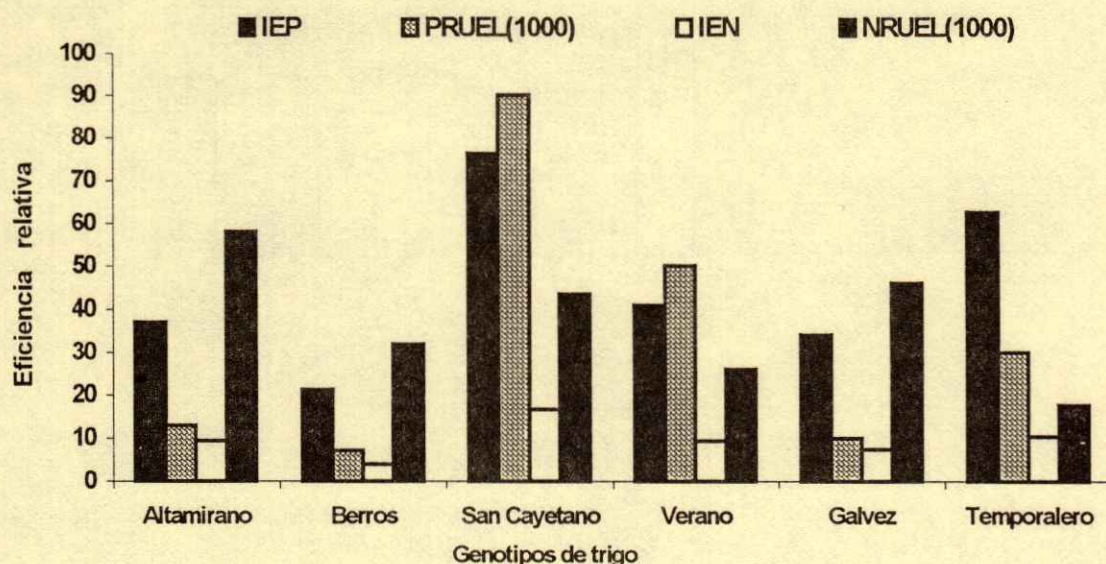


Figura 2. Índices de eficiencia (IEP y IEN fósforo y nitrógeno, respectivamente) y eficiencia por intercepción radical (PRUELra y NRUELra fósforo y nitrógeno, respectivamente) en trigo.

de la raíz (ER) (Jones *et al.*, 1989). Al analizar los resultados (Figura 2, Cuadro 4) de evaluación de eficiencia nutrimental para P y N, se encontró que San Cayetano y Temporalero fueron más eficientes (+E); Berros, CH 93 Verano y Met-95 Galvez, menos eficientes (-E), y en término medio de eficiencia, el trigo Altamirano.

Eficiencia Nutrimental (NP) en Triticale

Se ha indicado que el triticale absorbe más P del suelo y tiene, además, mayor producción de proteína cruda por unidad de biomasa que el trigo (Bushuk y Larter 1980), esto puede ser consecuencia de una alta eficiencia de uso o mayor absorción de N. En los resultados del primer ensayo no hubo diferencia significativa en la producción de biomasa de la parte aérea, mientras que en el ensayo de febrero a mayo de 1997, los genotipos de triticale Lamb-2 y San Lucas produjeron mayor cantidad de biomasa de la parte aérea, con diferencia estadística con los otros genotipos (Cuadro 3). Entre los genotipos de triticale, las diferencias son menos evidentes que en las variedades de trigo, quizá por su mayor amplitud de base genética que les permite mejor adaptación a distintas condiciones.

La biomasa de raíz, con base en peso seco, fue constante en los dos periodos en todos los genotipos. En promedio, de los seis genotipos de triticale estudiados, la menor biomasa se tiene en Met-94 Secano con $0.038 \text{ g planta}^{-1}$ y en éste también se encontró el valor más bajo de acumulación de P y de N. Respecto a la acumulación de N y P, Cananea, Eronga, Lamb-2 y San Lucas presentaron en forma aproximada los mismos valores (Figura 1B). Al analizar la razón de acumulación de N y P en los genotipos de triticale, se observaron valores de N:P de 3.5:1 hasta 5:1.

Los genotipos de triticale Cananea y Met-94 Secano de menor biomasa de parte aérea presentan una razón N:P mayor que 4.5:1 (más N por unidad de P). San Lucas y Lamb-2 con una razón N:P menor que 4:1 son más productivos. La evaluación de eficiencia nutrimental de N y P, tanto en triticale como en trigo, se realizó con apoyo de diferentes índices (Cuadro 4).

En triticale, la producción de biomasa y los índices de eficiencia tienen menores diferencias entre genotipos que las que presentan las variedades de trigo. San Lucas, Lamb-2 y Eronga 83, en forma consistente, mostraron una alta producción de biomasa y un mayor valor de eficiencia de uso para

Cuadro 4. Diferentes índices para evaluar eficiencia nutrimental en genotipos de trigo, triticale y maíz.

Especie	(R / V) ¹	Índices de eficiencia de fósforo				Índices de eficiencia de Nitrógeno				
		(UE) ¹		ER ²		UE ³		ER ⁴		RUE ⁵
		Biomasa seca de raíz (g)	Biomasa seca de parte aérea (g)	Contenido de P de raíz (g)	Contenido de P (mg) Biomasa seca	Contenido de P en parte aérea (mg)	Biomasa seca de parte aérea (g)	Contenido de N (mg) Biomasa seca	Contenido de N en parte aérea (mg)	
Trigo										
Altamirano	0.34 b	144.25 NS	0.042 a	0.018 b	27.43 a	0.17 b	0.072 b			
Berros	0.42 b	118.55 NS	0.027 b	0.006 b	23.51 ab	0.16 b	0.035 b			
Sn. Cayetano	0.21 b	101.8 NS	0.051 a	0.036 a	22.71 ab	0.23 ab	0.166 a			
Verano	0.88 a	99.07 NS	0.044 a	0.020 b	22.52 ab	0.19 b	0.083 b			
Galvez	0.16 c	110.28 NS	0.059 a	0.013 b	26.12 ab	0.25 a	0.056 b			
Temporalero	0.27 b	110.93 NS	0.053 a	0.033 a	21.88 b	0.32 a	0.215 a			
Triticale										
Cananea	0.25abc	133.68 NS	0.050 ab	0.019 b	30.35 a	0.19 NS	0.08 b			
Eronga	0.24abc	146.86 NS	0.032 c	0.007 b	25.25 ab	0.18 NS	0.04 b			
Secano	0.27 a	298.76 NS	0.041 b	0.020 b	27.45 a	0.06 NS	0.08 b			
Alamos	0.26 ab	135.78 NS	0.040 b	0.008 b	25.63 ab	0.17 NS	0.03 b			
Lamb-2	0.21bc	127.97 NS	0.051 ab	0.037 a	25.42 ab	0.23 NS	0.17 a			
San Lucas	0.19c	135.52 NS	0.061 a	0.037 a	24.21 b	0.35 NS	0.23 a			
Maiz										
Pico de gorrion	0.465 a	106.8 b	0.023 NS	0.059 NS	24.79 NS	0.091 NS	0.050 a			
Negro	0.415 a	101.2 b	0.026 NS	0.012 NS	24.00 NS	0.111 NS	0.050 a			
V-23	0.4 ab	145.0 a	0.021 NS	0.017 NS	24.72 NS	0.113 NS	0.098 a			
V-105	0.405 a	112.4 b	0.024 NS	0.016 NS	25.17 NS	0.105 NS	0.070 a			
H-28	0.415 a	129.0 b	0.019 NS	0.010 NS	24.09 NS	0.107 NS	0.057 a			
H-135	0.57 a	112.2 b	0.020 NS	0.009 NS	24.29 NS	0.081 NS	0.036 b			

Dentro de la misma columna, por cada especie, letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Tukey (DHS) P ≤ 0.05. Índices de: ¹ Marschner (1995); ² Rao et al. (1995); ³ Jones et al. (1989); ⁴ Soon (1992).

los dos nutrimentos. El triticale menos eficiente fue Met-94 Secano, material liberado por INIFAP para la región del Valle de Toluca, el cual, junto con el triticale Alamos, produjo la menor cantidad de biomasa entre los genotipos estudiados; así también, ambos tuvieron la menor acumulación de P y N y la mayor razón raíz/vástago por mayor desarrollo del sistema radical, en detrimento de la parte aérea, quizá atribuible a una baja eficiencia interna en uso de los nutrimentos (Cuadro 4). Por otro lado, Lamb-2 y San Lucas presentaron una baja razón raíz/vástago y, como consecuencia, una alta eficiencia nutrimental.

Como se indicó, UEP y UEN representan los miligramos de P y N requeridos para producir un gramo de biomasa en el vástago, así Lamb-2, Cananea y San Lucas tuvieron alta eficiencia (+E). Met-94 Secano necesitó más miligramos de N y P para producir un gramo de biomasa, por lo que se clasifica como menos eficiente (-E), lo cual también quedó indicado en los índices que involucran parámetros de la raíz (ER y RUE).

Al utilizar los resultados de acumulación de N y P y los índices de eficiencia estudiados, se concluye que entre los genotipos de triticale, el Met-94 Secano es el que puede catalogarse como menos eficiente (-E), mientras que Lamb-2 y San Lucas son más eficientes

(+E) y Eronga, Cananea y Alamos se ubicarían en un nivel intermedio de eficiencia.

El Cuadro 5 muestra el análisis de correlación para los índices de eficiencia en triticale. Hay en ellos un comportamiento muy consistente y similar al descrito para las variedades de trigo, es decir, alta correlación negativa de la razón de biomasa (RAI/VAS) con valores significativos y con el que representa la eficiencia de translocación del nutrimento (Soon, 1992).

Eficiencia Nutrimental (NP) en Maíz

En maíz, la producción de biomasa por mg de P acumulado muestra que las dos variedades estudiadas, V-105 y V-23, y especialmente la última con 0.855 g planta⁻¹ sobresale ante híbridos y criollos. Los híbridos H-28 y H-135 y principalmente el criollo Negro (0.495, 0.49 y 0.42 g planta⁻¹, respectivamente), tuvieron la menor producción de biomasa de parte aérea.

El maíz Negro y el Híbrido H-28 con 0.175 y 0.19 g planta⁻¹ tuvieron la menor producción de biomasa de la raíz con base en peso seco; esto representa aproximadamente la mitad de la que alcanzó V-23 (Cuadro 3). Los híbridos de maíz

Cuadro 5. Coeficientes de correlación entre índices de eficiencia nutrimental en trigo, triticale y maíz.

	EUP	EUN	RAI/VAS	ERP	ERN	RUEP	RUEN
Trigo							
IEP	0.245 NS	-0.188 NS	-0.511*	0.3953 NS	0.569 *	0.930*	0.882*
IEN	0.030 NS	0.194 NS	-0.453	0.3828 NS	0.208 NS	0.850*	0.629*
ERP	-0.175 NS		-0.899*		0.714*	0.643*	0.565*
ERN		-0.634*	-0.759*			0.640*	0.818*
RUEP			-0.771*				0.745*
Triticale							
PEI	0.743*	0.376 NS	-0.564*	0.0126 NS	0.0267 NS	0.781*	0.694*
NEI	0.493 NS	0.714*	-0.507*	0.1507 NS	-0.3498 NS	0.807*	0.410 NS
PRE	-0.408 NS		-0.741*			0.579*	
NRE		-0.832*	-0.387 NS				
PRUE			-0.771*				0.745*
Maíz							
IEP	0.210 NS	0.623*	-0.386 NS	0.281 NS	0.466 NS	0.809*	0.916*
IEN	-0.097 NS	0.696*	-0.464 NS	0.525 NS	0.493 NS	0.942*	0.956*
ERP	-0.700*		-0.774*		0.724*	0.764*	0.628*
ERN		-0.833*	-0.936*	0.724*			0.712*
RUEP		0.597*	-0.649*	0.763*	0.668*	0.961*	0.745*

*, ** = significativo al nivel de probabilidad 0.05 y 0.01, respectivamente. NS = no significativo.

IE, Índice de eficiencia = (Biomasa total)² / Acumulación de nutrimento total, (IEP y IEN para fósforo y nitrógeno respectivamente).

EU, Eficiencia de uso = Biomasa raíz / Acumulación de nutrimento total, (EUP y EUN para fósforo y nitrógeno respectivamente).

R/V, Partición o distribución de biomasa eficiencia = Biomasa seca raíz / Biomasa seca de parte aérea.

ER, Eficiencia de absorción de la raíz = Acumulación de nutrimento total / Biomasa seca de raíz, (ERP y ERN para fósforo y nitrógeno respectivamente).

RUE, Eficiencia de translocación de la raíz = Acumulación de nutrimento total / (R/V), (RUEP y RUEN para fósforo y nitrógeno respectivamente).

acumularon mayor cantidad de N que las variedades mejoradas, pero éstas más P que los híbridos. Se debe destacar que la acumulación de N fue mayor en los criollos que en las variedades mejoradas. Al efectuar en maíz el cálculo de las relaciones N:P en acumulación, se encontró que van de 10:1 a 34:1. Las variedades V-105 y V-23 y el criollo Pico de Gorrión con relación menor de 15:1 tuvieron alta producción de biomasa y el híbrido H-28 con relación 34:1 fue el menos productivo y de menor eficiencia nutrimental.

En orden descendente en acumulación de N (Figura 1C), el maíz H-28 y luego el Negro tuvieron los valores más altos (119 y 96 mg de N planta⁻¹, respectivamente), sin embargo, como ya se indicó, en ambos, la biomasa de parte aérea fue de las más bajas, lo cual señala que no obstante su alto valor de N acumulado, la menor acumulación de P, respecto a las otras variedades (3.65 y 4.135 mg de P planta⁻¹), tuvo fuerte influencia sobre la baja producción de biomasa por tratamiento. Aunque la producción de biomasa de raíz de V-23 fue la más alta, el análisis de la razón raíz/parte aérea lo señala como el maíz que distribuyó su biomasa de manera más eficiente. El menos eficiente es el híbrido H-135. Con la evaluación de los diversos índices, se encontró que las variedades mejoradas son las de mayor eficiencia nutrimental respecto a los híbridos y los criollos estudiados con excepción del Pico de Gorrión (Cuadro 4).

Las variedades V-23, V-105 y Pico de Gorrión se clasificaron como más eficientes (+E); H-135 y H-28, menos eficientes (-E) y Negro fue de eficiencia nutrimental intermedia entre las variedades e híbridos estudiados.

El análisis de las correlaciones entre los índices de eficiencia evaluados (Cuadro 5) muestra que los IE de Furlani y Filho (1990) tienen diferencia significativa con los índices de eficiencia de la raíz ER y RUE (Jones *et al.*, 1989; Soon, 1992) y éstos con la distribución de biomasa o razón raíz/parte aérea.

Los índices de eficiencia en uso UE (Rao *et al.*, 1995) también se correlacionan significativamente con los IE y con los índices de eficiencia de la raíz. De acuerdo con los resultados de eficiencia evaluados por diferentes índices, se tiene que cualquier de los índices de eficiencia utilizados puede ser aplicable a este tipo de estudios.

La relación (raíz/parte aérea) asociada con la eficiencia nutrimental mostró que, en los genotipos más eficientes (+E) de los cereales de grano pequeño (trigo y triticales), aproximadamente 20% del peso total con base en materia seca fue desarrollo radical,

mientras que en los menos eficientes (-E) del trigo (Berros y CH 93 Verano), la biomasa de raíz fue hasta 40 y 80%, respectivamente, y en triticales (Secano) cerca de 30%. En el maíz más eficiente (V-23), 40% de la biomasa total se tuvo en la raíz y en los menos eficientes (H-28 y H-135) fue mayor que 55%.

Poseer una alta biomasa radical es un rasgo anatómico y morfológico importante que faculta a la planta para explorar mayor volumen de suelo y con ello aumentar su absorción de nutrimentos, situación que ocurrió en el maíz V-23 que produjo la mayor biomasa de raíz pero así también la mayor biomasa en parte aérea dando la mejor distribución de biomasa (parte aérea/raíz); sin embargo cuando el incremento de la biomasa de raíz es a costa de una disminución de la del vástago, influye **negativamente** sobre los rendimientos como parece ser el caso del trigo Verano que produjo alta biomasa en raíz pero media del vástago.

De los otros índices de eficiencia utilizados en el presente estudio (Jones y Jessop, 1989; Soon, 1992; Rao *et al.*, 1995), se encontró que todos ellos permiten distinguir diferencias entre genotipos de la misma especie y así clasificar algunos de ellos como más eficientes y otros como menos eficientes en el uso de P y N. En el Cuadro 5 de correlación entre índices de eficiencia puede apreciarse que en trigo y triticales (excepto ERN para triticales), los índices que involucran la raíz, ER de Jones y Jessop, (1989) y RUE (Soon, 1992), tienen alta correlación significativa con la distribución de la biomasa (Marschner, 1995).

Para el maíz, el índice de Soon (1992) tiene alta correlación con los demás índices. Esto sugiere que es factible utilizar este índice como parámetro de selección de genotipos de maíz para suelos en los que la disponibilidad de P y N sea limitada.

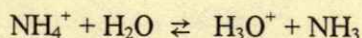
A diferencia de una mayor producción de biomasa total por unidad de nutrimento tomado, las plantas C₄ (maíz) tienen menor contenido de N en porcentaje por peso seco, lo cual, en calidad de forraje, no es mejor que las plantas C₃ (trigo y triticales).

La relación N:P que se encontró indica que en plantas C₄, a diferencia de las C₃, la concentración de N respecto a la de P disminuye y por esta razón en triticales las relaciones N:P que se encontraron están en el intervalo de 3.5:1 a 5:1 y en trigo de 3:1 a 6:1, mientras que en maíz hubo relaciones N:P en el intervalo de 10:1 a 34:1. Estas diferencias se han atribuido a la concentración de la Ribulosa bifosfato carboxilasa (Brown, 1985) que como proteína soluble

presente en la célula de plantas C_4 está entre 5 y 10%, mientras que en células de plantas C_3 , la enzima citada puede tener una concentración hasta de 60% de las proteínas solubles.

Variación de pH de Solución Nutritiva y su Relación con la Eficiencia Nutricional

Existe en las plantas una absorción preferencial de iones NO_3^- respecto a la forma amoniacal, aunque la absorción de los primeros implica mayor costo metabólico, además, la proporción $NO_3^-:NH_4^+$ utilizada en este estudio es de 6:1 (14% del N total aplicado, está en forma de amonio). De Rijck y Schrevels (1997) sugieren que en una solución nutritiva no debe haber más de 10% de N- NH_4 del total aplicado. Esta característica explica el incremento de pH de las soluciones nutritivas entre 24 y 72 h en todas las especies y variedades estudiadas. Si el pH de una solución nutritiva llega a 8 ó cerca de este valor por una alta absorción de NO_3^- (liberación de OH^-), se induce un sistema amortiguador con base en NH_4^+ y su base conjugada:



Este sistema parece ser más efectivo en los genotipos eficientes pues se asocia con los resultados obtenidos, una rápida tendencia a la neutralidad.

A partir del sexto día de ser aplicada la solución nutritiva, el trigo San Cayetano (+E) mostró una tendencia a acidificarla, mientras que en el trigo Berros (-E) se llegó al décimo día y no se neutralizó el pH de ella (Figura 3).

En los genotipos de triticale, Secano menos eficiente (-E), elevó, en las primeras horas, el pH de la solución nutritiva más que los más eficientes (+E) San Lucas y Lamb-2, pero su capacidad para disminuir el pH posteriormente fue menor que la expresada por los más eficientes (+E); en un pH cercano a la neutralidad, las plantas de los genotipos (+E) expresaron mejor su crecimiento ante una mayor absorción de nutrientes.

Después del sexto día, en todos los genotipos de triticale hubo una tendencia del pH a la neutralidad de la solución nutritiva pero fue más marcada en los más eficientes (+E) hacia el día diez (Figura 3).

En maíz, el Negro tuvo mayor capacidad para elevar el pH a tres días de aplicada la solución nutritiva, pero su disminución o retorno a valores de

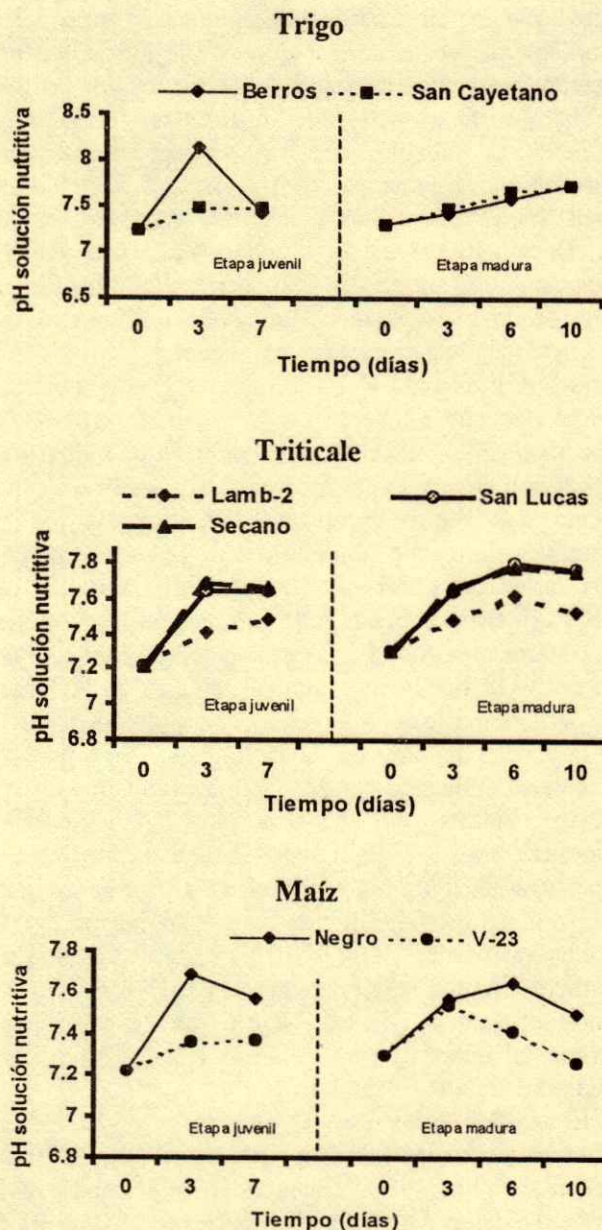


Figura 3. Variación de pH de la solución nutritiva inducida por trigo (San Cayetano), triticale (San Lucas y Lamb-2) y maíz (V-23), más eficientes y trigo (Berros), triticale (Secano) y maíz (Negro) menos eficientes (-E).

neutralidad no se compara con el V-23 que tiende a ser rápido en sus variaciones de pH, tanto en el incremento temprano (tercer día), como en la disminución entre quinto y sexto días.

El Cuadro 6 muestra la variación de pH de la solución nutritiva en la parte final del segundo ensayo (etapa madura), en él se observa que las diferencias entre especies tuvieron alta significancia estadística con una ligera disminución de pH en maíz y un

Cuadro 6. Variación de pH de la solución nutritiva y su coeficiente de correlación con longitud de raíz e índice de eficiencia de fósforo y nitrógeno.

Especie	pH inicial	Variación de pH	Longitud de raíz	Coeficiente de correlación Variación de pH versus		
				Longitud de raíz	IEP	IEN
			cm			
Trigo	7.39	-0.21 b	53.13 c	-0.11 NS	0.72 **	0.55 *
Triticale	7.39	-0.19 b	46.27 b	-0.045 NS	-0.05 NS	0.15 NS
Maíz	7.39	0.09 a	38.66 a	-0.53 *	0.20 NS	0.15 NS

Dentro de columna, letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas. Tukey (DHS), $P \leq 0.05$.

*, ** = significativo al nivel de probabilidad 0.05 y 0.01, respectivamente. NS = no significativo.

IEP y IEN índice de eficiencia para fósforo y nitrógeno, respectivamente ($IE = (Biomasa\ total)^2 / Acumulación\ de\ nutrimento\ total$).

aumento hasta en dos veces en la concentración de iones hidrógeno realizadas por trigo y triticale, si se considera la escala logarítmica de pH.

La variación de pH no parece estar influenciada por la longitud de raíz en los cereales de grano pequeño (trigo y triticale), mientras que el maíz puede presentar alguna relación de su longitud de raíz con la variación en el pH de la solución nutritiva. El trigo fue la única especie que presentó relación significativa de las modificaciones de pH de la solución nutritiva con los índices de eficiencia de P y N, al ser cultivado en solución nutritiva.

Clark (1990) reportó que el N se mueve en el suelo por flujo de masa, de ahí que la longitud de las raíces, y su posible elongación, no es importante para aumentar la absorción de N, sobre todo si hay buen abastecimiento de este nutrimento y también si hay adecuada humedad en el suelo para mover el N hacia la superficie de las raíces. Esto explica la poca relación entre longitud de raíces de trigo y triticale con la variación de pH. Para el maíz esta correlación fue baja pero significativa y con signo negativo ($r^2 = -0.53$).

Existen diversas evidencias experimentales de que la acumulación del N absorbido, respecto a la de P y viceversa, están metabólicamente relacionadas en una interacción positiva. Con los resultados de estas observaciones, se ha comprobado lo anterior, y se verifica también con el valor de correlación altamente significativo entre la acumulación de estos nutrimentos ($r^2 = 0.84$) en las tres especies.

La variación de pH de las soluciones nutritivas utilizadas en este estudio puede ser un indicador de la respuesta que tendrá la raíz de las plantas al desarrollarse en el suelo. De esta manera, puede presumirse que la capacidad de inducir cambios en pH de la solución influye sobre la eficiencia nutrimental

de las plantas. Así, el trigo (San Cayetano), los genotipos de triticale (Lamb-2 y San Lucas) y el maíz (V-23) más eficientes tienen una mayor capacidad amortiguadora de pH que los menos eficientes, lo que les permite propiciar una mejor condición fisicoquímica de su ambiente para permitir una mejor absorción nutrimental, lo cual se refleja en la acumulación y distribución de los nutrimentos entre raíz y vástago.

CONCLUSIONES

- Las variedades de trigo más eficientes (+E) extraen hasta 100% más N y P que las menos eficientes (-E); en los genotipos de triticale, la separación de más eficientes y menos eficientes fue menos clara debido, quizá, a su mayor base genética; y en los genotipos de maíz es claro que los híbridos, de menor base genética, tuvieron la menor eficiencia nutrimental, respecto a los criollos y variedades estudiadas.

- Las plantas de maíz (C_4) tienen menor porcentaje por peso seco de N que las plantas C_3 , dado que la relación N:P encontrada indica que en plantas C_4 a diferencia de las C_3 (triticale y trigo), la concentración de N respecto a la de P, disminuye.

- La eficiencia nutrimental entre triticale (C_3) y maíz (C_4) tuvo un comportamiento distinto. En plantas C_3 , la diferencia de eficiencia nutrimental se debe más a la alta producción de biomasa que a la diferencia en acumulación de N y P, mientras que en C_4 fue al contrario.

- Los genotipos que tuvieron mayor capacidad amortiguadora de los cambios de pH en solución nutritiva fueron los que se mostraron más eficientes: trigo (San Cayetano), los genotipos de triticale (Lamb-2 y San Lucas) y el maíz (V-23).

- Todos los índices de eficiencia que se utilizaron permiten distinguir diferencias entre genotipos de una misma especie y clasificarlos como más eficientes y menos eficientes.

LITERATURA CITADA

- Baligar, V.C., G.U.E. Pitta, E.E.G. Gama, R.E. Schaffert, A.F. de C. Bahía-Filho y R.B. Clark. 1997. Soil acidity effects on nutrient use efficiency in exotic maize genotypes. *J. Plant Nutr.* 192: 9-13.
- Brown, R.H. 1985. Growth of C₃ y C₄ grasses under low N levels. *Crop Sci.* 25: 954-957.
- Bushuk, L. y E.N. Larter. 1980. Triticale: Production, chemistry, and technology. pp. 115-157. *In: Y. Pomeranz (ed.). Am. Assoc. Cereal Chemist. St. Paul, MN.*
- Clark, R.B. 1990. Physiology of cereals for mineral nutrient uptake, use and efficiency. pp. 131-210. *In: V.C. Baligar y R.R. Duncan (eds.). Crops as enhancers of nutrient use. Academic Press. San Diego, CA.*
- De Rijck, G. y E. Schrevens. 1997. pH influenced by the elemental composition of nutrient solutions. *J. Plant Nutr.* 20: 911-923.
- Fageria, N.K. y V.C. Baligar. 1997. Phosphorus-use efficiency by corn genotypes. *J. Plant Nutr.* 20 (10): 1267-1277.
- Furlani, C.A.M. y U.J. Filho, A. 1990. Eficiência na absorcao e na utilização de fósforo em solução nutritiva. *Bragantia (Campinas)* 49: 413-423.
- Jones, G., G. Blair y R. Jessop. 1989. Phosphorus efficiency in wheat: A useful selection criterion. *Field Crops Res.* 21: 113-120.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. London, UK.
- Rao, I.M., M.A. Ayarza. y R Garcia. 1995. Adaptative attributes of tropical forage species to acid soils. I. Differences in plant growth, nutrient acquisition and nutrient utilization among C₄ grasses and C₃ legumes. *J. Plant Nutr.* 18: 2135-2155.
- Soon, Y.K. 1992. Differential response of wheat genotypes to phosphorus in acid soils. *J. Plant Nutr.* 15: 513-526.

ADAPTACION Y SELECCION DE MICROORGANISMOS AUTOCTONOS EN MEDIOS DE CULTIVOS ENRIQUECIDOS CON PETROLEO CRUDO

Adaptation and Selection of Autochthonous Microorganisms in Culture Media Enriched with Crude Petroleum

María del Carmen Rivera-Cruz¹, Ronald Ferrera-Cerrato², Víctor Volke Haller²,
Refugio Rodríguez Vázquez³ y Luis Fernández Linares⁴

RESUMEN

Los resultados que se presentan en el presente trabajo se refieren a la versatilidad adaptativa y de tolerancia de 46 hongos y 34 cepas de bacterias autóctonas de la rizósfera de los pastos alemán (*Echinochloa polystachya*) y cabezón (*Paspalum virgatum*) establecidos en Gleysols, receptores de derrames recientes y crónicos de petróleo crudo y aguas aceitosas en el estado de Tabasco. La evaluación sucesiva se realizó en laboratorio, durante tres fases, de hongos y bacterias sembrados en medios sólidos y líquidos enriquecidos con 1% de petróleo tipo Maya como fuente energética. Los microorganismos que presentaron crecimiento abundante en las tres fases fueron: tres cepas de bacterias gramnegativas y los hongos *Aspergillus* sp., *Paecilomyces* sp., *Penicillium* sp. y *Trichoderma* spp. La mayoría procede de la rizósfera del pasto cabezón, expuesto a periodos largos y crónicos de contaminación hasta con 322 841 mg kg⁻¹ de hidrocarburos totales del petróleo. Las bacterias y hongos seleccionados pueden ser una alternativa de biorremediación mediante consorcios microbianos.

Palabras clave: Carbono, crecimiento microbiano, tiempo de generación, bacterias fijadoras de N, *Aspergillus*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Trichoderma*.

¹ Campus Tabasco-Colegio de Postgraduados. Periférico Carlos A. Molina s/n, km 3.5, 86500 H. Cárdenas, Tabasco. Tel. 01 (937) 3722386. (mariari@colpos.colpos.mx)

² Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 35.5, 56230 Montecillo, estado de México.

³ Departamento Biotecnología y Bioingeniería. Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados. Instituto Politécnico Nacional. México, DF.

⁴ Programa de Biotecnología. Instituto Mexicano del Petróleo, México, DF.

Recibido: Octubre de 2000. Aceptado: Mayo de 2002.
Publicado en Terra 20: 423-434.

SUMMARY

The results presented in this work highlight the adaptive versatility and tolerance of 46 fungi and 34 strains of native bacteria of the rhizosphere of the "alemán" grass (*Echinochloa polystachya*) and "cabezón" grass (*Paspalum virgatum*) growing in Gleysols, which have been affected by recent and chronic petroleum spills in the state of Tabasco. Successive evaluations were carried out in laboratory during three phases. The fungi and bacteria were cultured in solid and liquid media enriched with 1% Maya-type petroleum as the energy source. The microorganisms that grew abundantly in the three phases were three strains of gramnegative bacteria and the fungi *Aspergillus* sp., *Paecilomyces* sp., *Penicillium* sp., and *Trichoderma* spp. Most of these are from the rhizosphere of "cabezón" grass exposed to long, chronic periods of pollution with up to 322 841 mg kg⁻¹ of total petroleum hydrocarbons. The bacteria and fungi selected could offer a bioremediation through microbial consortia.

Index words: Carbon, microbial growth, generation time, nitrogen-fixing bacteria, *Aspergillus*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Trichoderma*.

INTRODUCCION

Los derrames de petróleo constituyen una fuente de contaminación del suelo y del agua. Este tipo de contingencias ambientales originan efectos directos en las poblaciones de los microorganismos. La tolerancia microbiana a la presencia de petróleo en el suelo induce la selectividad y la disminución de la diversidad. Los microorganismos, tolerantes a este ambiente de estrés, desarrollan y utilizan respuestas enzimáticas y fisiológicas especializadas (Atlas *et al.*, 1991). Estos atributos propician las fluctuaciones poblacionales de los hongos y bacterias autóctonos y realizan, de manera natural, la degradación química del petróleo presente en el suelo. La biodegradación y

la foto oxidación en los ambientes tropicales encuentran condiciones favorables de temperatura, nutrimentos, concentración de oxígeno y humedad en los edafoambientes, en particular, en la zona de la rizósfera.

El petróleo crudo contiene cientos de compuestos individuales, pero presenta cuatro formas estructurales en función de la solubilidad en solventes orgánicos: compuestos saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos. Los compuestos saturados (C_nH_{2n+2}) agrupan a los alcanos y cicloparafinas; los aromáticos (C_nH_{2n-6}) incluyen a los mono, di y polinucleoaromáticos. Las resinas son agregados con una gran cantidad de estructuras, como: piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfóxidos y aminas; el cuarto grupo son los asfaltenos, que incluyen los agregados de poliaromáticos, ácidos nafténicos, fenoles, ácidos grasos y metaloporfirinas (Leahy y Colwell, 1990).

Se ha demostrado que el crecimiento de los microorganismos requiere de fuentes de carbono derivadas de los hidrocarburos del petróleo. Los compuestos saturados y los aromáticos con uno a cinco anillos bencénicos son utilizados como fuentes energéticas; en cambio, los aromáticos de peso molecular alto (mayor que cinco anillos bencénicos), resinas y asfaltenos son difíciles de degradar por su recalcitrancia (Sugiura *et al.*, 1997).

La selección de bacterias y hongos a través de pruebas sucesivas de crecimiento poblacional en cultivo puro rico en petróleo, es una estrategia eficiente para evaluar la adaptación y sobrevivencia de cepas tolerantes a concentraciones altas de petróleo. Los resultados de las pruebas en laboratorio respaldan la selección de las cepas más tolerantes y adaptadas. El éxito de las etapas subsiguientes, en invernadero y en suelos contaminados en campo, depende de la calidad de la selección y de las condiciones ambientales.

La evaluación sucesiva de los microorganismos que utilizan hidrocarburos derivados del petróleo como fuente de energía, es prioritaria para demostrar la eficiencia de las tecnologías de biorremediación en suelos expuestos a concentraciones tóxicas de petróleo en el suelo. El objetivo en este trabajo fue seleccionar de manera gradual en laboratorio, la respuesta de hongos y bacterias autóctonos capaces de crecer en cultivos puros enriquecidos con petróleo crudo Maya.

MATERIALES Y METODOS

Se colectaron rizósferas de los pastos alemán y cabezón, cultivados en dos suelos influenciados por las instalaciones del campo petrolero La Venta y del Complejo Procesador de Gas La Venta, ubicados al oeste del estado de Tabasco. La rizósfera testigo (sin petróleo) de ambos pastos se colectó en el ejido Hermenegildo Galeana 3a Sección, ubicado en el municipio de Teapa, Tabasco. El método consistió de cuatro etapas: 1) colecta de la rizósfera; 2) evaluación microbiológica de la rizósfera; 3) selección y estabilización de microorganismos en petróleo; 4) análisis estadístico. La Etapa 3 consistió de tres fases sucesivas para bacterias y tres para hongos (Figura 1).

Actividades de Preparación y Materiales Utilizados

El material de vidrio se sometió por 5 h a calor seco ($180\text{ }^\circ\text{C}$); los medios de cultivo, puntillas, petróleo y papel filtro se esterilizaron en olla de presión a 1.3 kg cm^{-2} (Ingraham e Ingraham, 1998). El papel filtro se cortó en cuadros de $1.5 \times 1.5\text{ cm}$ antes de la esterilización. Para la Etapa 2 se utilizaron medios de cultivos complejos para el crecimiento de

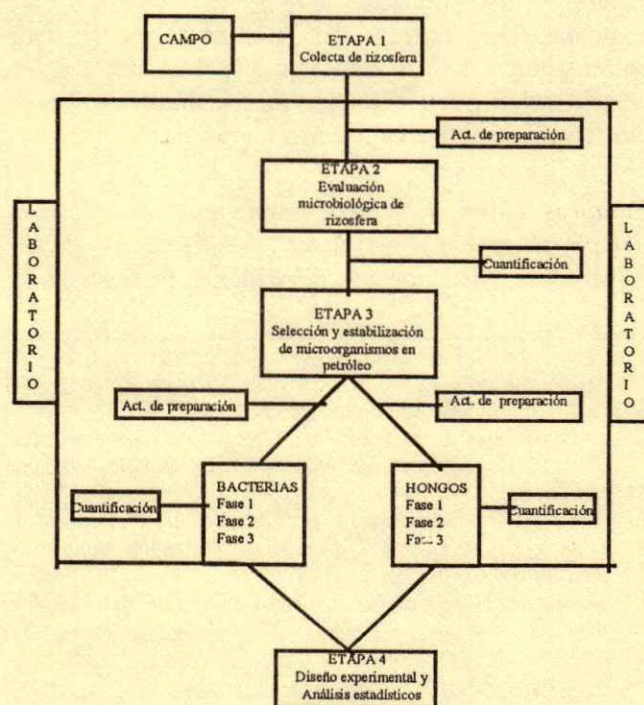


Figura 1. Protocolo del proceso de la investigación.

todo tipo de bacterias y hongos en menor tiempo, agar nutriente (AN) para bacterias y papa dextrosa agar (PDA) para hongos (Madigan *et al.*, 1998). Se utilizaron medios de cultivos selectivos de carbón combinado (CC) para bacterias fijadoras de N de vida libre (Rennie, 1981). Otro medio utilizado fue: carbón combinado modificado (CCM), específico para bacterias fijadoras de N atmosférico tolerantes a petróleo, basado en medio inorgánico + petróleo, el cual constó de dos soluciones. Solución I: K_2HPO_4 (0.8 g L⁻¹), NaCl (0.1 g L⁻¹), NaFeEDTA (0.007 g L⁻¹), $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ (0.25 g L⁻¹), agar, agua destilada, el pH se ajustó a 7.0. Solución II: $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.2 g L⁻¹), $CaCl_2$ (0.06 g L⁻¹), biotina y ácido p-aminobenzoico (10 mg L⁻¹) y petróleo (400 mg L⁻¹) (Rennie, 1981, modif. por R. Ferrera-Cerrato). El medio para hongos celulíticos modificado (HCM) para hongos tolerantes a petróleo, se formó con nutrimentos inorgánicos + petróleo. Este medio consistió de $(NH_4)_2SO_4$ (0.5 g L⁻¹), KH_2PO_4 (1.0 g L⁻¹), KCl (0.5 g L⁻¹), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.2 g L⁻¹), $CaCl_2$ (0.1 g L⁻¹), agar, agua destilada y estreptomycin. El pH se ajustó a 6.2 y se adicionó 1% de petróleo (vol./vol.) [Eggins y Rugh, citados por Johnson y Curl (1972)]. En la primera etapa se utilizó medio sólido, para la segunda y tercera fases de la Etapa 3, medio líquido.

Se utilizó petróleo Maya en la Etapa 2 y en las tres fases para bacterias y hongos de la Etapa 3. Este es un crudo ligero; las características son: gravedad 22.0, viscosidad (cp) a 20 °C 5300; tiene el siguiente contenido de hidrocarburos: C4-C10 = 48.8%, C11-C20 = 36.66%, C21-C30 = 10.26%, C30-C40 = 3.05% y C41-C51 = 1.05% (Duncan *et al.*, 1995).

Para la Etapa 3, en las tres fases de bacterias se utilizó el medio específico para bacterias fijadoras de N tolerantes a petróleo (CCM sólido y líquido); en las tres fases de la Etapa 3 de hongos se utilizó medio inorgánico + petróleo (HCM) sólido y líquido. El petróleo se incorporó como fuente energética al finalizar la siembra de los microorganismos.

Etapas 1. Colecta de rizósfera. Se colectaron núcleos rizosféricos (0 a 30 cm de profundidad) del pasto aloctono alemán [*Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchc.] y del pasto nativo cabezón (*Paspalum virgatum* L.), establecidos en Gleysoles sin influencia petrolera (17°40'58" N y 93°00'45" O); del pasto alemán cultivado en suelo con derrame reciente de petróleo crudo (18°06'52" N y 94°03'18" O) y del pasto nativo cabezón cultivado en suelo con derrame crónico muy contaminado (18° 05' 31" N y

94° 03' 05" O) en el campo petrolero La Venta, estado de Tabasco (Rivera, 2001).

En suelo sin influencia petrolera, se colectaron cuatro núcleos rizosféricos de cada pasto establecidos en Gleysol histi-orthiétrico (abruptico) con 100 mg kg⁻¹ de hidrocarburos totales de petróleo (HTP), atribuibles a la síntesis biogénica y por quema *in situ* de material vegetal (Rivera, 2001). Otros cuatro núcleos se extrajeron del pasto alemán cultivado en un Gleysol histi-dístrico (abruptico) con 115 000 mg kg⁻¹ de HTP derivados de un derrame reciente sucedido durante agosto de 1998; del tercer sitio también se extrajeron cuatro núcleos colectados del pasto cabezón en un Gleysol histi-eutri-sódico (abruptico) con 322 800 mg kg⁻¹ de HTP. Este sitio ha estado expuesto, desde 1963, a la acumulación constante de petróleo crudo procedente de la rotura de oleoductos y del agua aceitosa del Complejo Procesador de Gas La Venta (Rivera, 2001). El muestreo se realizó durante el periodo de sequía (mayo 1999). Los núcleos rizosféricos se introdujeron de manera separada en recipientes de vidrio ámbar esterilizados (Atlas y Bartha, 1981; Boulding, 1994). La conservación de las rizósferas durante la recolección se realizó en hielera a 4 °C, después se almacenó en refrigeración a 4 °C durante una semana.

Etapas 2. Evaluación microbiológica de la rizósfera. Se realizó con el método de conteo viable de células vivas por siembra en superficie (Madigan *et al.*, 1998). Se prepararon diluciones decimales seriadas con 10 g de suelo rizosférico en 90 mL de agua estéril, hasta 1/10⁸ para bacterias y 1/10⁵ para hongos. Se tomó 0.1 mL de cada dilución y se colocó en el centro de la caja Petri con medios de cultivos de agar nutriente (AN), papa dextrosa agar (PDA), carbón combinado (CC), carbón combinado modificado (CCM) y hongos celulíticos modificados (HCM). La dilución se distribuyó con una varilla de vidrio esterilizado en forma de L, se realizó por triplicado. A los cultivos sembrados en medios de CCM y HCM se les agregó cuadro de papel filtro impregnado con petróleo y se adhirió en la pared interior de la tapa de la caja Petri. Las cajas sembradas se invirtieron y se incubaron a 28 °C; los cultivos en AN, PDA y CC por 48 h y los cultivos en CCM y HCM durante 96 h. El conteo de viables se realizó contando unidades formadoras de colonias (UFC) expresadas en la superficie de la caja, luego se convirtió a UFC g⁻¹ de suelo seco. El conteo se realizó con contador de colonias Darkfield Quebec, Cia. American Optical.

Etapa 3. Selección y estabilización de microorganismos en petróleo. Las pruebas de selección de bacterias y hongos degradadores se basaron en la evaluación del crecimiento en medios de cultivos enriquecidos con petróleo. Se utilizaron 34 cepas de bacterias y 46 hongos, resultado de las cuantificaciones microbianas realizadas en núcleos rizosféricos de los pastos alemán y cabezón en suelos contaminados con petróleo y no contaminados. Todas las bacterias son fijadoras de N atmosférico de vida libre y son Gram negativas y móviles. Los hongos pertenecen a los géneros *Trichoderma*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Paecilomyces* y ocho aislados no identificados.

Bacterias. Fase 1. Siembra en medio sólido. Esta consistió en probar el crecimiento de 34 aislados de bacterias previamente preservadas y caracterizadas. La pureza de las bacterias se midió con la técnica de tinción de Gram, se sembraron por triplicado, por el método de siembra por estría en placa (Ingraham e Ingraham, 1998) en medio de carbón combinado modificado. La muestra de la colonia se tomó con una asa esterilizada, se hizo el estriado sobre la superficie del medio de cultivo. El petróleo crudo se impregnó en un cuadro de papel filtro No. 42 y se adhirió en el interior de la tapa de la caja Petri. Las placas se incubaron durante seis días a 28 °C en incubadora de convección mecánica GCA Corp. Se seleccionaron las bacterias que crecieron sobre el medio de cultivo.

Fase 2. Siembra en medio líquido. Las 11 colonias que pasaron la prueba de la Fase 1 se colocaron de manera individual, por triplicado, en contacto directo con la fuente de carbono (petróleo). Se utilizó medio de cultivo mineral líquido estéril y se inoculó con una suspensión de bacterias tolerantes a petróleo en frasco con respiradero de vidrio tapado con algodón (Rivera, 2001). La suspensión de células microbianas se realizó en 5 mL de agua estéril y se vertió en 50 mL de medio de cultivo de carbón combinado modificado con 1% de petróleo. Las células se incubaron a 28 °C durante 45 días en agitación rotatoria a 180 revoluciones por minuto, en una agitadora-incubadora New Brunswick Scientific. La cuantificación se realizó por turbidimetría (Ingraham e Ingraham, 1998), se tomó de referencia la escala de turbidez de McFarland (Campbell *et al.*, 1970), pero con 1% de petróleo. La escala fue en porcentaje de turbidez visual: 0%, cristalino: indica falta de crecimiento o de formación de biomasa microbiana; 25%, medio ligeramente turbio: indica poco crecimiento; 50%, medio turbio: indica crecimiento

intermedio; 75% turbio: representa crecimiento normal; 100% muy turbio: indica crecimiento alto. Esta escala se diseñó y se aplicó porque el petróleo produjo interferencia en el espectrofotómetro. Las observaciones se realizaron a 0, 15, 30 y 45 días.

Fase 3. Cinética de crecimiento. Las cinco bacterias seleccionadas en la Fase 2 se evaluaron en esta fase. Se utilizó el método de cultivo enriquecido (Madigan *et al.*, 1998). Se tomó 1 mL del cultivo bacteriano obtenido en la Fase 2, se introdujo a un frasco con respiradero de vidrio con tapón de algodón y gasa con 50 mL de medio mineral de cultivo nuevo de carbón combinado modificado. Se realizó la incubación a 28 °C durante 12 días (288 h) en agitación rotatoria a 180 revoluciones por minuto, en una agitadora-incubadora New Brunswick Scientific. Se incubó durante 288 h, tiempo de adaptación de las bacterias al crecimiento en sustrato enriquecido con petróleo.

Las evaluaciones del crecimiento se realizaron a 0, 3, 6, 9 y 12 días y se utilizó el método de conteo de células viables por siembra en superficie. Se utilizaron diluciones seriadas con base en 1 mL de sobrenadante en 9 mL de agua estéril hasta $1/10^8$. Las cajas Petri se sembraron por triplicado, se agregó en el centro de la caja 0.1 mL de cada dilución, se distribuyó con una varilla esterilizada de vidrio y se adhirió el cuadro de papel filtro impregnado con petróleo en la pared interior de la tapa de la caja Petri. Las cajas se invirtieron y se incubaron a 28 °C. El conteo de colonias a las 96 h se realizó con el contador Darkfield Quebec, Cia. American Optical, luego se realizó la transformación a UFC mL⁻¹ de sobrenadante.

Hongos. Fase 1. Siembra en medio sólido. La pureza de los hongos se verificó con estudios microscópicos y con la identificación de los géneros. Se realizó la siembra por triplicado en medio sólido HCM. Se tomó con un saca-bocado una rodaja del hongo con estructura reproductiva, se colocó sobre un cuadro de tul (1.5 x 1.5 cm) impregnado con 0.005 g de petróleo Maya y se acomodó sobre el medio de cultivo mineral inorgánico sólido. Se incubó a 28 °C durante cuatro días en incubadora de convección mecánica GCA Corp. La evaluación se realizó a 20 días; el criterio de selección fue el crecimiento del hongo sobre el tul con petróleo.

Fase 2. Siembra en medio líquido. Se utilizaron los hongos seleccionados en la primera fase. Se colocó el micelio del hongo sobre el petróleo en el medio de cultivo líquido. Se introdujo al medio líquido un cuadro de tul (1.5 x 1.5 cm) impregnado con 0.005 g

de petróleo, éste se colocó suspendido en la superficie del cultivo líquido, sobre el tul con petróleo se colocó el micelio del hongo. Se incubó a 28 °C durante 12 días en una incubadora de convección mecánica GCA Corp. Se evaluó de manera visual la cantidad de micelio que creció sobre el cuadro de tul impregnado con petróleo. La escala visual tuvo cinco grados: 0%, el micelio no creció; 25%, el micelio cubrió la cuarta parte de la superficie del tul con petróleo; 50%, el micelio cubrió la mitad del tul; 75%, el micelio cubrió tres cuartas parte de la superficie del tul; 100%, el micelio cubrió totalmente la superficie del tul con petróleo.

Fase 3. Cinética de crecimiento. Se utilizó el método de vertido de suspensión de hongo (5 mL de agua estéril + 50 000 conidios) en 50 mL de medio inorgánico líquido + 1% de petróleo. En esta fase, el hongo estuvo en contacto directo con gotas de petróleo (0.1 mL de petróleo). Se incubó a 28 °C durante 18 días en agitación rotatoria a 180 revoluciones por minuto, en incubadora New Brunswick Scientific. La cinética del crecimiento se realizó con el método de conteo de viables en placa. Se utilizaron diluciones seriadas de 1 mL de sobrenadante en 9 mL de agua estéril, hasta $1/10^5$. Las cajas Petri con medio sólido inorgánico (HCM) + petróleo se sembraron e incubaron de la misma manera que las bacterias de la Etapa 3, Fase 3. Se realizó conteo viable a 0, 9 y 18 días.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Los factores y los niveles se agruparon en los diseños factoriales siguientes: a) para las bacterias en la primera fase se utilizó un 34 x 2 con tres repeticiones (34 aislados y dos niveles de petróleo: 0 y 1%); en la segunda fase de selección un 11 x 2 con tres repeticiones (11 aislados y dos niveles de petróleo: 0 y 1%), en la tercera fase un 5 x 2 con tres repeticiones (cinco aislados y dos niveles de petróleo: 0 y 1%). El análisis estadístico se aplicó a los resultados obtenidos de la tercera fase de selección de bacterias y hongos, se utilizó el programa ANOVA, diferencias de medias de Tukey ($P = 0.05$) entre tratamientos en tres tiempos (0, 6 y 12 días) y correlación (SAS, 1989). El tiempo de generación (G) de las bacterias en la tercera fase se calculó con la fórmula:

$$G = t/\log 3.3 b/B$$

Donde: t = periodo de tiempo, b = número de bacterias al final de un periodo dado, y B = recuento bacteriano en el tiempo 0 (Pelczar y Reid, 1980).

RESULTADOS Y DISCUSION

Microorganismos Rizosféricos en Suelos No Contaminados y Contaminados con Petróleo

Las poblaciones de bacterias totales, bacterias fijadoras de N atmosférico de vida libre, bacterias asimiladoras de N, bacterias degradadoras de petróleo, hongos totales y hongos degradadores de petróleo se encontraron en sistemas rizosféricos de los pastos alemán y cabezón, establecidos en Gleysols contaminados con derrame reciente, en Gleysol con derrame crónico y muy contaminado y en Gleysol no contaminado con petróleo. Los resultados evidenciaron diferencias estadísticas significativas en la media de las poblaciones (Cuadro 1) según el grado de la contaminación y el tipo de pasto.

Las poblaciones de bacterias totales, bacterias fijadoras de N y de hongos totales de la rizósfera del pasto alemán disminuyeron en Gleysol con derrame reciente ($115\ 211\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ de HTP) respecto al Gleysol no contaminado (Cuadro 1). La reducción fue del orden de 6, 20 y 575 veces, respectivamente. La disminución fue mayor en la rizósfera del pasto cabezón colectada en Gleysol con derrame crónico ($322\ 841\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ de HTP), las bacterias asimiladoras de N tuvieron 656 menor población que las existentes en el Gleysol sin contaminación. Atlas *et al.* (1991) mencionaron que las poblaciones microbianas resienten el efecto de la contaminación del suelo, lo cual se manifiesta en la disminución de las poblaciones microbianas originado por el estrés ambiental.

Otros resultados obtenidos fueron el aumento significativo de nueve y 33 veces las poblaciones de las bacterias asimiladoras de N atmosférico y de las bacterias fijadoras degradadoras de petróleo de la rizósfera del pasto alemán cultivado en Gleysol contaminado por derrame reciente respecto a la rizósfera del pasto alemán cultivado en Gleysol no contaminado. La rizósfera del pasto cabezón cultivado en Gleysol histi-eutri-sódico con derrame crónico tuvo nueve veces mayor población de hongos tolerantes a petróleo con respecto al no contaminado (Cuadro 1). Este potencial rizosférico se ha encontrado en otras

Cuadro 1. Unidades formadoras de colonias microbianas en la rizósfera de los pastos alemán y cabezón en suelos de zonas petroleras de Tabasco.

Microflora rizosférica	Pasto alemán		Relación [†]		Pasto cabezón		Relación [†]	
	GL [‡] no contam.	GL contam.	GL no contam.	GL contam.	GL no contam.	GL muy contam.	GL no contam.	GL muy contam.
	UFC (g suelo seco)				UFC (g suelo seco)			
HTPs (mg kg ⁻¹)	100	115 211			100	322 841		
B. [§] totales	37 x 10 ⁴ b [#]	6.6 x 10 ⁴ c	6	1	277 x 10 ⁴ a	0.8 x 10 ⁴ d	346	1
H. [¶] totales	92 x 10 ⁴ a	0.16 x 10 ⁴ c	575	1	6.1 x 10 ⁴ b	0.06 x 10 ⁴ d	102	1
B. asimiladoras de N	5 x 10 ⁴ b	5.5 x 10 ⁴ b	1	1	722 x 10 ⁴ a	1.1 x 10 ⁴ c	656	1
B. fijadoras de N	54 x 10 ⁴ b	2.7 x 10 ⁴ c	20	1	355 x 10 ⁴ a	1.4 x 10 ⁴ c	253	1
B. asimiladoras + petróleo	0.36 x 10 ⁴ c	3.1 x 10 ⁴ b	1	9	180 x 10 ⁴ a	0.4 x 10 ⁴ c	450	1
B. fijadoras de N + petróleo	0.30 x 10 ⁴ c	1.0 x 10 ⁴ b	1	33	420 x 10 ⁴ a	1.3 x 10 ⁴ b	323	1
Hongos + petróleo	0.33 x 10 ⁴ c	0.23 x 10 ⁴ d	1	1	0.55 x 10 ⁴ a	4.7 x 10 ⁴ b	1	9

[†] La relación se obtuvo de la división de la población más grande, como UFC, entre la población más pequeña en la misma hilera.

[‡] Gleysol. [§] Bacterias. [¶] Hongos.

[#] Letras diferentes en sentido horizontal indican medias de tratamientos con diferencias estadísticas significativas (P = 0.05).

regiones petroleras del mundo, por ejemplo en Kuwait (Radwan *et al.*, 1995), con 10% de petróleo en el suelo las bacterias y hongos en sistema rizosférico de plantas de maíz y tomate tuvieron respectivamente 3.0×10^8 y 8.1×10^8 UFC de bacterias por gramo de raíz fresca.

Las poblaciones de bacterias fijadoras de N y hongos tolerantes a HTP, obtenidos de los sistemas rizosféricos de los pastos alemán y cabezón, pueden considerarse, de acuerdo con Atlas *et al.* (1991), como cepas especializadas y degradadoras de petróleo, porque poseen la capacidad de multiplicarse en suelos con concentraciones altas de petróleo. Estas bacterias y hongos son importantes por el potencial genético que han desarrollado para el uso del petróleo como fuente de carbono y energía en los procesos metabólicos. Las ventajas de estos microorganismos son para la descontaminación de suelos.

Características de Bacterias y Hongos Degradadores de Petróleo Aislados de las Rizósferas de los Pastos Alemán y Cabezón

Las características morfológicas de las 34 cepas de bacterias fijadoras de N atmosférico de vida libre tolerantes a petróleo son heterogéneas, 27 cepas se localizaron en la rizósfera del pasto cabezón y siete en la rizósfera del pasto alemán. Las bacterias tuvieron morfología colonial diversa, desde colonias del tipo puntiforme, circulares y alargadas. El estudio microscópico mostró formas redondas individuales y en grupos, bacilares y cocobacilos, Gram negativas y móviles, márgenes lisos e irregulares, convexas y

planas; de colores transparentes, amarillos, rosadas y blancas.

Los 46 hongos degradadores de petróleo, aislados de las rizósferas del pasto alemán en suelo con derrame reciente y del pasto cabezón en Gleysol con derrame crónico, 18 pertenecen al género *Trichoderma*, 13 al género *Penicillium* sp., seis al *Aspergillus* sp., un *Mucor* sp., un *Paecilomyces* sp. y siete no identificados. Estos resultados coinciden con los obtenidos en otras zonas petroleras. Radwan *et al.* (1995) encontraron hongos de los géneros *Penicillium* sp. y *Fusarium* sp. en el sistema rizosférico del tomate; April *et al.* (2000) identificaron varias especies de los géneros *Aspergillus*, *Gliocladium*, *Penicillium* y *Trichoderma* en pastos en suelos contaminados en el oriente y sureste de Canadá.

Selección y Estabilización de Bacterias en Petróleo

La selección y estabilización de 34 bacterias aisladas en medios de cultivos sólidos enriquecidos con petróleo evidenció que 21 bacterias (62%) crecieron en forma abundante en el medio enriquecido, resultados similares obtuvieron Rosenberg *et al.* (1992) con cepas gramnegativas puras. La sobrevivencia de bacterias puras en esta primera fase de selección en condiciones de laboratorio, sugiere que poseen capacidad para utilizar hidrocarburos alifáticos y aromáticos como donadores de electrones (Madigan *et al.*, 1998), debido a que la fuente de carbono se colocó a unos milímetros de distancia de la superficie del medio de cultivo, en la pared interior de la tapa de la caja Petri.

Las bacterias que crecieron en el medio sólido + petróleo en la segunda fase se sometieron a medios de cultivo líquido enriquecidos con 1% de petróleo crudo Maya. Los resultados obtenidos demostraron mayor rigurosidad en la selección, ya que sólo 11 de las 21 bacterias crecieron en el medio líquido. Al respecto, se ha encontrado que 96% de bacterias aisladas de medios líquidos (lagos) presentan la capacidad de emulsificar hidrocarburos derivados del petróleo (Leahy y Colwell, 1990).

Los aislados de bacterias CT1, CT10, CT11, CT14, CT16, CT20 y CT26 nativas de la rizósfera del pasto cabezón en Gleysol con derrame crónico ($322\ 841\ \text{mg kg}^{-1}$ de HTP), además la bacteria AT4 de la rizósfera de pasto alemán en suelo con derrame reciente ($115\ 211\ \text{mg kg}^{-1}$ de HTP), tuvieron crecimiento logarítmico. La turbidez total (100%) resultó a 30 días en las cepas CT16, CT20 y CT26; las cepas CT1, CT10, CT11, CT14 y CT16 lograron este nivel de turbidez hasta 45 días, otras mostraron menor capacidad de multiplicación (Figura 2). Las cepas más tolerantes y adaptadas fueron la CT20 y la CT26 que desde 30 días alcanzaron 100% de turbidez, la menos adaptada fue la cepa CT17, con 50% de turbidez. Al respecto, Posten y Cooney (1993) afirmaron que la turbidez es un indicador confiable del crecimiento microbiano en condiciones ricas de carbono. Bury y Miller (1993) indicaron que el crecimiento bacteriano está basado en tres mecanismos del metabolismo de sustratos poco solubles: 1) interacción de las células con hidrocarburos disueltos en la fase acuosa, 2) contacto directo de las células con gotas de hidrocarburos, más grandes que las células,

3) interacción de las células con una pseudosolubilización de los hidrocarburos, en donde se acomodan en fracciones más pequeñas que la célula.

Los resultados de la medición de los tiempos de generación por cepa evidenciaron medias de tratamientos con diferencias estadísticas significativas ($P = 0.05$) entre cepas establecidas en sustrato inorgánico con petróleo y sin petróleo (Cuadro 2). Las bacterias inoculadas en medio de cultivo con petróleo requirieron menor tiempo de generación que las mismas bacterias sembradas en medio de cultivo mineral sin petróleo. Esta respuesta demuestra que las cepas CT10, CT11, CT14, CT16 y CT26 utilizan el carbono derivado del petróleo y son incapaces de efectuar crecimiento autotrófico con CO_2 como única fuente de carbono. La cepa que requirió menor tiempo de generación fue la CT16 del Tratamiento 7 con petróleo con 15 h, la misma bacteria pero sin petróleo necesitó 766 h (51 veces más tiempo) para duplicar la población (Cuadro 2). Esta respuesta posiblemente se originó por dos causas: la primera, es que todo ser vivo requiere fuente de carbono para crecer debido a que una célula típica consta de aproximadamente 50% de carbono (Madigan *et al.*, 1998); la segunda, estas cepas son tolerantes y presentan en la estructura celular mecanismos hidrofóbicos que permiten utilizar al petróleo como fuente de carbono y energía (Rosenberg y Ron, 1998). Otras bacterias requieren tiempos prolongados, según la estimación teórica basada en la fórmula de Pelczar y Reid (1980), para alcanzar la duplicación de la población.

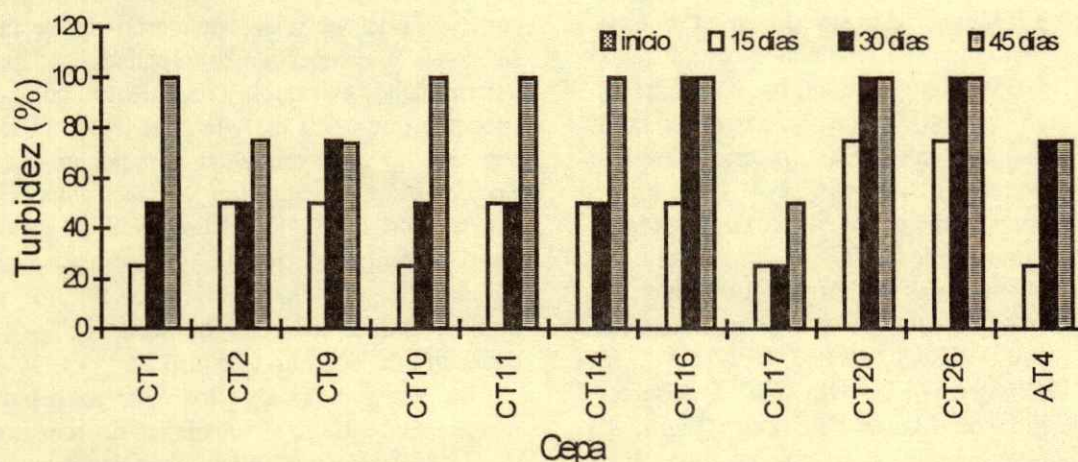


Figura 2. Crecimiento de bacterias fijadoras de N en sustrato inorgánico contaminado con petróleo 1% (segunda fase). A = pasto alemán, C = pasto cabezón, T = Tabasco.

Cuadro 2. Tiempo de generación de cinco cepas de bacterias en sustratos enriquecidos con petróleo y sin petróleo.

Tratamiento	Crecimiento inicial [†]	Crecimiento final [‡]	Tiempo de duración	Tiempo de generación
	----- UFC -----		----- h -----	
T ₁ (CT10 + Petróleo)	8.6 x 10 ³ c [§]	8960.6 x 10 ³ c	288	29
T ₂ (CT10 - Petróleo)	2.9 x 10 ³ d	3.0 x 10 ³ c	288	10 285
T ₃ (CT11 + Petróleo)	6.1 x 10 ³ c	270000 x 10 ³ bc	288	19
T ₄ (CT11 - Petróleo)	6.1 x 10 ³ c	6.8 x 10 ³ c	288	1926
T ₅ (CT14 + Petróleo)	8.6 x 10 ³ c	133.3 x 10 ³ c	288	74
T ₆ (CT14 - Petróleo)	8.3 x 10 ³ c	9.5 x 10 ³ c	288	1533
T ₇ (CT16 + Petróleo)	15.3 x 10 ³ a	10000000 x 10 ³ a	288	15
T ₈ (CT16 - Petróleo)	16.3 x 10 ³ a	21.3 x 10 ³ b	288	766
T ₉ (CT26 + Petróleo)	11.6 x 10 ³ b	943000 x 10 ³ b	288	21
T ₁₀ (CT26 - Petróleo)	11.6 x 10 ³ b	27 x 10 ³ c	288	244

[†] CV = 9.9; r² = 0.97 (P = 0.05). [‡] CV = 26.2; r² = 0.99 (P = 0.05).

[§] Letras diferentes indican medias de tratamientos con diferencias estadísticas (P = 0.05).

Las cepas CT16 y CT26, establecidas en medio mineral enriquecido con petróleo, presentaron durante los cuatro tiempos evaluados el mayor incremento de las UFC (Figura 3b); sin embargo, la cepa CT14 (Figura 3a) establecida en las mismas condiciones tuvo aumento en las UFC durante los cuatro tiempos evaluados y a 216 h disminuyó la cantidad de las UFC. También se observó que las cepas CT10 y CT11 fueron más lentas en el crecimiento, la población aumentó a partir de 144 h (Figura 3a). Asimismo, las cinco cepas de bacterias establecidas en medio de cultivo mineral, sin petróleo como fuente de carbono y energía, no experimentaron crecimiento, se mantuvieron en la fase de latencia (Figuras 3a y 3b). Por esta razón es que no hubo crecimiento y aparecen sobre la misma línea horizontal las cepas C10, C11 y C14 (Figura 3a) y las cepas CT16 y CT26 (Figura 3b).

La comparación estadística de las medias poblacionales de las cepas de bacterias en tres tiempos (inicial, seis y 12 días), destaca que en el tiempo inicial no existieron diferencias estadísticas significativas (P = 0.05), la población fue constante de 10³ UFC mL⁻¹; en cambio a seis días sucedieron diferencias estadísticas entre las medias de los tratamientos. La cepa CT16 tuvo 80x10⁷ UFC mL⁻¹, estadísticamente fue la mejor, el resto de las cepas aumentaron el número de UFC a 10⁴ hasta 10⁶ (Figura 4, letras mayúsculas en barras). Las cepas de bacterias a 12 días que tuvieron mayor significancia estadística fueron CT16 con 10x10⁹ UFC mL⁻¹, en segundo lugar CT26 con 94x10⁷ UFC mL⁻¹ y en tercer lugar la cepa CT11 con 12x10⁷ UFC mL⁻¹ (Figura 4, letras minúsculas en barras). El testigo tuvo una cinética de crecimiento constante en 10³, las cepas no se multiplicaron, esto se originó porque el sustrato

utilizado no se enriqueció con petróleo, que es la fuente de carbono.

Selección y Estabilización de Hongos en Petróleo

La selección y estabilización de 46 hongos aislados en medios de cultivo sólido enriquecido con 1% de petróleo Maya evidenció que 20 hongos (42%) se adaptaron a este sustrato. Los géneros más comunes fueron: *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Penicillium* y *Paecilomyces*; algunos crecieron sobre el petróleo y formaron una red densa de hifas sobre la capa de petróleo y sobre el medio mineral. April *et al.* (2000) aislaron en medio mineral sólido, con petróleo como fuente de carbono, los hongos *Aspergillus niger*, *Gliocladium cf. catenulatum*, *Penicillium cf. janthinellum*, *Penicillium cf.* el más frecuente fue el género *Trichoderma*.

Los hongos puros evaluados en sustrato líquido con 1% de petróleo crecieron en esta fase de selección. La superficie impregnada con petróleo fue determinante para el crecimiento de hongos. Se encontró que a 20 días de establecido el experimento con 15 hongos, incluidos los géneros *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Penicillium* y *Paecilomyces*, cubrieron con micelio 100% de la superficie del sustrato sólido impregnado con petróleo. Asimismo, se identificó que algunos hongos crecieron en el interior de la fase líquida, otros hongos lograron 75% y 50% de cobertura del sustrato (Cuadro 3).

La respuesta de los hongos parece estar relacionada con las afirmaciones de Van Loosdrecht *et al.* (1990), quienes reportaron que las superficies hidrofóbicas son las superficies más activas para la actividad microbiana, siguen una secuencia de cuatro

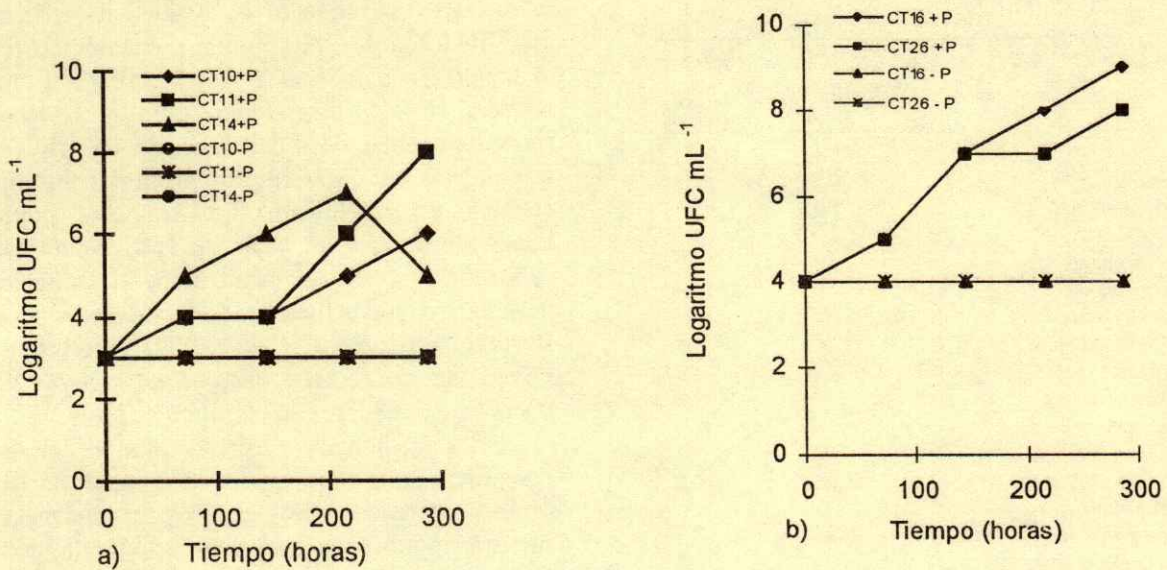


Figura 3. Cinética de crecimiento de cinco cepas de bacterias en medio de cultivo con petróleo y sin petróleo. C = Pasto cabezón; T = Tabasco; P = petróleo. Tiempo inicial. CV = 9.9; $r^2 = 0.97$ ($P = 0.05$). Tiempo seis días CV = 33.8; $r^2 = 0.98$ y tiempo de 12 días. CV = 26; $r^2 = 0.99$ ($P = 0.05$).

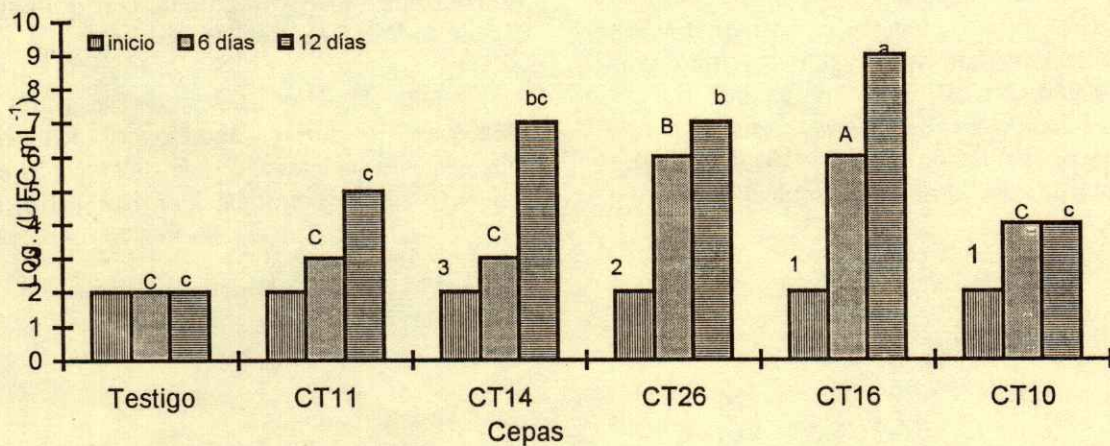


Figura 4. Comparación de crecimiento poblacional entre tratamientos en cada uno de los tres tiempos evaluados (fase tres). C = pasto cabezón; T = Tabasco. Medias de los tratamientos con diferentes números (inicio), letras mayúsculas (seis días) y minúsculas (12 días), tienen diferencias estadísticas ($P = 0.05$).

pasos para lograr establecerse: transporte de células a la superficie, adhesión inicial, fijación a través de polímeros y fibrillas; por último, la colonización.

La confirmación del crecimiento durante la fase en medio líquido permitió seleccionar de manera rigurosa los mejores hongos según la cinética logarítmica de crecimiento. El experimento para

confirmar el crecimiento en medio de cultivo líquido enriquecido con petróleo se realizó introduciendo el petróleo directamente al agua, se formó una interfase petróleo/agua a través de gotitas de petróleo. A nueve días de establecido el experimento, el micelio del hongo rodeó completamente la gota formando esférulas; conforme el tiempo aumentó, el hongo se

Cuadro 3. Crecimiento de hongos sobre sustrato de petróleo crudo y medio inorgánico líquido.

Hongo	Cantidad de micelio sobre petróleo crudo		
	0 días	10 días	20 días
CT1 (<i>Penicillium</i> sp.)	0 [†]	25	50
CT2 (<i>Paecilomyces</i> sp.)	0	50	75
CT3 (<i>Aspergillus</i> sp.)	0	50	50
CT4 (<i>Penicillium</i> sp.)	0	50	75
CT5 (<i>Aspergillus</i> sp.)	0	50	100
CT6 (<i>Trichoderma</i> sp.)	0	0	100
CT7 (<i>Trichoderma</i> sp.)	0	25	50
CT8 (<i>Trichoderma</i> sp.)	0	50	25
CT9 (No identificado)	0	25	25
CT10 (<i>Paecilomyces</i> sp.)	0	50	100
CT11 (<i>Trichoderma</i> sp.)	0	25	50
CT12 (<i>Trichoderma</i> sp.)	0	25	25
CT13 (<i>Penicillium</i> sp.)	0	0	50
CT14 (<i>Aspergillus</i> sp.)	0	25	50
AT1 (<i>Trichoderma</i> sp.)	0	25	75

[†] 0%, micelio escaso que cubre el sustrato; 25%, cantidad de micelio que cubre la cuarta parte del sustrato; 50%, cantidad de micelio que cubre la mitad del sustrato; 75 a 100%, micelio abundante que cubre el sustrato y el micelio tiende a dispersarse en el medio de cultivo.

extendió en la fase líquida, posiblemente sobre la película fina de petróleo, que correspondió a la fase disuelta.

La población de hongos al tiempo inicial varió de 10^1 a 10^2 UFC (Figura 5, números en barras), a nueve días la población aumentó y tuvo diferencias estadísticas significativas entre las medias de los tratamientos. La especie *Trichoderma* 2 fue el hongo que tuvo mayor población con 44×10^3 UFC mL^{-1} (Figura 5, barras con letras mayúsculas). El hongo

Trichoderma 1 de la rizósfera del pasto cabezón tuvo mayor crecimiento a 18 días, fue el mejor con 29×10^5 UFC mL^{-1} , la segunda población correspondió al hongo *Trichoderma* 2 con 22×10^4 UFC mL^{-1} , los hongos *Aspergillus*, *Penicillium* y *Paecilomyces* formaron poblaciones del orden de 10^4 UFC mL^{-1} . El tratamiento testigo formó población constante en la cinética de crecimiento, posiblemente porque este hongo desde que se aisló de la rizósfera del pasto cabezón se adaptó al medio mineral enriquecido con petróleo como fuente de carbono y energía. Resultados de April *et al.* (2000) reportaron que los hongos de los géneros *Penicillium* y *Aspergillus* son buenos degradadores de petróleo.

Estos hongos presentaron el mismo comportamiento que en la fase anterior, formaron esferulas alrededor del petróleo. La tendencia natural fue transportarse a una fase sólida, la adhesión y finalmente la multiplicación. La gota de petróleo fue el área de colonización inicial de los hongos. Al respecto, existen reportes que mencionan que la gota de petróleo insoluble en agua es el centro de oxidación de los hidrocarburos, empezando en este lugar la descomposición y dispersión de las gotitas (Madigan *et al.*, 1998).

Microorganismos Autóctonos con Potencial para Crecer en Petróleo

Durante las tres fases de selección, algunos hongos y bacterias autóctonos demostraron la capacidad de adaptación y de crecimiento en medios sólidos y líquidos enriquecidos con petróleo como

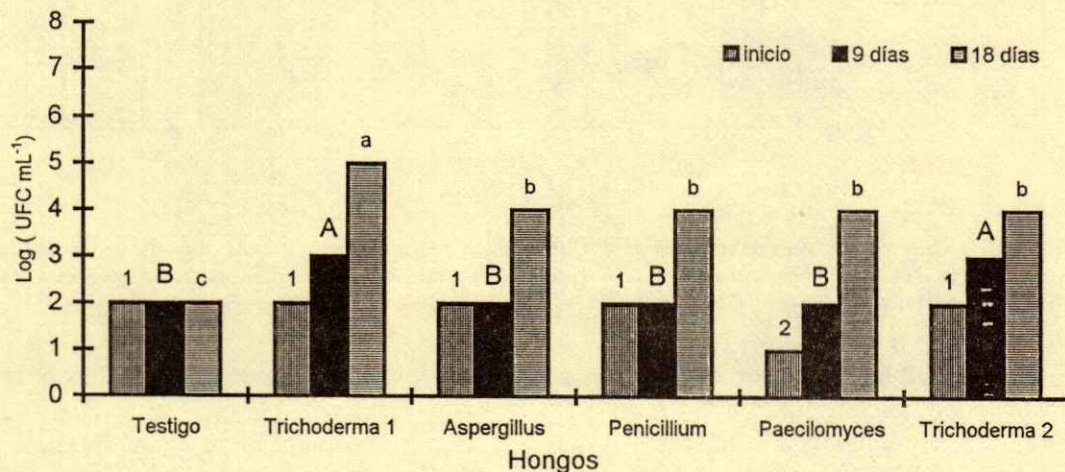


Figura 5. Crecimiento de hongos en medio inorgánico con petróleo crudo en tres tiempos. Medias de tratamientos con los mismos números (inicio), letras mayúsculas (nueve días) y minúsculas (18 días) tienen diferencias significativas ($P = 0.05$).

Cuadro 4. Microorganismos autóctonos que utilizan petróleo para su crecimiento.

Cepa	Población	Tiempo de generación
	UFC mL ⁻¹	h
Bacterias		
CT16	10 x 10 ⁹ a [†]	15
CT11	12 x 10 ⁷ bc	19
CT26	10 x 10 ⁹ a	21
Hongos		
<i>Trichoderma</i> sp 1	29 x 10 ⁵ a	44
<i>Trichoderma</i> sp 2	32 x 10 ⁴ b	55
<i>Aspergillus</i> sp	18 x 10 ⁴ b	65
<i>Penicillium</i> sp	24 x 10 ⁴ b	67
<i>Paecilomyces</i> sp	30 x 10 ³ c	52

[†]Medias con la misma letra en columna son estadísticamente iguales (P = 0.05). La comparación de medias se realizó dentro de bacterias y dentro de hongos.

fuelle de carbono y energía. Los microorganismos seleccionados con potencial para crecer en petróleo fueron ocho: tres colonias de bacterias: CT11, CT26 y CT16, y cinco especies de hongos: *Trichoderma* 1, *Trichoderma* 2, *Aspergillus*, *Penicillium* y *Paecilomyces* (Cuadro 4).

Estos microorganismos posiblemente son oxidadores de hidrocarburos y deben poseer en la membrana un grupo específico de oxigenasa, asociado con la producción de agentes de superficie que son compuestos que tienen una fracción hidrofílica y una hidrofóbica, propiedad que reduce la tensión superficial del medio acuoso por lo que los hidrocarburos aumentan su solubilidad (Rosenberg y Ron, 1998).

CONCLUSIONES

- Las poblaciones microbianas rizosféricas del pasto alemán se afectaron por el petróleo acumulado en el suelo. La población de hongos totales disminuyó hasta 575 veces, también disminuyeron las poblaciones de bacterias fijadoras de N y de bacterias totales. Se encontraron en el suelo contaminado con petróleo poblaciones grandes de bacterias asimiladoras y fijadoras de N.

- La dinámica de los microorganismos rizosféricos del pasto cabezón, establecidos en Gleysol histi-eutri-sódico (abruptico), tuvo cambios importantes. La disminución drástica se encontró en las poblaciones de bacterias asimiladoras que se redujeron 654 veces. Las poblaciones de hongos fueron mayores hasta nueve veces en el Gleysol histi-eutri-sódico muy

contaminado con petróleo que en Gleysol histi-orthiéutrico no contaminado.

- La selección realizada en tres fases sucesivas en medios sólidos y líquidos permitió la selección de tres colonias de bacterias a partir de 34 colonias aisladas; y cinco hongos de 46 aislados. Los microorganismos autóctonos de regiones petroleras fueron sensibles a las tres fases de evaluación y selección en medios sólidos y líquidos enriquecidos con 1% de petróleo Maya.

- Tres colonias de bacterias y cinco de hongos (dos *Trichoderma*, un *Aspergillus*, un *Penicillium* y un *Paecilomyces*) tuvieron capacidad de adaptación y crecimiento en cultivo puro con petróleo como fuente de carbono y energía. La mayoría se aisló de la rizósfera del pasto cabezón establecido en Gleysol histi-eutri-sódico fuertemente contaminado desde 1963.

- Las tres bacterias y los cinco hongos seleccionados poseen potencial de degradación si se les integra en consorcios para pasarlos a la etapa de invernadero e introducirlos en sistemas rizosféricos y en suelo nativo de regiones petroleras de donde son originarios.

- Los ocho microorganismos seleccionados son considerados aptos para utilizarlos en pruebas de invernadero que permitan generar tecnologías de biorremediación y fitorremediación para zonas petroleras impactadas.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al CONACYT y al IMP por las becas otorgadas para realizar los estudios de postgrado. Este trabajo formó parte del Proyecto FIES 97-09-VI del Instituto Mexicano del Petróleo.

LITERATURA CITADA

- April, T.M., J.M. Foght y R.S. Currah. 2000. Hydrocarbon-degrading filamentous fungi isolated from flare pit soils in northern and western Canada. *Can. J. Microbiol.* 46: 38-49.
- Atlas, M.R. y R. Bartha. 1981. *Microbial ecology: Fundamentals and applications*. Addison-Wesley, Menlo Park, CA.
- Atlas, M.R., A. Horowitz, M. Krichevsky y K.A. Bej. 1991. Response of microbial population to environmental disturbance. *Microbiol. Ecol.* 22: 249-256.
- Boulding, J.R. 1994. *Description and sampling of contaminated soils. A field guide*. 2nd ed. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Bury, J.S. y C.A. Miller. 1993. Effect of micellar solubilization on biodegradation rate of hydrocarbons. *Environ. Sci. Technol.* 27: 104-110.

- Campbell, H.D., S.G. Justine, E.C. Natalie y H.S. Peite. 1970. *Methods in immunology*. Benjamin. New York.
- Duncan, K., E. Levetin, P. Buck, H. Wells, E. Jennings, S. Hettenbach, S. Bailey, K. Lawlor, K. Sublette, J.B. Fisher y T. Todd. 1995. Long-term effects of crude oil contamination and bioremediation in soil ecosystem. Tulsa, OK.
- Ingraham, L.J. y A.C. Ingraham. 1998. *Introducción a la microbiología*. Vol. 1. Trad. al español por J.J. Nieto, E. Quesada y A. Ventosa. Reverté. Barcelona, España.
- Johnson, F.L. y A.E. Curl. 1972. *Methods for research and the ecology of soil-borne plant pathogens*. Burgess. Minneapolis, MN.
- Leahy, J.G. y R.R. Colwell. 1990. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiol. Rev.* 54: 305-315.
- Madigan, M.T., J.M. Martinko y J. Parker. 1998. *Brock. Biología de los microorganismos*. 8a. ed. rev. y aum. Trad. al español por M. Gacto F., I. García A., T. González V., R. Guerrero M. y M. Sánchez P. Prentice Hall Iberia. Madrid, España.
- Pelczar, M.J. y R.D. Reid. 1980. *Microbiología*. Trad. al español por L. Hontañón y C. McGraw-Hill. México, DF.
- Posten, C.H. y C.L. Cooney. 1993. Growth of microorganisms. pp. 111-162. *In: H. Sahm (ed.)*. *Biotechnology*. Vol. 1. Biological fundamentals. 2nd ed. VCH. Weinheim, Federal Republic Germany.
- Radwan, S., N. Sorkhoh e I. El-Nemr. 1995. Oil biodegradation around roots. *Nature (London)* 376: 302.
- Rennie, R.J. 1981. A single medium for the isolation of acetylene-reducing (dinitrogen-fixing) bacteria from soils. *Can. J. Microbiol.* 27: 8-14.
- Rivera, C.M. del C. 2001. Microorganismos rizosféricos de los pastos alemán [*Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchc.] y cabezón (*Paspalum virgatum* L.) en la degradación del petróleo crudo y el benzo(a)pireno. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.
- Rosenberg, E., R. Legmann, A. Kushmao R. Taube, E. Adler y E.Z. Ron. 1992. Petroleum bioremediation- a multiphase problem. *Biodegradation* 3: 337-350.
- Rosenberg, E. y E.Z. Ron. 1998. Bioremediation of petroleum contamination. pp. 100-124. *In: R.L. Crawford y D.L. Crawford (eds.)*. *Bioremediation: Principles and applications*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- SAS Institute Inc. 1989. SAS/IML* Software: Usage and Reference, version 6, 1st ed. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Sugiura, K., M. Ishihara, T. Shimauchi y S. Harayama. 1997. Physicochemical properties and biodegradability of crude oil. *Environ. Sci. Technol.* 31: 45-51.
- Van Loosdrich, M.C.M., J. Lyklema, W. Norde y A.J.B. Zehnder. 1990. Influence of interfaces on microbial activity. *Microbiol. Rev.* 54: 75-87.

RESPUESTA DEL PAPAYO VARIEDAD MARADOL, A TRES ESPACIAMIENTOS DE DRENAJE SUBSUPERFICIAL

Response of the Papaya Tree Variety Maradol at Three Subsurface Drainage Spacing Distances

Agrícola Arrieta Rivera¹ y Eugenio Carrillo Avila²

RESUMEN

Los mantos freáticos someros en las zonas tropicales húmedas ocasionan problemas agrícolas por exceso de humedad a los cultivos. Para resolver esta problemática, el drenaje parcelario juega un papel preponderante, principalmente en el caso de cultivos sensibles a dichos excesos. El estudio se realizó en el área experimental del Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados, ubicada en la Chontalpa, Tabasco. El objetivo fue estudiar el comportamiento fenológico del papayo (*Carica papaya* L.), variedad Maradol, establecido en una parcela con tres espaciamientos de drenaje subsuperficial (EDS), que se consideraron como tratamientos. En cada tratamiento se eligieron al azar 20 plantas en las que se evaluaron las variables: altura de planta (AP), diámetro del tallo (DT), número de hojas (NH), número de frutos (NF), peso de frutos (PF), altura a los primeros frutos (APF), días a la floración (DF), rendimiento (R), longitud de raíz (LR) y plantas perdidas por acame (PPA). Se evaluaron también las variables hídricas profundidad del nivel freático (PNF), potencial de presión del agua en el suelo (h) y contenido de humedad en el perfil (θ), así como las variables meteorológicas: temperatura del aire (T) y horas brillo sol (HBS). Como resultado del análisis de varianza se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos en las variables: AP, NH, DT, DF y NF; en el EDS de 10 m se encontraron los valores más elevados en las variables R, AP, DT, NF y PF. En este EDS, las plantas presentaron un valor mayor en la variable LR, menos PPA, así como el valor más bajo en las variables DF y APF. El valor de θ fue mayor en el

EDS de 40 m, factor que retrasó el desarrollo del cultivo, ocasionando el acame de plantas en producción hasta de 88.4% en dicho EDS. Se realizaron regresiones múltiples para relacionar a R con las variables independientes: PNF, h , T y HBS, determinándose los valores que optimizan el rendimiento del cultivo. Se obtuvo un rendimiento promedio de 60.4 t ha⁻¹ en el EDS de 10 m, que superó en 50% a la media regional.

Palabras clave: Carica papaya L., espaciamiento de drenaje, profundidad del manto freático, potencial de presión, rendimiento.

SUMMARY

Shallow water tables in the humid tropical areas cause agricultural problems because of excess moisture in the soil profile where roots develop. To solve these problems, drainage plays a determining role, mainly in the case of crops that are sensitive to these excesses. The study was carried out in the experimental area of the Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, located in the Chontalpa region, Tabasco. The objective was to analyze the phenological behavior of papaya (*Carica papaya* L.), variety Maradol, established in a plot with three subsurface drain spacing distances (EDS), which were considered treatments. In each treatment, 20 plants were chosen randomly. Variables such as plant height (AP), stem diameter (DT), number of leaves (NH), number of fruits (NF), weight of fruits (PF), height of the first fruits (APF), days to flowering (DF), yield (R), length of roots (LR) and plants lost by "acame" (fall) (PPA) were evaluated. Hydrologic and meteorological variables such as depth of the groundwater level (PNF), soil water pressure potential (h), moisture content in the soil profile (θ), air temperature (T), and hours of sunlight (HBS) were also evaluated. As result of the analysis of variance, there were highly significant differences among treatments in the following variables: AP, NH, DT, DF, and NF. The highest values in the variables R,

¹ Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Texcoco, estado de México. (aarrieta@colpos.colpos.mx)

² Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. Periférico Carlos A. Molina s/n., 86500 H. Cárdenas, Tabasco. (ceugenio@colpos.colpos.mx)

AP, DT, NF and PF were observed in EDS of 10 m. In the same EDS, the plants also showed a higher value in the LR variable, a lower PPA value, as well as the lowest value in the DF and APF variables. The higher θ value occurred in EDS of 40 m, acting as a factor that delayed the development of the crop, causing up to 88.4% of the total population of plants to fall during the productive stage. Multiple regressions were done to relate the variable R to the independent variables such as PNF, h , T and HBS, and to determine the values for optimal crop yield. An average yield of 60.4 t ha⁻¹ was obtained in the EDS of 10 m, surpassing the average regional yield by 50%.

Index words: Carica papaya L, drainage spacing, water table level, soil water pressure potential, yield

INTRODUCCION

En México y el mundo, la papaya (*Carica papaya* L.) se considera un frutal de importancia económica, por su alta rentabilidad y la gran aceptación de sus frutos (PROFRUTA, 1999). En la actualidad, México ocupa el séptimo lugar mundial en superficie establecida con este cultivo con 19 694 ha; se obtienen un rendimiento promedio nacional de 29.2 t ha⁻¹ y una producción de 575 558 t año⁻¹; el estado de Veracruz es el mayor productor, con 55.80% de la producción total nacional (FAO, 2000). En el estado de Tabasco, se empezó a incrementar la superficie cultivada con este frutal a partir de 1992 y se cultivan actualmente 2250 ha con las variedades Mamey y Maradol, siendo esta última la de mayor aceptación en el mercado nacional y mundial por su sabor y duración en anaquel (INEGI, 2000).

El cultivo de papaya se desarrolla de manera adecuada en lugares donde la precipitación oscila de 1500 a 2000 mm anuales (Samson, 1991). En general, las plantas jóvenes requieren más agua que las plantas adultas, pero una sequía prolongada durante la etapa productiva ocasiona caída de hojas, reduce el amarre de frutos y afecta el rendimiento (Mandujano, 1993). Yee *et al.* (1980), después de realizar investigaciones por tres años en la Isla de Kauai, Hawai, recomendaron aplicar 14 L de agua planta⁻¹ d⁻¹ durante periodos húmedos y 27 a 36 L de agua planta⁻¹ d⁻¹ durante periodos secos. Awada *et al.* (1979) recomendaron que la cantidad de agua que debe aplicarse al cultivo debe ser 1.3 veces la evaporación medida en el tanque evaporimetro tipo "A" en la

semana anterior. En cambio, León *et al.* (1985) reportaron que la evapotranspiración del cultivo del papayo en Veracruz es equivalente a 75-80% de la evaporación medida en el tanque tipo "A".

Por la consistencia herbácea del tallo del papayo, es una planta bastante perjudicada por los vientos, dado que el tallo debe de soportar el gran peso de los frutos. Cuando se presentan vientos huracanados, los tallos se quiebran o acaman y los frutos se caen, lo que, como consecuencia, reduce el rendimiento (De los Santos *et al.*, 1997).

Por otra parte, el exceso de humedad afecta sensiblemente al papayo. Mellado (2001) indicó que con periodos de lluvia prolongados la planta sufre amarillamiento, los tallos se tornan largos y delgados, el rendimiento es menor, la recolección de frutos se torna difícil y disminuye la producción de látex. De los Santos *et al.* (1997) señalaron que el suelo en el que se establezca el cultivo debe tener buena estructura y drenaje, para evitar encharcamientos de más de 48 h que pueden causar daños severos a la planta y, en ocasiones, la muerte. Medina *et al.* (1980) y Nakasone (1980) indicaron que el papayo no tolera más de 48 h de encharcamientos en el espesor radical.

El estado de Tabasco dispone de agua de lluvia durante casi todo el año, con una precipitación pluvial que varía desde 1800 hasta más de 4000 mm anuales, por lo que es común encontrar suelos con problemas de drenaje, en los que la producción de papaya se restringe. El alto contenido de humedad en el suelo ocasiona retrasos en el desarrollo durante las diferentes etapas fenológicas de las plantas de papaya, además de ocasionar daños como: pudrición de raíces, caída de flores y frutos e inclusive la pérdida total de las plantas, lo que implica la pérdida de la cosecha. Para resolver esta problemática, los productores construyen drenes superficiales que, en ocasiones, no resuelven totalmente los problemas ocasionados por los excesos de humedad. Como alternativa, en el Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados, se construyó un módulo de drenaje subsuperficial entubado, con la finalidad de evaluar la eficiencia de este tipo de drenaje en cultivos importantes para la región (Palacios *et al.*, 1993).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento fenológico del papayo establecido en un lote con tres espaciamientos de drenaje subsuperficial, para determinar el posible efecto que el espaciamiento de drenaje tiene sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de papayo. La hipótesis estadística utilizada fue Ho: Los diferentes

espaciamientos de drenaje subsuperficial no tienen efecto sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de papayo, contra la hipótesis alternativa Ha: Al menos un espaciamiento de drenaje tiene un efecto sobre esas variables.

MATERIALES Y METODOS

Ubicación del Sitio Experimental y Clima

La investigación se realizó en el módulo de drenaje subsuperficial del Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados, en la Chontalpa, Tabasco, localizado en el km 100 de la carretera Coatzacoalcos-Cárdenas, a 17°49'03" N y 93°23'03" O, con una altitud de 11 m. El módulo de drenaje subsuperficial consiste en un área compacta que conforman los lotes denominados C-6, C-7, D-5 y D-6, con 15 ha cada uno. La longitud total de los drenes interceptores (tubería de plástico corrugada y ranurada, de 7.5 y 10 cm de diámetro) y colectores (tubería corrugada de 15 y 20 cm de diámetro) instalados es de 13 645 m, con una profundidad de 1.1 a 1.4 m (Palacios *et al.*, 1993). El clima dominante, según la clasificación de Köppen modificado por E. García, es del tipo Am (f) w" (i) g (Nájera *et al.*, 1998), cálido húmedo tropical con lluvias abundantes en verano. La precipitación pluvial y la evaporación media anual oscilan alrededor de 2240 y 1400 mm, respectivamente. La precipitación tiene una distribución temporal bastante irregular y se pueden distinguir a lo largo del año tres épocas con características pluviométricas diferentes: a) época de lluvias, comprendida entre los meses de junio a octubre, en esta época la magnitud e intensidad de la precipitación pluvial son muy elevadas, b) época de "nortes", durante los meses de noviembre a enero, caracterizada por lluvias del tipo ciclónico de baja intensidad y duración prolongada, y c) época de relativa sequía, de febrero a mayo.

Diseño Experimental y Tratamientos

La evaluación de la respuesta del papayo a los espaciamientos de drenaje subsuperficial (EDS) de 10, 20 y 40 m entre drenes, se llevó a cabo en el Lote D-5 del mismo módulo. El área experimental, incluyendo las áreas correspondientes a los tres EDS, consistió de un rectángulo de 280 m de largo por 36 m de ancho, con una densidad poblacional de 2000 plantas, establecidas en los vértices de una cuadrícula a 2 m

entre hileras y 2.5 m entre plantas. Cada espaciamiento de drenaje subsuperficial se consideró como tratamiento. El diseño experimental empleado fue un completamente al azar, por lo que se seleccionaron 20 plantas al azar en cada tratamiento (área con diferente EDS), que se consideraron como unidades experimentales, mismas en las que se evaluaron el comportamiento fenológico, el desarrollo y el rendimiento del cultivo.

Establecimiento del Cultivo

La preparación del terreno consistió en un barbecho cruzado, tres pasos de rastra semipesada, trazo de la plantación y ahoyado. El trasplante de papaya se efectuó el 9 de julio de 1999, siguiendo las recomendaciones técnicas dadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) en la región. Las plantas de papaya de la variedad Maradol se adquirieron en un vivero particular.

Mediciones Realizadas

Variables edáficas. En el centro del área correspondiente a cada tratamiento se excavó un perfil, en el que se determinaron la textura y la densidad aparente del suelo para las profundidades 20, 40, 60, 80 y 100 cm. Estos valores se utilizaron para estimar los valores de la porosidad del suelo a las mismas profundidades.

Variables hídricas

Contenido volumétrico de humedad (θ). En el área central de cada tratamiento se determinó el contenido de humedad del perfil de suelo dos veces por semana, a partir del 11 de noviembre de 1999 y hasta el 30 de octubre de 2000, a cinco profundidades (20, 40, 60, 80 y 100 cm). Los valores se expresaron de manera volumétrica mediante la expresión:

$$\theta = \frac{Psh - Pss}{Pss} \times \frac{D_a}{D} \quad (1)$$

Donde: θ = contenido volumétrico de humedad ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); Psh = peso de la muestra húmeda de suelo (g); Pss = peso de la muestra seca de suelo (g); D_a = densidad aparente del suelo a la profundidad del muestreo (g cm^{-3}); D = densidad del agua (g cm^{-3}), considerada constante e igual a la unidad.

Potencial de presión (*h*). Para determinar el potencial de presión del agua dentro del perfil de suelo (*h*), se instalaron cinco tensiómetros de manómetro en el EDS de 10 m a 20, 40, 60, 80 y 100 cm y en el EDS de 40 m a 60 y 80 cm de profundidad, en la parte central de cada EDS. Las lecturas se observaron diariamente durante el tiempo que tomó el experimento. En el EDS de 20 m no se midió el potencial de presión por no disponer de suficientes tensiómetros, eligiéndose medir sólo los sitios más contrastantes en cuanto a densidad de drenaje.

Profundidad del nivel freático (PNF). Para la determinación de la profundidad del nivel freático (PNF), se instalaron cinco pozos de observación por tratamiento, construidos con tubo de PVC de 2" de diámetro a una profundidad de 3 m, distribuidos en la parte central de cada tratamiento; la lectura se realizó diariamente y durante todo el tiempo que duró el experimento.

Variables Meteorológicas

Precipitación, temperatura (T) y horas brillo sol (HBS). Se tomaron los datos diarios de los registros mensuales de lluvia, de la temperatura promedio diaria (T), así como del total de horas brillo sol diarias (HBS) durante todo el ciclo de estudio, en la estación agrometeorológica del Campus Tabasco.

Variables Fenológicas

Altura de plantas (AP). Esta variable se midió cada dos semanas desde el inicio hasta el término del experimento, con el auxilio de una escalera y un flexómetro. Las medidas se tomaron desde la base del tallo hasta la altura máxima del dosel de las hojas.

Número de hojas (NH). Se determinó contando cada dos semanas el número total de hojas de cada planta durante el periodo de realización del trabajo.

Longitud de raíz (LR). Sólo se determinó en una sola planta por tratamiento, al inicio de la floración y en la cosecha, debido a la necesidad de sacrificar la planta usada en la determinación.

Diámetro de tallo (DT). Se midió con vernier, tomando precaución de medir siempre la misma posición del tallo (10 cm de la superficie del suelo). La determinación se realizó cada dos semanas desde el inicio de la fase reproductiva hasta el final del experimento, del 27 de marzo hasta el 31 de octubre de 2000.

Días a la floración (DF). Se consideró que los días a la floración se alcanzaron en cada tratamiento cuando 80% de las plantas medidas contaban con brotes florales abiertos.

Altura a los primeros frutos (APF). Se determinó cuando se detectaron los primeros frutos con una longitud mínima de 10 cm. Se consideró como APF a la altura promedio de las 20 plantas evaluadas en cada tratamiento.

Número de frutos (NF). A partir del primer fruto cosechado, se contabilizó el número de frutos cosechables por planta en los tres tratamientos. Se consideró como número de frutos por planta al número promedio de frutos determinado en las 20 plantas evaluadas.

Peso de frutos (PF). El peso de frutos para cada tratamiento se consideró como el valor promedio del peso individual de los frutos cosechados en las plantas seleccionadas en cada tratamiento.

Rendimiento (R). Se estimó con base en los valores de NF y PF, considerando la densidad poblacional para determinar el valor de R ($t \text{ ha}^{-1}$) en los tres tratamientos.

Número de plantas perdidas por acame (PPA). Se cuantificó el valor de PPA, de cada uno de los tratamientos, siendo el exceso de humedad el factor que originó mayor afectación.

Análisis estadístico. Se realizó un análisis de varianza del diseño completamente al azar para determinar el posible efecto de los tratamientos sobre las variables fenológicas evaluadas, así como una prueba de comparación múltiple de medias, determinando la diferencia mínima significativa en cada caso con el método propuesto por Tukey ($\alpha = 0.05$), con el uso del programa Statistical Analysis System (SAS, 1996). Además, empleando el mismo programa, se corrieron regresiones múltiples para relacionar a R en cada tratamiento con las variables independientes PNF, T, HBS y *h* a 60 cm de profundidad.

RESULTADOS Y DISCUSION

Clasificación Textural del Suelo

Los porcentajes encontrados de arcilla oscilaron de 28 a 38 y los de arena de 46 a 57 en el área experimental. El suelo del área correspondiente a los Tratamientos T₁ y T₂ (EDS de 10 y 20 m, respectivamente) se clasifica como migajón arcillo arenoso, mientras que el suelo del área

correspondiente al Tratamiento T₃ (EDS de 40 m) se clasifica como arcillo arenoso.

Evolución del Contenido Volumétrico de Humedad (θ)

En el Cuadro 1, se muestran los valores promedio (θ_m) y el coeficiente de variación (CV) de los valores de θ para las cinco profundidades evaluadas en los tres EDS, así como los valores de la porosidad del suelo (P) correspondientes. En este cuadro, se aprecia que en el EDS de 40 m los valores promedio de θ son mayores que en los demás EDS. En este EDS se obtuvo el valor más elevado del CV en la profundidad de 20 cm y los valores más bajos de dicho coeficiente en las profundidades de 80 y 100 cm, para las cuales se determinaron los mayores valores de θ , lo que implica que a dichas profundidades la humedad tomó casi siempre valores elevados. En contraste, en el EDS de 10 m se obtuvieron los menores valores del CV a las profundidades más superficiales (20, 40 y 60 cm), con un contenido de humedad menor. De manera general, los valores más elevados del CV se presentan cerca de la superficie para todos los EDS, debido a que la variación de los valores de θ es mayor, como resultado de los intercambios de humedad suelo-atmósfera, así como de la extracción de agua hecha por las raíces, que se desarrollaron principalmente cerca de la superficie.

Evolución Temporal del Potencial de Presión (h) y de la Profundidad del Nivel Freático (PNF)

En la Figura 1, se ilustra el comportamiento temporal de h (considerado positivo) medido a la

profundidad de 60 cm en los EDS de 10 y 40 m, así como la evolución de la PNF en los tres tratamientos durante el ciclo de desarrollo del cultivo. Nótese la estrecha relación entre los valores de h dentro del perfil y la distribución temporal de la lluvia: durante la época de secas (de febrero a inicio de junio), la magnitud de la lluvia es pequeña, por lo que h aumenta considerablemente en el perfil; en cambio, durante las épocas de lluvia y "nortes", h toma valores cercanos a cero en todo el perfil, como resultado del humedecimiento del suelo ocasionado por las lluvias, lo que es más notorio en el EDS de 40 m. Cabe hacer notar la diferencia en la evolución de h para los EDS de 10 y 40 m: en el EDS de 10 m, h se incrementa mucho más rápidamente, alcanzando pronto la máxima capacidad de medición del tensiómetro para determinar h (de alrededor de 800 cm); en cambio, en el EDS de 40 m, el aumento de h es más lento y alcanza valores menores, lo que indica un mayor contenido de humedad.

Por otra parte, en la Figura 1, también se observa que la profundidad del nivel freático en el área experimental dependió fundamentalmente de la magnitud de la lluvia, observándose una relación estrecha entre ambas variables. En el EDS de 40 m, la PNF alcanza la superficie en la época de "nortes", lo que no ocurrió en los EDS de 10 y 20 m. Cabe mencionar que el desalojo del agua en los EDS de 10 y 20 m es más rápido y la PNF es mayor, mientras que en el espaciamiento de 40 m, el desalojo tiende a ser más lento con PNF menor durante todo el ciclo. Esto ocasionó que en este espaciamiento el nivel freático se mantuviera por varios días más cerca del sistema radical de las plantas, por lo que muchas de ellas se debilitaron y cayeron; más tarde, otras murieron por la inhibición del proceso de respiración. Estas fueron

Cuadro 1. Promedio y coeficiente de variación de los valores de contenido volumétrico de humedad (θ), determinados durante el periodo de estudio, así como valores de porosidad para los diferentes espaciamientos de drenaje en las diferentes profundidades evaluadas.

Profundidad cm	Espaciamiento entre drenes (m)								
	10			20			40		
	θ_m^\dagger	CV	P	θ_m	CV	P	θ_m	CV	P
20	0.254	41.09	0.399	0.216	47.09	0.354	0.228	53.67	0.417
40	0.274	28.34	0.384	0.254	41.09	0.395	0.304	32.11	0.450
60	0.295	35.43	0.402	0.287	36.11	0.439	0.297	37.63	0.477
80	0.309	30.26	0.421	0.295	37.41	0.433	0.319	27.38	0.477
100	0.311	35.66	0.448	0.295	39.87	0.441	0.324	34.21	0.480

[†] θ_m = valor promedio del contenido volumétrico de humedad del suelo (cm³ cm⁻³); CV = coeficiente de variación de los valores de contenido volumétrico de humedad del suelo (%); P = porosidad (cm³ cm⁻³).

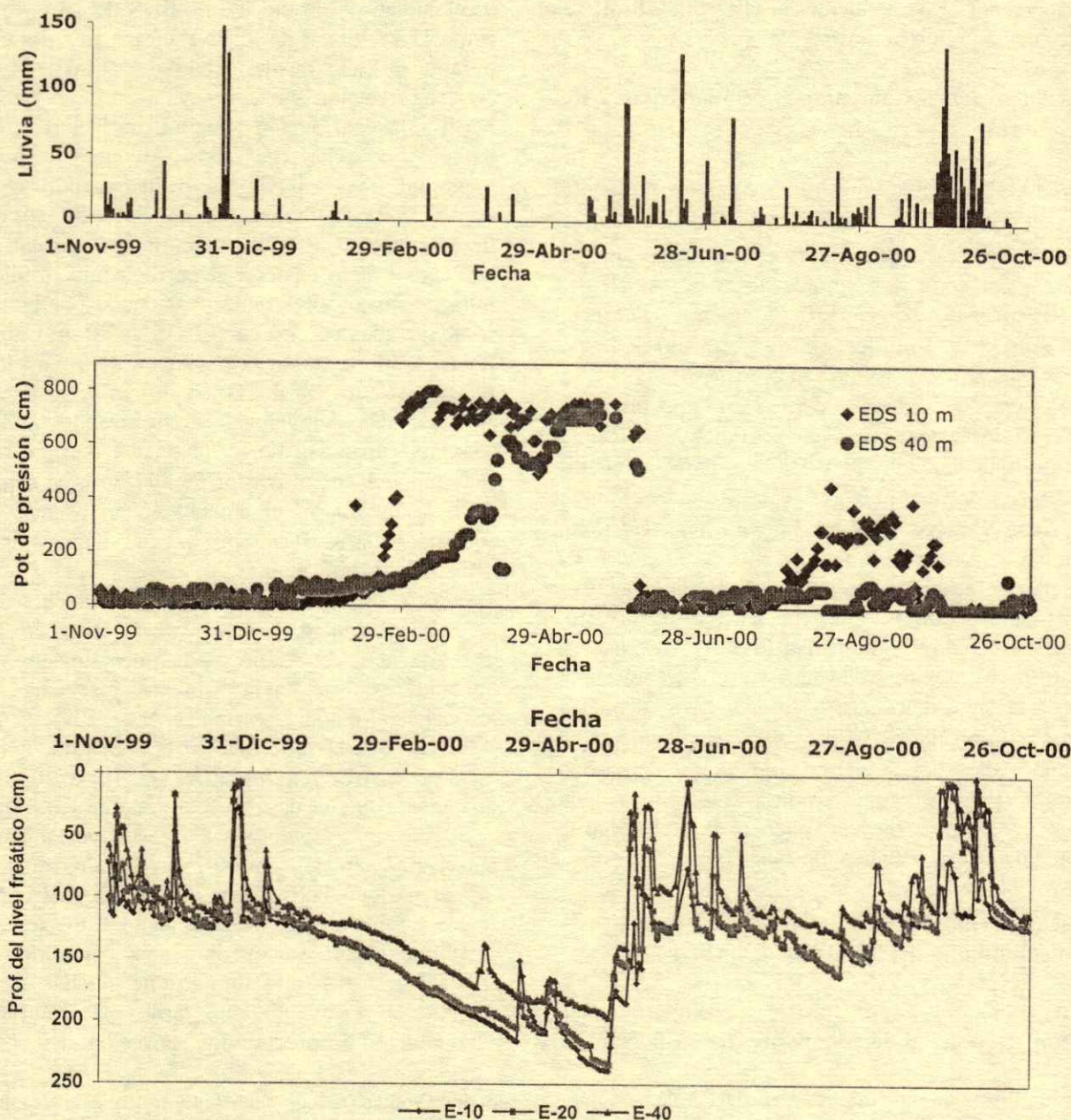


Figura 1. Evolución temporal del potencial de presión (h) a 60 cm de profundidad en los espaciamientos de drenaje subsuperficial (EDS) de 10 y 40 m, y de la profundidad del nivel freático (PNF) en los tres EDS evaluados, como función del aporte de agua por lluvia.

las causas que originaron una pérdida de 88.4% del total de plantas productivas en este último EDS.

Relación entre la Profundidad del Nivel Freático y el Potencial de Presión

En este trabajo, se estudió la relación entre el potencial de presión h y el crecimiento y rendimiento

del cultivo de papaya; sin embargo, h es comúnmente difícil de medir, por lo que una alternativa es determinar la PNF para estimar el valor de h dentro del perfil. La relación entre los valores de h dentro del perfil de suelo y la PNF es dinámica, y ha podido ser modelada empleando la ecuación de Richards (Richards, 1931), que se deriva de la ley de Darcy y de la ecuación de conservación de la masa, y permite

calcular la variación de h como función de la magnitud de los aportes de agua en la superficie, de las características hidrodinámicas del perfil de suelo y de la profundidad del manto freático.

Aunque se sabe que una simple regresión no resuelve el problema de relacionar ambas variables, se considera que si provee de información suficiente para estimar con cierta precisión el valor de h con base en el valor de la PNF. Esta alternativa es además bastante simple, comparada con la ecuación de Richards, por lo que en la Figura 2 se presentan las ecuaciones de regresión encontradas para relacionar a h a 60 cm de profundidad con la PNF en el área experimental en los EDS de 10 y 40 m. En dicha figura puede observarse que al aumentar la PNF, el valor de h a 60 cm de profundidad aumenta de manera exponencial, y que ambas variables se relacionan de manera aceptable. Sin embargo, debe aclararse que las ecuaciones de regresión presentadas sólo son válidas para el tipo de suelo de la parcela experimental. Cabe señalar que la relación entre h a 60 cm de profundidad y PNF es muy similar en ambos EDS, a pesar de que existen ligeras diferencias en cuanto a la textura y porosidad del perfil entre los EDS.

Resultados del Análisis Estadístico

En el Cuadro 2, se muestran los resultados del análisis de varianza del diseño completamente al azar

para las variables fenológicas evaluadas en los tres tratamientos, incluyendo los valores del coeficiente de variación (CV) y la diferencia mínima significativa (DMS) para cada variable (Tukey $\alpha = 0.05$). En casi todas las variables se encontraron diferencias altamente significativas entre tratamientos, siendo el Tratamiento T₁ en el que se observaron las mejores características agronómicas en el cultivo como respuesta al mejor desalojo del agua excedente.

Altura de plantas. El valor presentado para AP en el Cuadro 2 para cada tratamiento corresponde al valor promedio durante todo el ciclo de desarrollo del cultivo. Las plantas fueron significativamente más altas en el Tratamiento T₁ (EDS 10 m) y menores en el Tratamiento T₃ (EDS 40 m), en el que se presentaron los menores valores de h y los más elevados de θ en el perfil de suelo, lo que indica que el exceso de humedad reduce el crecimiento del cultivo y limita la talla final de las plantas. Cabe señalar que Mandujano (1993) reportó, para la variedad Maradol, una altura promedio no mayor que 2 m. En el presente trabajo, se encontró una AP final promedio superior a la que reporta este autor en el EDS de 10 m, de 2.19 m en promedio, lo que indica que el cultivo responde favorablemente al menor espaciamiento entre drenes. El coeficiente de variación encontrado para esta variable fue muy pequeño (3.37%), lo que indica que la respuesta del

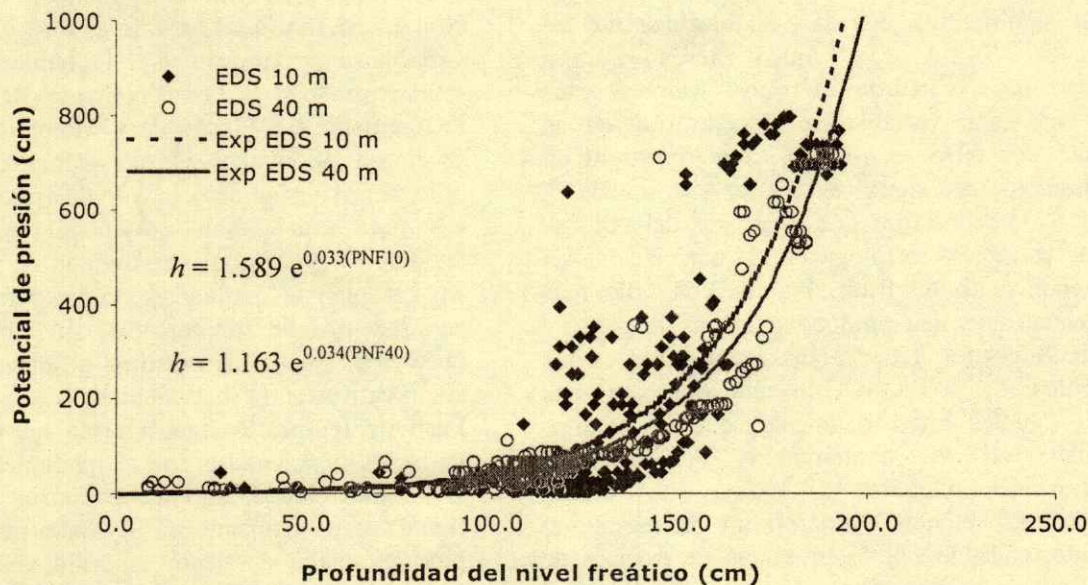


Figura 2. Relación observada entre el potencial de presión del agua en el suelo a 60 cm de profundidad en el perfil (h) y la profundidad del manto freático (PNF) en los espaciamientos entre drenes de 10 y 40 m.

Cuadro 2. Resultados del análisis de varianza de las variables fenológicas.

Variable	Medias de tratamientos			Media general	CV	DMS	p>F
	T ₁ (EDS 10 m) [†]	T ₂ (EDS 20 m)	T ₃ (EDS 40 m)				
					%		
AP [‡] (cm)	161.06 a [§]	149.22 b	141.0 c	150.43	3.37	4.28	0.0001** [#]
NH	34.40 a	28.75 a	23.1 c	28.41	22.55	4.94	0.0001**
DT (cm)	8.51 a	7.24 b	6.7 b	7.48	17.77	1.03	0.0003**
DF (días)	159.65 b	180.50 b	221.5 a	187.25	18.15	26.20	0.0001**
APF (cm)	62.52 a	63.02 a	68.87 a	64.80	29.36	14.67	0.5 NS
NF	18.65 a	12.30 b	10.75 b	13.90	54.66	5.85	0.0052**
PF (kg)	1.60 a	1.34 a	0.79 b	1.25	39.73	0.38	0.0216*
R (t ha ⁻¹)	60.4	32.9	12.2				
PPA (%)	9.1	58.8	88.4				

[†]EDS = espaciamiento de drenaje subsuperficial; [‡]AP = altura de plantas (cm); NH = número de hojas; DT = diámetro del tallo (cm); DF = días a la floración; APF = altura a los primeros frutos (cm); NF = número de frutos; PF = peso del fruto (kg); R = rendimiento de frutos (t ha⁻¹); PPA = plantas perdidas por acame (%); [§] Medias con la misma letra en fila son estadísticamente iguales, Tukey ($\alpha = 0.05$); [#]*** Altamente significativo, * Significativo y NS = no significativo.

cultivo a los diferentes tratamientos (EDS) fue muy homogénea.

Número de hojas. Los Tratamientos T₁ y T₂ presentaron un NH significativamente mayor que el Tratamiento T₃, como respuesta al mejor desalojo del agua excedente. El menor NH en este último tratamiento se debe a los efectos negativos provocados en esta variable por el exceso de humedad. El valor de NH determinado en el Tratamiento T₁ es similar al encontrado por Mandujano (1993), quien señaló que una planta sana tiene más de 30 hojas fotosintéticamente activas.

Diámetro del tallo. Las plantas establecidas en el Tratamiento T₁ mostraron diferencia estadística altamente significativa con las establecidas en los Tratamientos T₂ y T₃, que fueron iguales estadísticamente (Cuadro 2). Los valores más elevados en esta variable se encontraron en el tratamiento con EDS más corto, como respuesta al mejor desalojo del agua excedente. Mosqueda y Molina (1973) reportaron que el grosor del tallo es una de las variables morfológicas más correlacionadas con el rendimiento de fruta. Plantas con tallo más grueso tienden a ser más productivas y más precoces.

Días a la floración. Las plantas establecidas en los Tratamientos T₁ y T₂ tuvieron una floración más temprana (iguales estadísticamente) que las plantas establecidas en el Tratamiento T₃ [diferente estadísticamente (Cuadro 2)]. En este último tratamiento, las plantas sufrieron un retraso en el crecimiento, causado por la presencia de excesos de humedad en varios periodos, además de que el nivel freático se mantuvo más cerca de la superficie durante la etapa de floración.

Altura a los primeros frutos. No se encontraron diferencias estadísticas significativas en los tratamientos evaluados, sin embargo, en el Tratamiento T₃ se encontraron los valores más altos en esta variable (Cuadro 2), lo que indica que los excesos de humedad en el suelo afectan también el proceso de floración y aparición de frutos, lo que reduce el intervalo de tiempo durante el cual la plantación es productiva. Esta característica se ha recomendado como criterio de selección para ganar en precocidad en el amarre de frutos (Giacometti, 1987), aunque en el presente estudio las diferencias en los valores de la APF se debieron al efecto de los tratamientos y no a factores genéticos.

Número de frutos. Los valores más elevados en esta variable se encontraron en el Tratamiento T₁, diferente estadísticamente de T₂ y T₃ (Cuadro 2). Esto confirma lo reportado por Mosqueda y Molina (1973), quienes señalaron que plantas con un diámetro más grande de tallo tienen un número mayor de frutos. El valor del CV para esta variable (54.66%) es muy elevado, resultado de una gran variabilidad en el valor de NF en las plantas evaluadas, tanto entre tratamientos como dentro de tratamientos, sin embargo, ello no obstó para que se encontraran diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

Peso de frutos. De igual forma que en el resto de variables relacionadas con el rendimiento del cultivo, el PF más elevado se encontró en el Tratamiento T₁ (igual estadísticamente a T₂). Cabe mencionar que el peso promedio del fruto reportado para la variedad Maradol varía de 1.5 a 2.5 kg (PROFRUTA, 1999), lo que coincide con los resultados obtenidos en los Tratamientos T₁ y T₂. En el Tratamiento T₃, (diferente

estadísticamente de T_1 y T_2), el PF fue significativamente menor, como resultado del efecto negativo de los excesos de humedad sobre el desarrollo del cultivo.

Rendimiento. El comportamiento del rendimiento (R) del cultivo tiene una tendencia clara: a mayor EDS menor R, como consecuencia de la menor capacidad del sistema de drenaje para desalojar los excesos de agua. En el Tratamiento T_1 , se obtuvo el mayor valor de R, de 60.4 t ha^{-1} , que sobrepasa en 50% al rendimiento medio regional (de 40 t ha^{-1}), lo que es un indicador claro de las bondades que el drenaje parcelario subsuperficial correctamente diseñado tiene. Por otra parte, a consecuencia de la sensibilidad del papayo a los excesos de humedad, los resultados encontrados en el Tratamiento T_3 indican que en este caso el drenaje subsuperficial no fue suficiente para resolver los problemas ocasionados al cultivo por la humedad excesiva, encontrándose un valor de R muy por debajo del promedio regional, de apenas 12.2 t ha^{-1} . En el Tratamiento T_2 , R (32.9 t ha^{-1}) tampoco superó al valor promedio para la zona.

Plantas perdidas por acame. No se realizó un análisis de varianza de esta variable, debido a que no se contemplaron repeticiones de áreas cultivadas con el mismo EDS. Sin embargo, los resultados encontrados refuerzan las conclusiones que pueden derivarse del análisis del resto de variables evaluadas: el EDS de 40 m (T_3) fue insuficiente para resolver los problemas ocasionados por el exceso de humedad en el cultivo; en este EDS, 88.4% de las plantas establecidas murieron por ahogamiento, o bien, por la presencia de enfermedades fungosas en la raíz (cabe señalar que no se registraron plantas afectadas con virosis). En cambio, en el EDS de 10 m (T_1), sólo 9.1% de las plantas se perdieron por esas causas.

Longitud de raíz. En esta variable no se realizó el análisis de varianza, debido a la falta de repeticiones; sin embargo, las raíces mostraron una mayor longitud máxima en el Tratamiento T_1 (2.18 m) y menor en el Tratamiento T_3 (0.6 m) como respuesta a un menor valor de θ en el EDS de 10 m, mientras que en el Tratamiento T_2 , las raíces alcanzaron una longitud máxima de 1.58 m. Este comportamiento coincide con lo mencionado por Samson (1991), quien indicó que el sistema radical en suelos húmedos se mantiene cerca de la superficie. Mirafuentes *et al.* (2000) indicaron que en suelos profundos y bien drenados, las raíces llegan a alcanzar hasta 1.80 m de longitud.

Estimación del Rendimiento

Con base en los valores del número y peso promedio de frutos en cada tratamiento para las diferentes fechas de medición, se estimaron los valores del rendimiento (R) del cultivo en cada fecha. Con estos datos, se realizaron regresiones múltiples para relacionar a R con las variables independientes h a 60 cm de profundidad en el perfil, PNF, temperatura promedio (T) y horas brillo sol (HBS). Para realizar las regresiones, se calcularon valores promedio de las variables independientes h , NF, T y HBS para los periodos de tiempo entre cada estimación de R (fecha de medición de frutos), con el objetivo de disponer de igual número de observaciones en la variable dependiente y en las variables independientes. Se realizaron dos tipos de regresiones: 1) Relacionando al valor de R promedio con las variables: PNF promedio, T promedio y HBS promedio. 2) Relacionando al valor de R promedio con las variables: h promedio, T promedio y HBS promedio. En ambos casos, se probaron los efectos lineales y cuadráticos, así como las interacciones entre las variables independientes sobre el rendimiento, seleccionando los modelos encontrados con base en los valores del coeficiente de determinación y en los niveles de significancia de los parámetros de cada modelo. Esta operación se realizó utilizando la opción FORWARD BACKWARD STEPWISE de SAS (SAS, 1996), que selecciona los coeficientes del modelo que superan un nivel de significancia previamente establecido ($\alpha = 0.1$).

Estimación del rendimiento promedio con base en las variables independientes potencial de presión, temperatura y horas brillo sol. El potencial de presión h sólo se determinó en los espaciamientos de drenaje de 10 y 40 m, por lo que sólo se obtuvieron modelos para dichos espaciamientos. Para la obtención de los modelos, se consideró a los valores de h positivos, aunque en realidad representan una presión inferior a la atmosférica (negativa). Los modelos seleccionados se muestran a continuación, en los que no se incluyen los efectos lineales ni cuadráticos ni las interacciones que resultaron no significativos:

EDS de 10 m:

$$R = 41.97 + 0.173 h - 0.000198 h^2 + 0.1561 T^2 - 0.0057 h*T - 0.1521 T*HBS + 0.00044 h*T*HBS \quad (2)$$

Coeficiente de determinación $r^2 = 0.9493$

EDS de 40 m:

$$R = -679.42 + 55.36 T + 0.000128 h^2 - 1.2149 T^2 - 1.497 HBS^2 - 0.013 h * HBS + 0.8763 T * HBS \quad (3)$$

Coefficiente de determinación $r^2 = 0.9065$

Estimación del rendimiento promedio con base en las variables independientes profundidad del nivel freático, temperatura y horas brillo sol. Los modelos seleccionados se muestran a continuación. De la misma forma que en el caso anterior, no se incluyen los efectos lineales ni cuadráticos ni las interacciones que resultaron no significativos:

EDS de 10 m:

$$R = -380.3947 + 1.8316 NF + 12.212 T - 0.00547 NF^2 + 0.094602 NF * HBS - 0.00520795 NF * T * HBS \quad (4)$$

Coefficiente de determinación $r^2 = 0.9356$

EDS de 20 m:

$$R = -123.1 + 0.9448 NF + 3.941 T - 0.0036198 NF^2 - 0.076635 T * HBS \quad (5)$$

Coefficiente de determinación $r^2 = 0.8492$

EDS de 40 m:

$$R = -139.8536 + 0.7832 NF + 4.7362 T + 6.7407 HBS - 0.00341 NF^2 - 0.3422 T * HBS \quad (6)$$

Coefficiente de determinación $r^2 = 0.835$

En la Figura 3, se muestra la comparación entre el valor de R promedio medido y el R promedio estimado con los modelos (4), (5) y (6), en la que

puede observarse que, en general, el valor de R promedio puede estimarse aceptablemente bien como función de las variables independientes, lo que es un indicador claro de la influencia que éstas tienen sobre el rendimiento del cultivo. Sin embargo, debe aclararse que los modelos encontrados son válidos sólo para los rangos de variación de las variables independientes utilizados en su determinación, así como para el tipo de suelo de la parcela. En el Cuadro 3, se incluyen los rangos de variación de las variables independientes para los cuales fueron determinados los modelos de regresión.

Valores de las Variables Independientes que Maximizan el Rendimiento Promedio

A partir de los modelos de regresión, pueden determinarse los valores de las variables independientes que hacen máximo el rendimiento. El modelo general empleado fue:

$$R = a + bx + cy + dz + ex^2 + fy^2 + gz^2 + hxy + ixz + jyz + kxyz \quad (7)$$

Donde: R = rendimiento del cultivo ($t \text{ ha}^{-1}$); x, y, z = variables independientes; a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k = coeficientes del modelo.

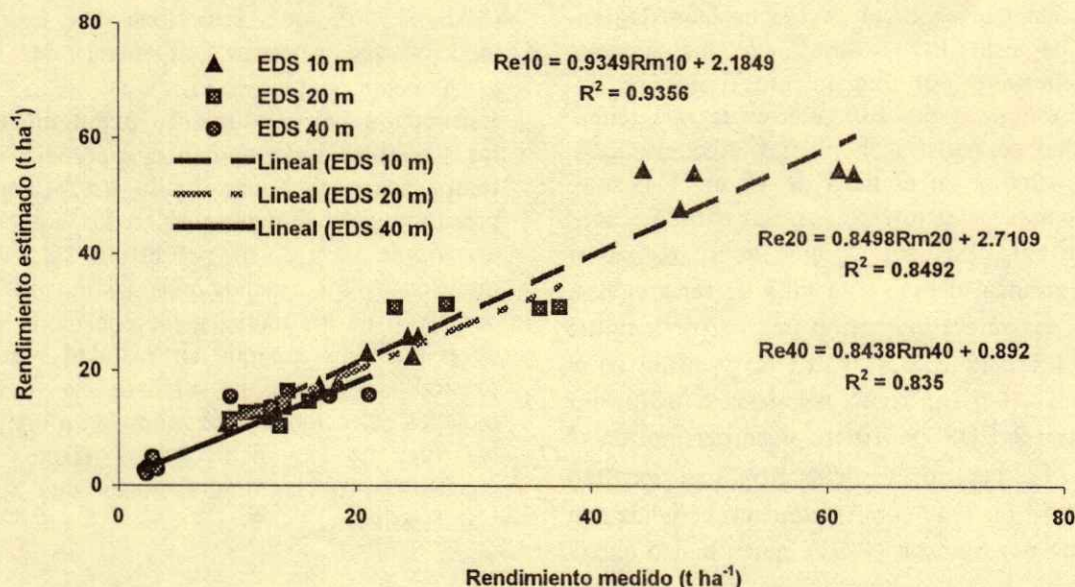


Figura 3. Comparación del rendimiento promedio medido y el rendimiento promedio estimado ($t \text{ ha}^{-1}$) con las expresiones (4), (5) y (6) para los EDS de 10, 20 y 40 m. Re = rendimiento estimado; Rm = rendimiento medido.

Cuadro 3. Rango de variación de las variables independientes en la determinación de los modelos.

Variable	Espaciamiento de drenaje	Rango de variación	
		Valor máximo	Valor mínimo
	m		
Potencial de presión <i>h</i> (cm)	10	740.27	12.21
	40	711.8	10.97
Prof. del nivel freático PNF (cm)	10	226.62	101.36
	20	218.18	60.49
	40	187.87	45.74
Temperatura promedio T (°C)		29.79	21.18
Horas brillo sol HBS		9.06	3.85

Calculando las derivadas parciales respecto de las variables independientes e igualando a cero, se obtiene un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas:

$$\frac{\partial R}{\partial x} = b + 2ex + hy + iz + kyz = 0 \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial R}{\partial y} = c + 2fy + hx + jz + kxz = 0 \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial R}{\partial z} = d + 2gz + ix + jy + kxy = 0 \quad (7.3)$$

La solución de las Ecuaciones 7.1 a 7.3 permite determinar el punto para el cual R tiene un valor extremo. Para verificar que en ese punto la función tiene un máximo, los valores de los menores principales de la matriz Hesiana, formada por las segundas derivadas parciales y derivadas cruzadas de la función respecto a las variables independientes,

deben alternar en signo, iniciando con un valor negativo (Apostol, 1972).

En el Cuadro 4, se muestran los valores encontrados de las variables independientes para el punto de localización del valor extremo de R. En dicho cuadro se incluyen también los valores de los menores principales de la matriz Hesiana, calculados para los modelos seleccionados. Cuando el valor de los menores principales no alterna en signo iniciando con un valor negativo, el punto determinado mediante el proceso de optimización no corresponde a un máximo, sino a un "punto de silla"; en este caso, el valor máximo se localiza en uno de los extremos del dominio de la función. En el Cuadro 5, se muestran los valores de las variables independientes que hacen máximo el rendimiento del cultivo de papaya, indicando en cada caso si el máximo se presentó en el punto determinado por optimización, o en el extremo del dominio (considerándose como dominio de la función al rango de variación observado de las variables independientes).

Con la hipótesis de que los modelos seleccionados permiten estimar aceptablemente el rendimiento del cultivo, la papaya tendrá un rendimiento máximo si las variables independientes se encuentran en los valores optimizados indicados en el Cuadro 5, es decir, si la temperatura media del aire es de 24.94 °C, se tienen 5.98 h de brillo sol y el potencial de presión del agua en el suelo a 60 cm de profundidad es de 436.87 cm, o bien, la profundidad del nivel freático es de 167.4 cm. Este último resultado en los valores de *h* y PNF optimizados en los modelos, coincide con la relación empírica para ambas variables para el suelo del área experimental, representada por las expresiones ilustradas en la Figura 2. Este último

Cuadro 4. Solución del sistema de Ecuaciones 7.1 a 7.3 y valor de los menores principales para los modelos seleccionados.

Variables independientes	Esp. entre drenes	Solución del sistema de ecuaciones 7.1 a 7.3.			Valor de los menores principales			Observaciones
		<i>h</i> [†]	T	HBS	M1	M2	M3	
	m	cm	°C					
<i>h</i> , T y HBS	10	436.87	0.00	7.00	3.9E-4	-5.9E-4	6.4E-7	Punto de silla
	40	303.72	24.94	5.98	2.6E-4	-6.2E-4	2.0E-3	Punto de silla
		PNF	T	HBS	M1	M2	M3	
		cm	°C					
PNF, T y HBS	10	167.42	18.16	14.00	1.1E-2	-5.0E-3	8.0E-3	Punto de silla
	20	130.50	0.00	7.50	7.0E-3	0.00	4.3E-5	Punto de silla
	40	114.83	19.69	13.84	7.0E-3	0.00	8.0E-4	Punto de silla

[†] *h* = potencial de presión del agua en el suelo (cm); T = temperatura del aire (°C); HBS = horas brillo sol diarias; PNF = profundidad del manto freático a partir de la superficie del suelo (cm).

Cuadro 5. Valores de las variables independientes que maximizan el rendimiento del cultivo de papaya.

Variables independientes	Esp. entre drenes	Valor de las variables independientes			Rendimiento máximo
		<i>h</i>	T	HBS	
	m	cm	°C		t ha ⁻¹
<i>h</i> , T y HBS	10	436.87 [†]	29.79 [†]	9.06 [‡]	70.99
	40	711.80 [†]	24.94 [†]	5.98 [†]	32.26
		Nf	T	HBS	
		cm	°C		
PNF, T y HBS	10	167.42 [†]	29.79 [†]	3.85 [§]	97.70
	20	130.50 [†]	29.79 [†]	3.85 [§]	47.16
	40	114.83 [†]	29.79 [†]	3.85 [§]	32.91

[†] identifica a los valores optimizados mediante la solución de las Ecuaciones 7.1 a 7.3; [‡] identifica al extremo máximo; [§] identifica al extremo mínimo de variación observado de las variables.

resultado indica que para el suelo del área experimental se requiere mantener la profundidad del nivel freático a 167.4 cm durante el ciclo productivo del cultivo para maximizar su rendimiento; en tipos de suelo diferentes, se requiere determinar la relación entre PNF y *h* en el perfil para definir la profundidad del nivel freático óptima para el cultivo; de ahí la utilidad de definir un potencial de presión óptimo (de 436.87 cm a 60 cm de profundidad), ya que este valor es independiente del tipo de suelo. Los sistemas de drenaje y riego que se implementen para el cultivo deberán asegurar que el valor del potencial de presión no tome valores muy alejados (mayores o menores) del valor óptimo determinado.

CONCLUSIONES

- Se encontraron diferencias estadísticas significativas en todas las variables que caracterizan el crecimiento y rendimiento del cultivo en los diferentes tratamientos (espaciamientos de drenaje) evaluados. El mejor tratamiento fue el correspondiente al espaciamiento de drenaje de 10 m, donde se obtuvo el mayor crecimiento y el más alto rendimiento; fue en éste donde la humedad del suelo fue menor, las plantas mostraron un desarrollo temprano y hubo un mínimo número de plantas acamadas en comparación con los otros dos tratamientos.

- Como resultado del estudio de la respuesta del papayo al régimen hídrico en tres espaciamientos de drenaje subsuperficial, se encontró que el alto contenido de humedad en el suelo retrasa el desarrollo del cultivo y disminuye el rendimiento, además de favorecer el acame de las plantas. En el espaciamiento entre drenes de 40 m, 88.4% de las plantas se acamaron, mientras que en el espaciamiento de 10 m sólo 9.1% de las plantas se perdieron por acame.

- De acuerdo con los modelos obtenidos, se encontró que los valores de la temperatura y horas brillo sol que maximizan el rendimiento del cultivo encontrados fueron de 24.9 °C y 5.98 h, respectivamente, y que el potencial de presión óptimo en el suelo para alcanzar el más alto rendimiento fue de 436.87 cm a 60 cm de profundidad en el perfil, lo que corresponde a una profundidad óptima del nivel freático de 167.42 cm para el tipo de suelo de la parcela.

LITERATURA CITADA

- Apostol, T.M. 1972. Análisis matemático: Introducción moderna al cálculo superior. Editorial Reverté. Barcelona, España.
- Awada, M., I. Wu, R.H. Suehisa y M.M. Pradgett. 1979. Effects of drip irrigation and nitrogen fertilization on vegetative growth, fruit yield, and mineral composition of the petioles and fruits of papaya. Tech. Bull. 103. Hawaii Agric. Exp. Stat. University of Hawaii. Manoa, Hawaii.
- De los Santos R., F., E.N. Becerra, R. Mosqueda, A. Vázquez y A.B. Vargas. 1997. Manual de producción de papaya en el Estado de Veracruz. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Fundación PRODUCE Veracruz. Veracruz, Ver., México.
- FAO. 2000. Datos localizados en Internet. www.apps1.fao.org. 2000.
- Giacometti, D.C. 1987. Papaya breeding. Acta Hort. 196: 53-60.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2000. Anuario Estadístico del Estado de Tabasco. Gobierno del Estado de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.
- León A., R., J.B. Rosas y C.A. Ramírez. 1985. Balance hídrico de *Mangifera indica* L. y *Carica papaya* L. en Veracruz. Resumen de ponencias del primer Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas. Hermosillo, Sonora, México.
- Mandujano B., R.A. 1993. El papayo. Publicación Técnica 1. Facultad de Ciencias Agrícolas, Especialidad de Postgrado en Fruticultura Tropical, Universidad Veracruzana. Tuxpan, Veracruz, México.
- Medina J., C., J.L. García M., E.A. Salomón C., L. Vieira F., O. Ernesto U., N. M. de Figueiredo S., W. do Canto L. 1980. Mamão: Da cultura ao processamento e comercialização. Livroceres LTDA. São Paulo, Brasil.

- Mellado V., A. 2001. Respuesta del papayo (*Carica papaya* L.) al riego por goteo y a la aplicación de N, P y K en fertirriego, en Apatzingán, Michoacán. Tesis de Maestría Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México.
- Mirafuentes H., F., M.A. Escalon A. y R.A. Mandujano B. 2000. El Estado del Arte en el cultivo de papaya en la planicie central del Golfo de México. Memorias 1er Foro SIGOLFO-PRODUCE. Sistema de Investigación del Golfo de México (SIGOLFO)-Fundación PRODUCE Veracruz. Boca del Río, Veracruz, México.
- Mosqueda V., R. y J. Molina G. 1973. Formas sexuales, sus frecuencias y su relación con otras características en *Carica papaya* L. *Agrociencia* 11: 77-83.
- Nájera H., F., O.L. Palacios V. e I. Nikolskii G. 1998. Evaluación económica de un módulo de drenaje subsuperficial en siembras de caña de azúcar y chile jalapeño en el trópico húmedo. *Agrociencia* 32: 209-215.
- Nakasone, H.D.Y. 1980. Práticas culturais nos trópicos com ênfase especial para a cultura do mamoeiro. Livrocerc. Piracicaba (SP), Brasil.
- Palacios V., O., Y. Nikolskii G. y J. Melo A. 1993. Construcción de un módulo de drenaje subterráneo controlado en 60 ha del campo experimental "El Trapecio", CEICADES-CP. Memoria Técnica. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México, México.
- PROFRUTA. 1999. Manual del cultivo de papaya (*Carica papaya* L.). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA). Guatemala, Guatemala.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics* 1: 318-333.
- SAS Institute. 1996. Statistical Analysis System for Windows 6.12. Cary, NC.
- Samson, J.A. 1991. *Fruticultura tropical*. Limusa. México, D.F.
- Yee, W.Y.J., T.T. Sekioka, H.Y. Nakasone, D.K. Ikehara, J.J. Ooka y E.K. Akamine. 1980. Evaluation of papaya line and cultural practices at Moloaa. Island of Kauai, Hawaii. Circular 497. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii. Kauai, Hawaii.

RESPUESTA DE LA COBERTURA RESIDUAL DEL SUELO A LA EROSION HIDRICA Y LA SOSTENIBILIDAD DEL SUELO, EN LADERAS AGRICOLAS

Soil Residue Cover Response to Water Erosion and Soil Sustainability in Hillside Agriculture

L.M. Tapia V.¹, M. Tiscareño L.², J. Salinas R.², M. Velázquez V.², A. Vega P.¹ y H. Guillén A.¹

RESUMEN

La agricultura convencional ha contribuido a amenazar la existencia del lago de Pátzcuaro por la salida de sedimentos de las unidades agrícolas de ladera. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Comparar la labranza de conservación con cobertura del suelo y labranza convencional en relación con el escurrimiento (Q) y salida de sedimentos (S_y) en tierras de ladera; y 2) cuantificar los indicadores de sostenibilidad, biomasa microbiana, materia orgánica y nutrimentos del suelo, para evaluar el efecto de los dos escenarios de manejo en el recurso suelo. El trabajo se efectuó en el periodo de lluvias, de junio a agosto del intervalo 1996-1998, en Ajuno, Michoacán. Los tratamientos evaluados en lotes de escurrimiento fueron: no labranza con 100% de residuo de cosecha sobre el suelo (NT-100) y labranza convencional (CT). Los resultados indican que la protección del suelo por el residuo de cosecha es un factor que reduce Q y S_y en más de 400%. Los indicadores de sostenibilidad del recurso suelo, biomasa microbiana, materia orgánica y nutrimentos fueron superiores en el tratamiento NT-100 con cobertura vegetal que los encontrados en CT. Para reducir Q y S_y a mínimos niveles (< 20 mm y < 0.6 t ha⁻¹, respectivamente) y para incrementar el contenido de biomasa microbiana y materia orgánica en las capas superiores del suelo, debe combinarse la aplicación de no-labranza de suelo y el uso de cubierta residual, de manera conjunta.

Palabras clave: Biomasa microbiana, escurrimiento, labranza de conservación, maíz.

SUMMARY

Conventional agriculture is threatening the existence of Lake Pátzcuaro due to sediment outputs of hillside agriculture. The aims of this paper were 1) To compare conservation tillage with soil cover and conventional tillage in relation to runoff (Q) and sediment yields (S_y) from hillside agriculture and 2) To quantify sustainability indicators such as microbial biomass, organic matter and soil nutrients to evaluate the effect of management practices on soil quality. This work was conducted during the rainy season (from June to August) from 1996 to 1998, in Ajuno, Michoacán, Mexico. Treatments consisted of runoff plots including no tillage with 100% of residue soil cover (NT-100) and conventional tillage (CT). Results indicated that protection of soil by residue is a factor that reduces Q and S_y more than 400%. Soil resource sustainability indicators like microbial biomass, organic matter and nutrients were better in NT with residue soil cover than CT. To reduce Q and S_y to low levels (< 20 mm and < 0.6 t ha⁻¹, respectively) and to increase microbial biomass and organic matter in the soil, no-tillage with residue soil cover should be practiced in hillside agriculture.

Index words: Microbial biomass, runoff, sediment yields, conservation tillage, maize.

INTRODUCCION

El desarrollo de agricultura sostenible es una respuesta a la preocupación por la degradación de los recursos naturales asociada a la actividad agrícola y se deriva del manejo apropiado de suelos, cultivo, nutrimentos, humedad y sinergismos entre los organismos existentes (Altieri, 1994). Un ejemplo de la pérdida de sostenibilidad del recurso suelo es en el sistema de producción predominante en el cultivo del

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental Uruapan. Av. Latinoamericana 1101, 60080 Uruapan, Michoacán.

¹(cefapuru@prodigy.net.mx)

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Centro Nacional de Producción Sostenible. Sandía 135, Col Xangari, Morelia, Michoacán.
(cenapros@infosel.net.mx)

maíz (*Zea mays* L.), de la cuenca del lago de Pátzcuaro, Michoacán, denominado "año y vez" que consiste en cultivar la parcela con labranza convencional (barbecho, rastra, surcado y dos escardas), alternando un año de cultivo con un año de descanso. Los bajos rendimientos tradicionales del maíz (promedio de 800 kg ha⁻¹) no garantizan la satisfacción de las necesidades económicas del productor y su familia, ya que significa un ingreso de \$1040.00 ha⁻¹ año⁻¹ (US \$114.00), además del perjuicio que se produce por la salida de escurrimiento y sedimento de las unidades de producción, la cual puede llegar a 120 Mg ha⁻¹ (Torres, 1990).

La cuenca del lago de Pátzcuaro de manera natural mantuvo por más de 3500 años equilibrio ambiental, a pesar de la topografía accidentada, la posición característica del lago de Pátzcuaro y la población humana (Watts y Bradbury, 1982). La deforestación y subsecuente práctica de la agricultura convencional rompieron el equilibrio hidrológico y propiciaron, cada vez en mayor cantidad, y a medida que la deforestación ha aumentado, la salida de partículas de las parcelas agrícolas, las cuales alimentan parcialmente el azolve que entra al lago. La naturaleza del sistema de producción convencional agrava el problema al ocupar las laderas deforestadas. Por tradición, el productor ha cultivado sus tierras y las que le gana al lago o al bosque y contribuye, consciente o inconscientemente, a que la erosión reduzca la productividad de su tierra, y con ello participa a la reducción del tamaño del lago.

El grado en que un agrosistema aumenta su sostenibilidad depende del manejo agroecológico que optimice los siguientes procesos: 1) disponibilidad y conservación de nutrientes, que dependen del suministro y de la conservación de materia orgánica (MO); 2) conservación de la humedad disponible del suelo para el crecimiento vegetal y control de la erosión; y 3) mantenimiento de fitomasa residual alta como fuente de carbono en el suelo para el aporte de energía y retención de nutrientes (Reijntjes *et al.*, 1992).

La alteración de las condiciones naturales del suelo por prácticas de manejo puede afectar significativamente la producción de cultivos al influir en la distribución vertical de la materia orgánica, la actividad microbiana y la dinámica de nutrientes. La cantidad de residuos de cosecha y el sistema de labranza usado son factores que afectan el contenido de carbono y de nutrientes en el suelo (Salinas *et al.*, 1997). Los indicadores de la calidad del suelo deben

distinguir los efectos de varias prácticas de manejo en el recurso suelo, la materia orgánica es uno de los factores más usados para describir la calidad del suelo y la biomasa microbiana está cercanamente relacionada con el contenido de materia orgánica (Campbell *et al.*, 1991).

La labranza convencional manipula físicamente el suelo en intensidad variable que incluye barbecho, cruza, uno o dos pasos de rastra, surcado y uno o dos cultivos o escardas, su principal característica es la quema o retiro de residuos de cosecha (Velázquez *et al.*, 1997). Labranza de conservación se refiere a la reducción de las operaciones de labranza y la conservación de los residuos de cosecha, para proteger el suelo contra erosión (Erenstein, 1997).

Considerando lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: 1) comparar labranza de conservación con 100% de cobertura del suelo con residuos de cosecha (NT-100) y labranza convencional (CT) en relación con el escurrimiento y la salida de sedimentos en tierras de ladera y 2) cuantificar indicadores de sostenibilidad agrícola de NT y CT en cuanto al mantenimiento e incremento de la concentración de materia orgánica, la actividad biológica y la conservación de nutrientes.

MATERIALES Y METODOS

Descripción del Experimento

El experimento se estableció en Ajuno, municipio de Pátzcuaro, Michoacán, en junio desde 1996 a 1998. La Estación Experimental Ajuno se localiza en 19° 27' 10" N y 101° 43' 15" O. La estación es dependiente del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). La región es parte de la cuenca endorreica del lago de Pátzcuaro, está en el suroeste de la cuenca y consiste de tierras cerriles y lomeríos donde el cultivo principal es el maíz. El lugar se ubica en el km 18 de la carretera Pátzcuaro-Uruapan, a una altitud de 2250 m; la precipitación media anual es de 950 mm y la temperatura media anual es de 14.5 °C con estación seca (noviembre a mayo) y de lluvias (junio a octubre) bien diferenciada. El suelo, de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas, se clasifica como Andisol suborden Ustand (Tiscareño-López *et al.*, 1999).

En los tres años de evaluación hidrológica (1996-1998), el cultivo experimental fue maíz criollo regional. Los tratamientos evaluados fueron: labranza

de conservación con 100% de cobertura del suelo con residuos de cosecha (NT-100) y labranza convencional (CT). En CT, las labores culturales fueron: barbecho, rastra, surcado y dos escardas, mientras que NT consistió en nulo movimiento de suelo.

Cada tratamiento se evaluó en lotes de escurrimiento de 100 m² (25 m largo y 4 m ancho), con pendiente de 9% hacia el este. Al final de cada lote se instaló un vertedor para el aforo del escurrimiento y el muestreo de sedimentos en botes de 400 L, con rejilla de demasías para el muestreo de los eventos de precipitación extraordinaria (Figura 1).

La siembra se realizó mateada, en surcos perpendiculares a la pendiente separados a 1 m; la semilla se depositó a 5 cm de profundidad, con una separación de 25 cm por golpe. A 30 días se hizo un aclareo para dejar dos plantas por mata. El resto de labores de cultivo fueron idénticas en ambos tratamientos: fertilización 120-60-0 de nutrimentos N, P y K y control de malezas con atrazinas y 2,4,D.

Variables Evaluadas

Estas variables fueron: precipitación (R), intensidad y total en 24 h; salida de sedimentos (S_y) y escurrimiento (Q) total en 24 h. La información se registró desde la siembra a la cobertura completa del suelo por el cultivo, desde junio a agosto de periodo 1996-1998.

La lluvia registrada en el ciclo de cultivo se analizó para obtener su índice de erosividad en 30 min (EI₃₀) por evento de lluvia. Se relacionó para el período siembra-100% de cobertura del suelo (junio a agosto) a través de regresión no lineal, la precipitación (R) y escurrimiento (Q) y la energía de la lluvia (EI₃₀) y la salida de sedimentos (S_y). Simanton *et al.* (1973) y Singh y Woolhiser (1976) señalaron que el escurrimiento y la salida de sedimentos en función de la lluvia (x) frecuentemente se ajustan al modelo no lineal:

$$y = \alpha x^{\beta} \quad (1)$$

Donde: y = escurrimiento (mm) o salida de sedimentos (Mg ha⁻¹), x = lluvia (mm) o intensidad de la lluvia (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹).

Para determinar diferencias en el escurrimiento o salida de sedimentos entre ambos tratamientos, para un mismo año de estudio, se efectuó la prueba para diferencias significativas en las pendientes de

regresión (Ott, 1988), de los modelos de cada tratamiento, de acuerdo con la expresión:

$$t = \frac{b_1 - b_2}{\sqrt{Sp \left[\frac{1}{SS_1} \right] + \left[\frac{1}{SS_2} \right]}} \quad (2)$$

$$Sp = \frac{MSE_1 - MSE_2}{2} \quad (3)$$

Donde: Sp = estimación combinada del error de las dos ecuaciones con n-2 + n-2 grados de libertad, b₁ y b₂ = pendientes de regresión para las Ecuaciones 1 y 2, respectivamente, SS₁ y SS₂ = suma de cuadrados del modelo de regresión, MSE₁ y MSE₂ = cuadrado medio del error de regresión de las Ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

Se efectuó la prueba de homogeneidad de varianzas de los errores de los modelos de regresión para cada tratamiento para respaldar las comparaciones entre los coeficientes del modelo.

Indicadores de Sostenibilidad

En NT-100 y CT se determinó la magnitud de la actividad biológica del suelo en las profundidades de 0 a 5 y de 5 a 12 cm. La determinación de la actividad biológica se efectuó por tratamiento con cloroformo y posterior incubación en cámara de crecimiento con condiciones de temperatura y humedad controlada (Jenkinson y Powlson, 1976).

El cálculo de biomasa microbiana (MB) se efectuó con la expresión:

$$MB = \frac{(B - T) * PM * N}{PS} \quad (\text{mg C kg suelo}^{-1}) \quad (4)$$

Donde: B = mL de blanco utilizado, T = mL utilizados en la titulación, PM = peso molecular del HCl, N = normalidad del HCl, PS = peso del suelo (kg).

Los datos se procesaron estadísticamente mediante la prueba de t (Steel y Torrie, 1988), para comparar las medias de biomasa microbiana en los dos tratamientos considerados. En los eventos de escurrimiento se evaluó la salida de MO y de nitratos (NO₃), también como indicadores de sostenibilidad de los sistemas de producción. Las medias de ambas variables se compararon mediante una prueba de t donde cada evento de lluvia se tomó como una

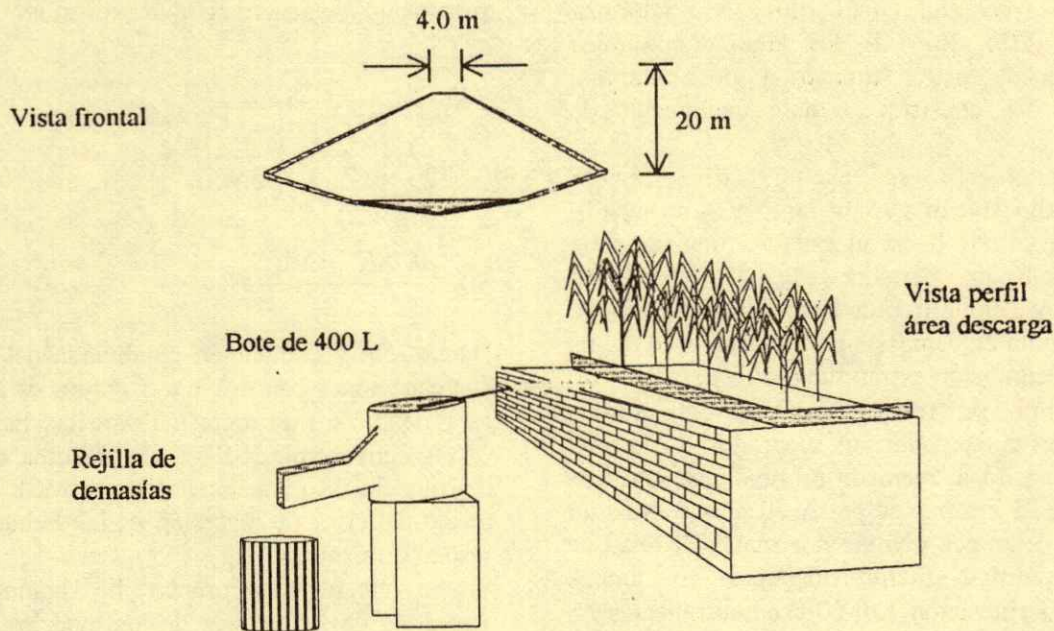


Figura 1. Vista de frente y perfil del lote de escurrimiento para la evaluación de Q y S_y en Ajuno, Mich.

repetición. MO se determinó por el método de Walkley y Black, descrito en Alcántar *et al.* (1992), NO_3 se determinaron con el potenciómetro usando un electrodo específico.

También como indicador de sostenibilidad de los sistemas de producción, se efectuó en ambos tratamientos a las profundidades de suelo de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm, el análisis de MO del suelo. Se contó con la información de MO para 1996 y, después de cuatro ciclos de cultivo, en los dos sistemas de producción se realizó un muestreo en octubre de 1999 en las mismas capas de suelo con tres repeticiones a lo largo del lote de escurrimiento, y se evaluó el cambio en el contenido de MO, afectado por el manejo de suelo en ambos sistemas. Los tratamientos fueron comparados estadísticamente mediante una prueba de t .

RESULTADOS Y DISCUSION

Variables Hidrológicas

Durante la etapa comprendida entre la siembra y una cobertura de 100% del terreno por el cultivo, lo que abarcó junio, julio y agosto (90 días), se registraron desde 453 a 1019 mm de lluvia, para el año más seco y más lluvioso, respectivamente.

Asimismo, se registró una energía acumulada de 1351 a 4330 unidades de EI_{30} , en la misma relación (Cuadro 1). El promedio de lluvia en Ajuno en estos meses (junio a agosto) es de 530 mm, lo que indica la gran variación existente en los años estudiados, con respecto a la lluvia. En este intervalo, la máxima energía de la lluvia fue de 1110 unidades de EI_{30} , para una lluvia en 24 h de 49 mm registrada en 1998, siendo este año el más lluvioso (1019 mm) y el de máxima energía (4330.6 unidades EI_{30}), para el periodo junio a agosto.

Los datos registrados en el Cuadro 1 muestran la gran variación que existe entre años en esta región, ya que la cantidad de lluvia registrada no necesariamente indicará más salida de sedimentos y escurrimientos; esto puede notarse en 1996 y 1997 cuando la lluvia fue menor que en 1998 y, sin embargo, Q y S_y fueron 100% más altos que las cantidades de 1998, sobre todo en lo que se refiere a CT. Independientemente de la lluvia, hay consistencia en la respuesta de los tratamientos en los cuatro años de estudio. Las diferencias en Q y S_y son claramente contrastantes. El tratamiento NT-100 puede reducir entre 20 a 40% el escurrimiento en relación con CT, independientemente si el año se presenta lluvioso como en 1998 o más seco como en 1997. Este efecto de NT-100 de reducir Q fue consistente en los tres años. Sin

Cuadro 1. Variables hidrológicas evaluadas en los lotes de escurrimiento. Ajuno, Michoacán.

Trata- miento	Variable hidrológica			
	Lluvia	EI ₃₀	Escurre- miento	Sedi- mento
	mm	MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹	mm	kg ha ⁻¹
1996				
NT-100	511	1835	16.3	221
CT	511	1835	76.9	2923
1997				
NT-100	453	1351	59.4	693
CT	453	1351	90.8	3313
1998				
NT-100	1019	4331	20.2	104
CT	1019	4331	37.9	1907

NT-100 = No labranza con 100% de cobertura residual del suelo.

CT = Labranza convencional con movimiento del suelo.

embargo, existe alta variación en los años estudiados (Cuadro 1). La salida de sedimentos también fue mayor en CT. Las diferencias son aún más grandes que las encontradas con Q sobre todo para el año más lluvioso. Estos valores encontrados para NT con intervalo de 0.2 a 0.6 Mg ha⁻¹, comparados con 2.9 y 3.4 Mg ha⁻¹ para CT, indican la bondad de la cobertura del suelo para reducir S_y a niveles mínimos.

En la Figura 2, se muestra la respuesta de Q en función de la lluvia registrada durante el ciclo de estudio, en los años 1996-1998. La forma de la curva de los dos tratamientos presentan semejanza a lo encontrado por Simmanton *et al.* (1973), en los tres años de estudio, sin embargo, Q obedece mayormente a dos o tres eventos de lluvia; esto puede apreciarse de manera más clara en los años de 1996 y 1998. La Figura 2 indica que la mayor parte de las lluvias no producen cantidades altas de Q y que sólo dos o tres eventos son los responsables del grueso del escurrimiento. Asimismo, se aprecia que los puntos de máximo escurrimiento corresponden siempre en todos los años a CT, mientras que NT-100 siempre tuvo tendencias de Q inferiores. Esto es debido a que en CT la falta de protección del suelo le confiere menor capacidad de infiltración y su relación con la lluvia siempre propicia un mayor Q , que el encontrado en NT-100.

En la Figura 3, se aprecia que S_y es diferente en los dos tratamientos estudiados. Durante el intervalo estudiado, CT siempre produjo más S_y que NT-100, lo cual puede notarse en las tendencias de las curvas de regresión. Los eventos que contribuyen a los valores máximos de S_y son tres o cuatro, el resto de las lluvias

es de baja intensidad en EI₃₀ (Figura 2). El año 1998 fue atípico; a pesar de las altas precipitaciones S_y presentó bajos valores, sin embargo, en este año se registraron las lluvias de mayor EI₃₀ y también las máximas S_y en CT con más de 600 kg ha⁻¹. La importancia de la cobertura residual de NT-100 se aprecia en estos dos eventos de lluvia, ya que los valores de S_y fueron menores que 50 kg ha⁻¹.

En las Figuras 2 y 3 se aprecia la diferencia que existe entre tratamientos, ya que CT muestra las curvas de tendencia con mayores valores de Q y S_y , mientras que NT-100 presenta valores con mayor cercanía al eje X, lo cual indica que para un mismo valor de lluvia y EI₃₀, los valores de Q y S_y siempre serán mayores en CT, por lo que estas curvas diferencian de manera clara el efecto de los dos tratamientos. Estos resultados coinciden con Sauer y Daniel (1987), quienes observaron reducción en Q y S_y en labranza de conservación, en comparación con labranza convencional.

Las tendencias de tratamientos para describir S_y en función del índice EI₃₀, así como Q en función de la lluvia, se presentan en el Cuadro 2. En este caso puede aceptarse que el índice de erosionabilidad puede explicar mejor el comportamiento hidrológico de los tratamientos. El ajuste a los datos observados no fue similar en los años estudiados entre tratamientos y entre variables hidrológicas. El tratamiento que muestra mejor ajuste es CT, mientras que la variable mejor descrita por el modelo es Q ; esto puede deberse a que CT tiene menor resistencia a la salida de partículas del suelo que NT-100 y al carácter estocástico de la precipitación en intensidad y cantidad, por lo que CT reacciona y se ajusta mejor al modelo propuesto.

En el Cuadro 3, se muestra el análisis de las pendientes de regresión para las variables Q y S_y en cada tratamiento en los tres años de estudio. Estadísticamente, la prueba efectuada a Q no es viable en los tres años de estudio debido a la heterogeneidad de los datos observados, dado por la prueba de homogeneidad de varianzas; sin embargo, para S_y existen bases para demostrar que CT produce mayor erosión del suelo que NT-100. Basado en la existencia de homogeneidad de varianzas en los datos observados para S_y , en dos de los tres años estudiados, se aprecia que la pendiente de regresión de CT es mayor estadísticamente que la pendiente de NT-100. Así, CT tiene una mayor capacidad de salida de sedimentos que la encontrada para NT-100.

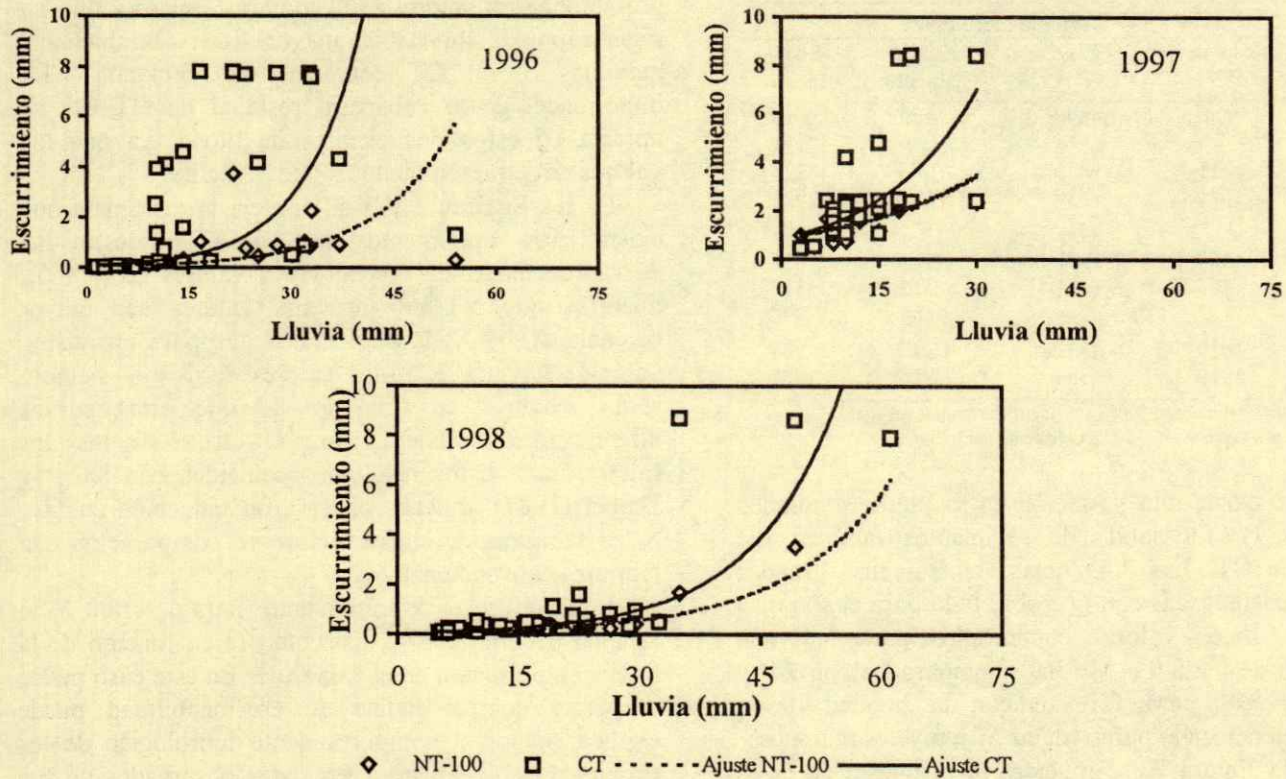


Figura 2. Efecto de la cantidad de lluvia en el escurrimiento (Q), producido en dos sistemas de manejo de suelo. Ajuno, Mich. 1996-1998.

Cuadro 2. Escorrimento (Q) y salida de sedimentos (S_y) en función de la lluvia (R) y el índice EI_{30} en tres años de estudio en Ajuno, Michoacán.

Año	Tratamiento [†]	Variable	Ecuación	R ²	Fc [‡]
1996	NT-100	Q	$Q = 0.009 R^{1.284}$	0.76	10.8**
1996	CT	Q	$Q = 0.006 R^{1.81}$	0.65	8.3**
1997	NT-100	Q	$Q = 0.308 R^{0.658}$	0.66	5.9**
1997	CT	Q	$Q = 0.168 R^{1.026}$	0.52	6.0**
1998	NT-100	Q	$Q = 0.00897 R^{1.171}$	0.73	9.9**
1998	CT	Q	$Q = 0.004 R^{1.66}$	0.67	8.6**
1996	NT-100	S_y	$S_y = 0.296 EI_{30}^{0.58}$	0.43	5.3*
1996	CT	S_y	$S_y = 0.472 EI_{30}^{0.967}$	0.58	7.2**
1997	NT-100	S_y	$S_y = 1.121 EI_{30}^{0.52}$	0.10	1.8
1997	CT	S_y	$S_y = 3.270 EI_{30}^{0.695}$	0.24	3.2
1998	NT-100	S_y	$S_y = 0.026 EI_{30}^{0.72}$	0.22	3.2
1998	CT	S_y	$S_y = 0.013 EI_{30}^{1.29}$	0.45	5.5**

[†] NT-100 = no-labranza con 100% cobertura residual del suelo. [‡] Fc = F calculada.

*, ** = significativo a 5 y 1%, respectivamente.

Indicadores de Sostenibilidad

En el Cuadro 4, se muestra la comparación entre tratamientos de manejo del suelo y cobertura vegetal

residual en la magnitud de la biomasa microbiana. La concentración de biomasa en NT-100 es mayor que en CT. Esto coincide con Powlson *et al.* (1987), quienes mencionaron que la variación en el rango de valores

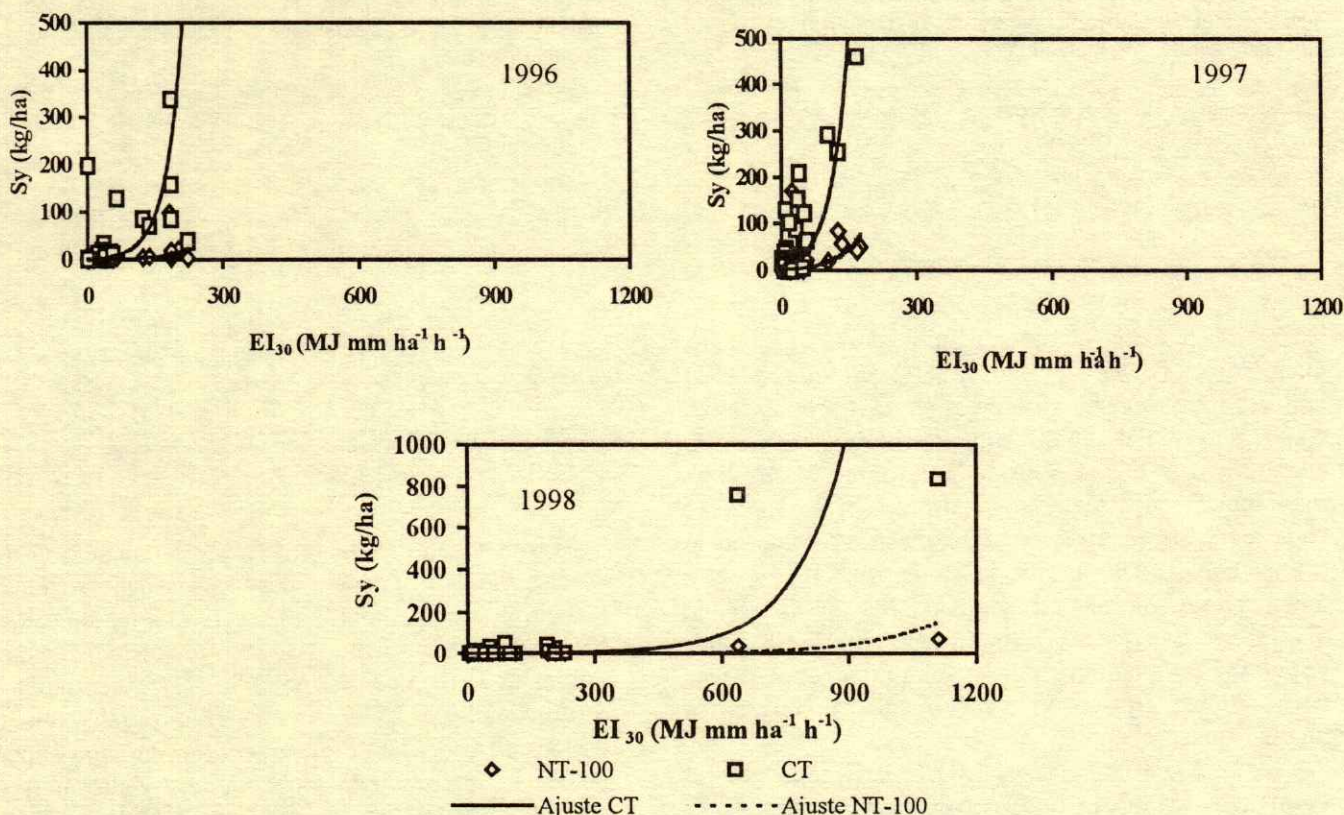


Figura 3. Efecto de la energía de la lluvia (EI_{30}), en la salida de sedimentos (S_y) en dos sistemas de manejo de suelo. Ajuno, Michoacán. 1996-1998.

Cuadro 3. Prueba estadística a las pendientes de los modelos de regresión de las variables hidrológicas en labranza de conservación (NT-100) y labranza convencional (CT). Ajuno, Michoacán.

Año	Variable hidrológica	Tratamiento	SSR [†]	MSE	HV	t_c
1996	Q	NT-100	10.9	0.094	3.3 **	18.7 **
		CT	21.7	0.314		
1996	S_y	NT-100	10.0	0.351	1.6 NS	6.3 **
		CT	28.1	0.550		
1997	Q	NT-100	0.57	0.016	86.2 **	5.5 **
		CT	1.38	0.038		
1997	S_y	NT-100	2.39	0.900	1.7 NS	0.4 NS
		CT	5.15	0.490		
1998	Q	NT-100	3.55	0.036	2.6 **	17.5 **
		CT	7.15	0.097		
1998	S_y	NT-100	6.82	0.674	1.1 NS	4.3 **
		CT	21.9	0.740		

[†] SSR = suma de cuadrados de regresión; MSE = cuadrado medio del error; HV = homogeneidad de varianzas; t_c = t calculada. NS = no significativo; * y ** significativo a 5 y 1%, respectivamente.

de biomasa microbiana en la capa más superficial del suelo (350 a 431 mg kg⁻¹ de suelo), está ligado directamente con el contenido de cobertura residual; esto se explica porque en la capa superior es donde se tiene mayor proporción de O₂ esencial para la biomasa del suelo (Campbell *et al.*, 1991), además del residuo

vegetal y de los organismos vivos presentes en la superficie del suelo (Doran y Parkin, 1994).

La alta concentración de biomasa, encontrada en el tratamiento de labranza convencional, puede deberse probablemente por la presencia de malezas, cultivo y organismos vivos superficiales lo que pudo

Cuadro 4. Indicadores de sostenibilidad del recurso suelo en dos sistemas de labranza en maíz de temporal con y sin labranza. Ajuno, Michoacán. 1999.

Tratamiento	Biomasa microbiana		Agua de escurrimiento	
	0 a 5 cm	5 a 12 cm	MO	N-NO ₃
	mg C kg suelo ⁻¹		kg ha ⁻¹	
NT-100	429 a	351 a	3.3 a	6.2 a
CT	351 a	156 b	131.2 b	15.2 b

Valores con la misma letra en columna son estadísticamente iguales.

tener efecto en el incremento de la biomasa microbiana (BM). Franzluebbbers *et al.* (1995) indicaron que existe variación en BM por factores como época del año, temperatura y raíces. Sin embargo, este efecto sólo es importante en la capa más superficial y cae drásticamente en la siguiente capa a menos de 50% de la biomasa existente en la primer capa, mientras que la caída en NT-100 entre ambas capas sólo llega a menos de 20% en la capa de 5 a 12 cm. Este efecto es importante en NT-100, pues le permite un mejoramiento de sus propiedades físicas para reducir erosión y escurrimiento, como ya se analizó anteriormente.

La pérdida de N y MO, acarreados en el escurrimiento, puede observarse en el Cuadro 4. El efecto de no-labranza es contrastante en la pérdida de la fertilidad del suelo. Se aprecia que la práctica individual de no-labranza, por sí misma no es capaz de mantener la sostenibilidad de la fertilidad del suelo, lo cual sólo es posible conservar con la cobertura residual vegetal. Los valores de pérdida de MO y N en NT-100 con respecto a CT tienen consistencia con relación al escurrimiento y la salida de sedimentos, ya que en ambos casos los efectos negativos de CT se mantienen. Al comparar la cobertura con CT, se redujo en sólo 3% para NT-100 con respecto a la pérdida de MO observada para CT. Los sistemas con cobertura residual redujeron la pérdida de N de 25 a 70%.

Las considerables pérdidas de MO ocurridas en CT están directamente relacionadas con la susceptibilidad a la erosión de los suelos. En este trabajo ya se demostró que CT propicia una mayor erosión, lo cual arrastra MO y N y, a su vez, la pérdida de MO reduce la estabilidad de agregados del suelo y lo hace más susceptible a la erosión. Esto comprueba lo argumentado por Bauer y Black (1994), en el sentido de la importancia de la MO para proveer estructura al suelo y la importancia de la labranza de conservación en la conservación e incremento de MO.

Cuadro 5. Contenido de materia orgánica en dos sistemas de manejo agrícola, en relación con la profundidad del suelo y el tiempo de manejo.

Profundidad	Año	Sistema de manejo agrícola [†]	
		NT-100	CT
cm		- - - - g kg ⁻¹ - - - -	
0 a 5	1996	23.7 a	23.0 a
	1999	43.1 a	20.1 b
5 a 10	1996	19.1 a	19.7 a
	1999	16.7 a	14.3 a
10 a 15	1996	18.1 a	19.1 a
	1999	13.4 a	4.7 b
15 a 20	1996	20.4 a	21.4 a
	1999	4.7 b	16.7 a

Valores con la misma letra en hilera son estadísticamente iguales.

[†] NT-100 = no labranza con 100% de cobertura residual del suelo. CT = Labranza convencional.

En el Cuadro 5, se presenta el contenido de MO en el suelo, prevaleciente después de cuatro ciclos de manejo de suelo en NT-100 y CT. Los incrementos de MO en el tratamiento NT-100 son estadísticamente diferentes al encontrado en CT, excepto en la profundidad de 15 a 20 cm. Ello prueba que con no-labranza la MO se incrementa en la capa superior del suelo, presentando altos valores y disminuyendo en suelos profundos, lo cual corrobora lo encontrado por Follet y Schimel (1989). Sin embargo, el sistema NT-100 permite presentar altas concentraciones de MO en las profundidades 0 a 5, 5 a 10 y 10 a 15 cm, superiores a las encontradas en CT. Sólo en la capa más profunda (15 a 20 cm), CT fue superior a NT-100, debido posiblemente al movimiento de suelo en este sistema de manejo.

Por otra parte, mientras que NT-100 es capaz de mantener y de incrementar en la capa superior, la cantidad de MO del suelo, dado por el análisis inicial y final después de cuatro ciclos de manejo de suelo (2.37 a 4.31%, respectivamente), CT ha disminuido la concentración de MO en todas las profundidades. Este incremento, en el caso de NT-100 está enriqueciendo el suelo con los efectos positivos que la MO proporciona al suelo en cuanto a las propiedades físicas, químicas y biológicas (Stevenson, 1982) y, por el contrario, CT indudablemente contribuye a empobrecer el suelo, con todos los efectos negativos que ello acarrea. La pérdida de MO dada por CT se explica, además de la natural descomposición, por la pérdida que se tiene en el proceso de erosión y escurrimiento ya evaluado en las figuras 2 y 3, que complementan la información obtenida en el Cuadro 4.

CONCLUSIONES

- La labranza de conservación evaluada en este trabajo muestra el efecto de la cobertura del suelo, para propiciar la reducción de la erosión (> 80%) y el escurrimiento (> 45%), en relación con la labranza convencional con movimiento de suelo en agricultura de ladera.

- Los indicadores de sostenibilidad evaluados en este trabajo indican que sólo la labranza de conservación con cobertura vegetal es adecuada para mantener e incrementar la biomasa microbiana, el N y la materia orgánica del suelo. La biomasa microbiana se incrementa en más de 18% en NT-100 con 450 g kg⁻¹ de suelo, mientras que CT sólo produjo 370 g kg⁻¹ de suelo.

- Labranza de conservación con cobertura reduce en más de 80% las pérdidas de materia orgánica y nitrógeno con valores de 22 kg ha⁻¹ y de 6.5 kg ha⁻¹, respectivamente. En labranza convencional las pérdidas son 137 kg ha⁻¹ y 19.6 kg ha⁻¹, respectivamente. El manejo de suelo con CT propicia mayor reducción de la biomasa del suelo, mayor pérdida de N y decremento del contenido de materia orgánica del suelo.

LITERTURA CITADA

- Alcántar G., G., J.D. Etchevers B. y A. Aguilar S. 1992. Los análisis físicos y químicos. Su aplicación en agronomía. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Altieri M., A. 1994. Bases agroecológicas para una producción agrícola sustentable. *Agricultura Técnica* 54: 371-386.
- Bauer, A. y A.L. Black. 1994. Quantification of the effect of soil organic matter content of soil productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 185-193.
- Campbell, C.A., V.O. Biederbeck, R.P. Zentner y G.P. Landfond. 1991. Effect of crop rotation and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in thin black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71: 363-376.
- Doran, W.J. y T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. pp. 3-21. *In: Defining soil quality for a sustainable environment. Special Publication 35. Soil Science Society of America. Madison, WI.*
- Erenstein, O. 1997. ¿Labranza de conservación o conservación de residuos? Una evaluación del manejo de los residuos en México. *Síntesis de los resultados experimentales del PRM. CIMMYT* 5: 188-197.
- Follet, R.F. y D.S. Schimel. 1989. Effect of tillage practices on microbial biomass dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1091-1096.
- Franzluebbers, A.J., F.M. Hons y D.A. Zureber. 1995. Soil organic carbon, microbial biomass, and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 460-466.
- Jenkinson, D.S. y D.S. Powlson. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.* 8: 209-213.
- Ott, L. 1988. An introduction to statistical methods and data analysis. PWS-Kent Pub. Boston, MA.
- Powlson, D.S., P.C. Brooks y B.T. Christensen. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indicator of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.* 19: 159-164.
- Reijntjes, C., B. Haverkort y A. Waters. 1992. Farming for the future: An introduction to low external input and sustainable agriculture. MacMillan. London, UK.
- Salinas G., J.R., F.M. Hons, J.E. Matocha y D.A. Zuberer. 1997. Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by long-term tillage and nitrogen fertilization. *Biol. Fert. Soils* 25: 182-188.
- Sauer, T.J. y T.C. Daniel. 1987. Effect of tillage system on runoff losses of surface-applied pesticides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 410-415.
- Simmanton, J.R., K.G. Renard y N.G. Sutter. 1973. Procedure for identifying parameters affecting storm runoff volumes in a semiarid environment. AGR-101. ARS-US Department of Agriculture. Berkeley, CA.
- Singh, V.P. y D.A. Woolhiser 1976. Sensitivity of linear and nonlinear surface runoff models to input errors. *J. Hydrology* 29: 243-249.
- Steel, G.R. y J.H. Torrie. 1988. Bioestadística: Principios y procedimientos. 2a. ed. Mc Graw-Hill. México, DF.
- Stevenson, F.J. 1982. Humus chemistry: Genesis, composition, reactions. John Wiley. New York.
- Tiscareño, L.M., R. Claverán A., M.A. Weltz y M.R. Kidwell. 1995. An approach to representing spatial variability when evaluating model uncertainty in process-based watershed models. pp. 199-206. *In: Proceedings Effects of Scale on Interpretation and Management of Sediment and Water Quality. ARS-SWRC. Boulder, CO.*
- Tiscareño-López, M., A.D. Báez G., M. Velázquez V., K.N. Potter, J.J. Stone, M. Tapia V. y R. Claverán A. 1999. Agricultural research for watershed restoration in Central Mexico. *J. Soil Water Conserv.* 54: 686-692.
- Torres M., J. 1990. Problemática operativa para conformar el proyecto único de rehabilitación ecológica y desarrollo económico-social para la cuenca del lago de Patzcuaro. pp. 156-163. *In: Simposio Internacional: Manejo Integrado de Cuencas para Uso Múltiple. General Technical Report RM-198. US Department of Agriculture. Forest Service. Patzcuaro, Michoacán, México.*
- Velázquez V., M.A., M. Tiscareño L., R. Claverán A. y M. Gallardo V. 1997. Erosión y productividad bajo labranza de conservación I. Folleto Técnico 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Morelia, Mich.
- Watts, R.C. y J.P. Bradbury. 1982. Paleocological studies at lake of Patzcuaro on the west central Mexican plateau and at Chalco in the basin of Mexico. *Quaternary Res. Rev.* 17: 56-70.

RELACION FUNCIONAL PSI-RAS[†] EN LAS AGUAS RESIDUALES Y SUELOS DEL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO, MEXICO

Functional Relationship ESP-SAR[‡] in Wastewater and Soils of the Mezquital Valley, Hidalgo, México

M.A. Velázquez-Machuca¹, M. Ortega-Escobar¹, A. Martínez-Garza¹, J. Kohashi-Shibata¹ y N. García-Calderón²

RESUMEN

Las aguas residuales generadas en el valle de México son usadas en el riego de cultivos en el valle del Mezquital, Hidalgo, Mex., a lo largo del sistema hidrográfico de Zumpango-Ixmiquilpan. Se tomaron muestras de estas aguas en 45 estaciones de muestreo en la primavera y otoño de 1998 y 1999. Se calculó el PSI para el RASaj y para $K_{G \text{ MIN}}$ y $K_{G \text{ MAX}}$. En el cálculo del PSI se utilizaron las reacciones químicas de equilibrio estequiométricas y heterogéneas. Los parámetros medidos y calculados en cada muestra y sus resultados fueron: 1. Conductividad eléctrica (CE) dS m^{-1} . La gran mayoría de estas aguas tiene $2.0\text{-}3.0 \text{ dS m}^{-1}$; 2. Composición iónica $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$; la concentración de bicarbonatos fue de $6.14\text{-}10.29 \text{ mmoles}_c \text{ L}^{-1}$; 3. Valores de $\text{pH} = 6.9\text{-}8.6$.

Palabras clave: Salinidad, RAS, PSI, sodicidad.

SUMMARY

Wastewaters generated in the Valley of Mexico are used for crop irrigation in the Mezquital Valley, Hidalgo, Mexico, along the Zumpango-Ixmiquilpan hydrographic system. Samples of this water were taken at 45 sampling points in spring and fall of both 1998 and 1999. The heterogeneous and stoichiometric chemical equilibrium reactions were used to calculate ESP. The parameters were measured and calculated in

[†] Porcentaje de sodio intercambiable-Relación de adsorción de sodio.

[‡] Exchangeable sodium percentage-Sodium adsorption ratio.

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. km 36.5 carretera México-Texcoco. (manueloe@colpos.colpos.mx),

² Universidad Nacional Autónoma de México. (negr@hp.fciencias.unam.mx)

Recibido: Junio de 2001. Aceptado: Abril de 2002.
Publicado en Terra 20: 459-464.

each sample, and the results were 1) total concentration electrical conductivity (EC) = $2.0\text{-}3.0 \text{ dS m}^{-1}$ for most; 2) ionic composition $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$, bicarbonate concentration $6.14\text{-}10.29 \text{ mmoles}_c \text{ L}^{-1}$, and 3) $\text{pH} (6.9\text{-}8.6)$. ESP was calculated for the SARaj and for $K_{G \text{ MIN}}$ and $K_{G \text{ MAX}}$.

Index words: Salinity, SAR, ESP, sodicity.

INTRODUCCION

Las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan, estado de Hidalgo, que son derivadas de un primer uso en diferentes actividades urbano-industriales en el valle de México, se utilizan en el riego de alrededor de $143\,227 \text{ ha}$ en el valle del Mezquital, Hidalgo. El volumen aproximado de estas aguas residuales del valle de México que se vierten en el valle del Mezquital y que escurren hacia la cuenca del río Pánuco para desembocar en el Golfo de México, es de aproximadamente 2553.8 Mm^3 anuales (Espino, 1981).

Durante el estudio de los procesos de salinización y de sodificación de los suelos, que pueden originarse debido al uso agrícola de estas aguas residuales en el valle del Mezquital, Hidalgo, deben considerarse los siguientes parámetros físico-químicos: 1. Total de sales solubles, 2. Relación de Adsorción de

Sodio $\left(\frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}} \right)$, 3. pH o régimen físico-químico.

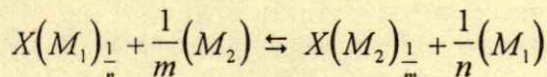
Aspectos Teóricos

Los iones que prevalecen en los cauces generales de las aguas residuales para su uso en el riego son Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ . En algunas descargas particulares hacia los cauces de aguas residuales, el contenido de potasio K^+ puede ser ligeramente elevado (Ortega y Díaz, 1993).

Para derivar la ecuación de intercambio catiónico en los suelos y como consecuencia la Relación de

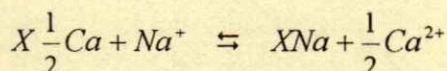
Adsorción de Sodio o RAS = $\frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}}$, se

hace uso de las reacciones de intercambio catiónico entre iones polivalentes. El esquema de intercambio catiónico es:



Donde: X es el símbolo que indica la superficie de las partículas con carga negativa y que su suma $\sum n^-$ conforma el complejo de intercambio catiónico; n es la valencia del ion M_1 y m es la valencia del ion M_2 .

En un proceso de intercambio catiónico, supongamos que el suelo contiene sólo en estado adsorbido el ion Ca^{2+} y que en calidad de electrolito en solución se tendrán las sales del ion Na^+ , entonces, por lo tanto, este suelo interactúa con los iones de sodio Na^+ , de acuerdo con la ecuación siguiente:



Esta ecuación de intercambio de iones polivalentes, de acuerdo con la ley de acción de masas se escribirá como sigue:

$$K_G = \frac{(C_{Ca^{2+}})^{\frac{1}{2}} X_{Na}}{(C_{Na^+}) X_{\frac{1}{2}Ca}}$$

o

$$\frac{X_{Na}}{X_{\frac{1}{2}Ca}} = K_G \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}}$$

Donde:

X_{Na} es la cantidad de iones de sodio Na^+ adsorbidos en meq por 100 g de suelo.

$X_{\frac{1}{2}Ca}$ es la cantidad de iones de calcio Ca^{2+} adsorbidos en meq por 100 g de suelo.

C_{Na^+} es la concentración del ion sodio Na^+ en la solución del suelo y está expresada en mmol L^{-1} .

$C_{Ca^{2+}}$ es la concentración de iones calcio Ca^{2+} en la solución del suelo y está expresada en mmol L^{-1} .

K_G es la constante de selectividad iónica y está expresada en $[mmol L^{-1}]^{-\frac{1}{2}}$. Este coeficiente se determina para cada suelo en particular.

Las formulaciones de RAS = $\frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}}$

que se utilizaron en este trabajo de investigación son las siguientes:

1. RAS = $\frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}}$. Observaciones. Esta

formulación de RAS no contempla las diferencias físico-químicas esenciales de los iones polivalentes de Ca^{2+} y de Mg^{2+} . El radio iónico del sodio Na^+ es de 0.098, el del calcio Ca^{2+} es de 0.104 y el del magnesio es de 0.074 nm. Los números de hidratación en moles de H_2O/mol de electrolito son: para el ion sodio Na^+ = 16.2, para el calcio Ca^{2+} = 16.7 y para el magnesio Mg^{2+} = 18.9 (Antipov-Karataev, 1967). De aquí se deriva que los procesos de hidrólisis de estos iones se manifiestan con diferente intensidad. En esta formulación de RAS se considera que los iones divalentes de Ca^{2+} y Mg^{2+} se comportan de manera semejante $\alpha_{Ca} \approx \alpha_{Mg}$ (Sposito y Mattigod, 1977). Por otra parte, en un proceso de intercambio entre los iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} para el sistema Ca-suelo + $MgCl_2$ y Mg-suelo + $CaCl_2$ se obtuvo

$\frac{C_{Mg^{2+}}}{C_{Ca^{2+}}} = 1.0$, $\frac{X_{Mg^{2+}}}{X_{Ca^{2+}}} = 0.375$, es decir, la energía de

adsorción del Mg^{2+} fue tres veces menor que la energía de adsorción del Ca^{2+} . Esta regularidad del proceso de intercambio entre el Ca^{2+} y el Mg^{2+} tiene un gran significado geoquímico durante los procesos de migración de las soluciones de los suelos y de las aguas superficiales. En las soluciones se presenta un enriquecimiento con iones de Mg^{2+} , en una determinada longitud de tiempo (Ortega y García, 1994). Es conocido que en las diferentes formulaciones de RAS se introducen los valores de las concentraciones analíticas, ya que, por lo general, los coeficientes de actividad de los iones no se determinan $\gamma_{Na^+}, \gamma_{Ca^{2+}}$ y $\gamma_{Mg^{2+}}$. En valores de RAS < 25 y concentraciones electrolíticas de 0.1 N es suficiente introducir los valores de las concentraciones de $C_{Na^+}, C_{Ca^{2+}}$ y $C_{Mg^{2+}}$ determinados analíticamente sin corregir por actividad (Gapon, 1933; Sposito y Mattigod, 1977). En esta formulación de

$$RAS = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}} \quad \text{no se consideran las}$$

variaciones de las concentraciones del Ca^{2+} debido a su precipitación en condiciones de alcalinidad elevada $pH > 8.2$.

$$2. RAS^0 = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}} \quad \text{Donde } RAS^0 \text{ es el RAS}$$

corregido. Aquí se consideran fuentes de calcio debido al $CaCO_3$. Se toma en cuenta en las aguas de riego la concentración electrolítica y la relación $\frac{HCO_3}{Ca}$ para el cálculo del calcio real en las soluciones de los suelos ($C_{Ca^{2+}}$) (Suarez, 1981).

$$3. RAS_{aj} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}} \left[1 + (8.4 - pHc) \right]. \quad \text{El}$$

RAS_{aj} es el RAS ajustado que incluye las disponibilidades de calcio en condiciones de una alcalinidad determinada. $pH = 8.4$ y es aproximadamente el pH de un suelo no-sódico en equilibrio con el $CaCO_3$. El índice de saturación (IS) estima la precipitación del ion carbonato del agua de riego como una función del grado de saturación con $CaCO_3$ en la solución del suelo. El índice de saturación (IS) se calcula: $IS = (8.4 - pHc)$. El pHc es el pH teórico en equilibrio con la calcita ($CaCO_3$) y se define como sigue: $pHc = (pK_2 - pK_{ps}) + p(Ca+Mg) + p(CO_3+HCO_3)$, donde $p(Ca+Mg)$ corresponde al logaritmo negativo de la concentración molar de $Ca + Mg$; $p(CO_3+HCO_3)$ corresponde al logaritmo negativo de la concentración equivalente de CO_3 y HCO_3 , y $pK_2 - pK_{ps}$ son el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del H_2CO_3 y el producto de solubilidad del $CaCO_3$, corregidos ambos por fuerza iónica (Ayers y Westcot, 1987).

El objetivo del presente trabajo es establecer los límites extremos de sodificación de los suelos del valle del Mezquital, estado de Hidalgo, mediante el empleo de tres formulaciones de la Relación de Adsorción de Sodio conocidas y determinadas a partir de la composición iónica de las aguas residuales, y dos valores del coeficiente de selectividad iónica K_G .

MATERIALES Y METODOS

Para comprender el inicio y desarrollo de los procesos de sodificación en los suelos del valle del

Mezquital, Hidalgo, se utilizó la relación funcional PSI-RAS. En la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan se establecieron 45 estaciones de muestreo (Figura 1). Los periodos de muestreo fueron primavera 1998-1999 y otoño 1998-1999. En cada estación de muestreo se tomó una muestra de agua de 1.0 L por duplicado. Los iones se determinaron analíticamente y se utilizaron los métodos de APHA (1989): pH, CE, $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, Na^+ y K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , RSE y RSC (métodos 4500-H⁺B, 2510B, 3500CaD, 3500-NaKD, 2320B, 4500-CIB, 4500-SO₄E, 2540D y 2540E).

Para calcular el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) en los suelos para cada formulación de RAS se empleó la siguiente relación: $PSI = \frac{K_G RAS100}{1 + K_G RAS}$

La predicción del PSI se hizo para condiciones de saturación y en equilibrio con las aguas residuales de riego.

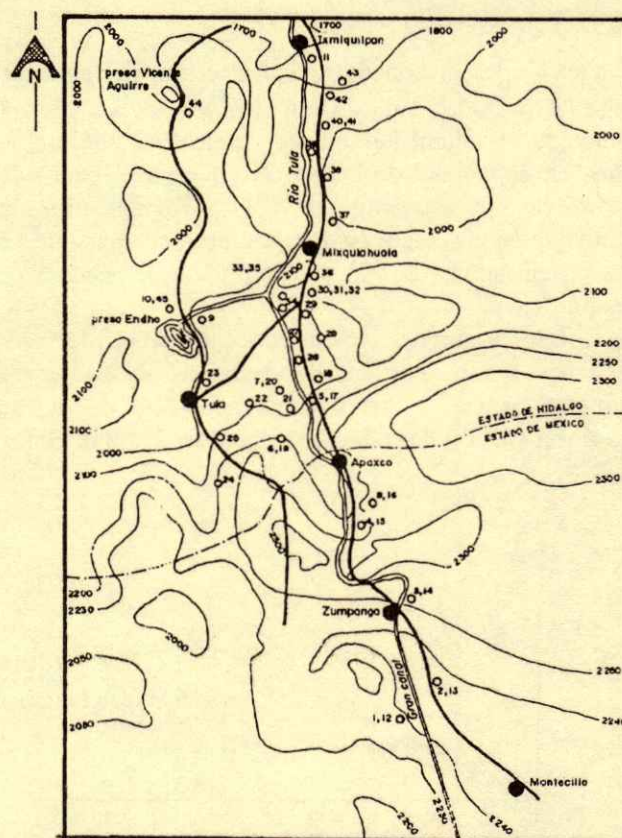


Figura 1. Localización de las estaciones de muestreo de aguas residuales de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan, estado de Hidalgo.

Los valores de K_G que se utilizaron en este trabajo fueron: $K_{G \min} = 0.0072444$ y $K_{G \max} = 0.0168999$, correspondientes a un suelo areno-arcillo-limoso (Shainberg y Oster, 1978) y a un suelo arcilloso (Gapon, 1933), respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSION

Total de Sales Solubles

En la Figura 2 se muestra la dependencia del contenido de sales solubles con respecto a la conductividad eléctrica (CE) de estas aguas.

Los valores de la CE de la gran mayoría de las aguas residuales se encuentran dentro de una amplitud de 1.0 a 3.0 dS m⁻¹ ó 0.876 a 2.63 g L⁻¹. Algunos cauces de las aguas residuales tienen concentraciones de sales de 3.0 a 5.5 dS m⁻¹. El riego con agua de alta concentración conduce a una salinización progresiva de los suelos. Esto se ilustra con la siguiente relación:

$$CE (\theta_{\text{sat}}) = CE (\theta_{\text{CC}}) = CE (\theta_{\text{PMP}})$$

Donde: CE es la conductividad eléctrica del agua de riego expresada, en dS m⁻¹. $\theta_{\text{sat}}-\theta_{\text{CC}}-\theta_{\text{PMP}}$ es el contenido de humedad en los suelos en saturación (sat), en capacidad de campo (CC) y en el punto de marchitez permanente (PMP). Obviamente, la acumulación de sales en los distintos suelos, que se riegan con aguas de alta concentración, dependerá de sus propiedades físicas.

Estas variaciones en las concentraciones de sales se deben a las aportaciones de aguas residuales de diferente origen, a los canales generales de la red hidrológica. En la relación funcional Total de Sales

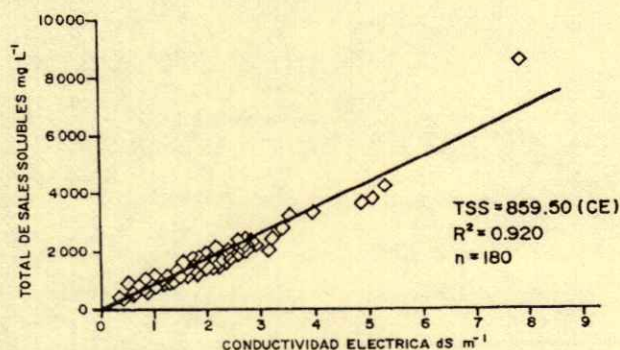


Figura 2. Relación entre la conductividad eléctrica (dS m⁻¹) y la concentración de sales (mg L⁻¹).

Solubles (TSS) = a (CE), el valor de a para estas aguas residuales es de $a = 859.50$. Este valor de a es un indicador de una composición iónica de las aguas residuales del tipo Cl⁻-SO₄²⁻-HCO₃⁻. Cuando en las soluciones se tiene una relación Cl⁻/SO₄²⁻ > 1.0, el coeficiente a adquiere valores de 640 a 800, en cambio, si en las soluciones se presenta una relación Cl⁻/SO₄²⁻ < 1.0 y HCO₃⁻/(Cl⁻ + SO₄²⁻) > 1.0 el coeficiente a presenta valores de 800 a 1300. La participación en las soluciones del sulfato de sodio Na₂SO₄·10H₂O y del sulfato de magnesio MgSO₄·7H₂O conduce a que los valores del coeficiente a sean altos (Ramírez *et al.*, 1989).

Valores de RAS y Problemas de Infiltración

En la Figura 3, se presenta la relación RAS-CE de las aguas residuales para las formulaciones de RAS, RAS^o y RAS_{aj}. Cuando los valores de RAS no toman en cuenta las condiciones de alcalinidad y precipitación de los iones de Ca²⁺ y de Mg²⁺, las aguas residuales presentan ligeros problemas de infiltración; sin embargo, cuando se consideran las posibles precipitaciones de los iones de Ca²⁺ y de Mg²⁺, las aguas residuales, en lo que se refiere a su capacidad de reducir la infiltración en los suelos, se disponen en el orden siguiente: sin reducción (RAS y RAS^o) y reducción moderada (RAS_{aj}).

Composición Iónica de Aguas Residuales

En la Figura 4, se presentan las composiciones y variaciones iónicas, además del pH, de las

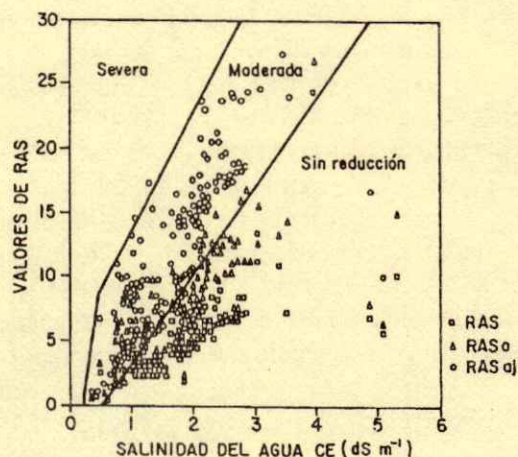


Figura 3. Reducción relativa de la infiltración de los suelos inducida por la salinidad y el RAS de las aguas residuales.

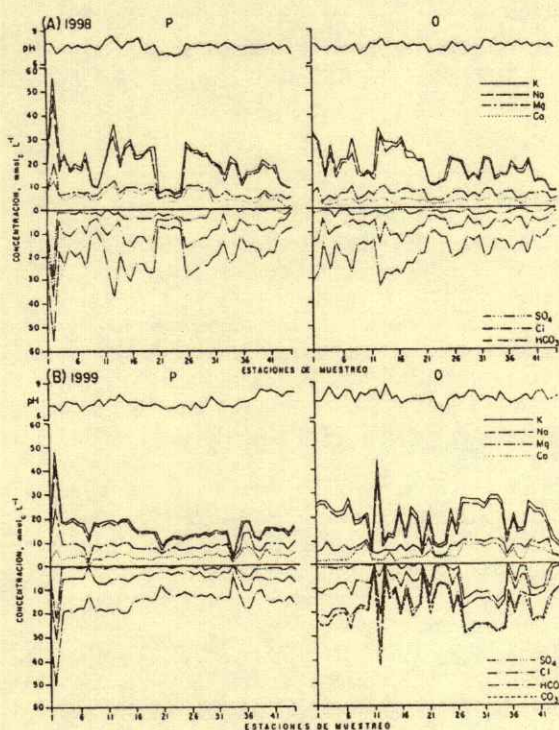


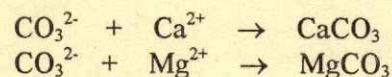
Figura 4. Composición iónica y pH, de las aguas residuales. (A) Muestreo 1998-Primavera y Otoño, (B) Muestreo 1999-Primavera y Otoño.

45 estaciones de muestreo de los periodos de primavera y otoño de 1998 y 1999. De acuerdo con las tendencias del contenido de Na^+ en las aguas residuales que riegan el valle del Mezquital, se delimitan cuatro áreas geográficas de contenido de sodio semejante. Zona I, Gran Canal: estaciones de muestreo 1 a 8 y 12 a 20; zona II, región de Tula: estaciones de muestreo 21 a 25; zona III, Mixquiahuala-Endhó: estaciones de muestreo 9 a 10 y 26 a 35; y zona IV, región de Ixmiquilpan: estaciones de muestreo 36 a 45 y 11.

Año 1998. Registros 1998-Primavera y 1998-Otoño. La relación iónica $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ para la zona I es de 1.43, para la II es de 0.45, para la III es de 1.72 y para la IV es de 1.29. Cuando la relación $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > 1.0$, en las aguas residuales se acumulan grandes cantidades de iones Na^+ . En cambio, cuando en las aguas residuales de riego la relación $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > 3.0$, en los suelos se desarrollan con mucha intensidad los procesos de sodificación y de salinización.

Año 1999. Registros 1999-Primavera y 1999-Otoño. La relación iónica $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ para la zona I es de 1.16, para la II es de 0.53, para la III es de 0.71 y

para la IV es de 0.66. Las aguas residuales que riegan el valle del Mezquital poseen grandes cantidades de HCO_3^- y tienen cantidades considerables de iones de Na^+ . Las sales de sodio presentes en forma conjunta son: NaHCO_3 , NaCl y Na_2SO_4 . Cuando se desarrollan procesos de hidrólisis en las aguas residuales aparece el Na_2CO_3 . En condiciones de $\text{pH} > 8.2$ a 8.4, los iones de Ca^{2+} y de Mg^{2+} se precipitan:

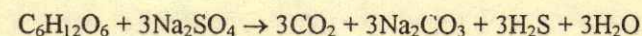


En concentraciones mayores que 10^{-4} y 10^{-3} M de Na_2CO_3 en las aguas residuales, el pH es mayor que 8.0 a 8.2 (Nakayama, 1970). En estas condiciones, las reservas de Ca^{2+} y de Mg^{2+} se precipitan paulatinamente y el RAS aumenta. Un RAS mayor incide directamente en los procesos de infiltración y en desbalances nutrimentales de los suelos. La precipitación del ion Ca^{2+} en soluciones de pH alcalino ocurre en forma de calcita CaCO_3 . La disminución sucesiva de iones Ca^{2+} en las soluciones de los suelos y aguas de riego conlleva a que la

relación $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}} \rightarrow \infty$. En estas condiciones, los procesos

de sodificación de los suelos se desarrollan con mucha intensidad, como: dispersión, pérdida de permeabilidad, solubilidad de moléculas orgánicas y aumento de pH (Ortega y García, 1994). En condiciones de alcalinidad, el ion H_2PO_4^- se asocia con el ion sodio Na^+ para formar NaH_2PO_4 . Posteriormente, el ion PO_4^{3-} se precipita con el ion calcio Ca^{2+} formando $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (Szabolcs, 1989).

En condiciones de anaerobiosis, la reducción de sulfatos, por la actividad biológica, es muy intensa debido a que el oxígeno disuelto en las aguas residuales es de 0.20 a 5.83 mg L^{-1} . La reducción de sulfatos se presenta de acuerdo con la ecuación:



Relación Funcional PSI-RAS

En la Figura 5, se presenta la dependencia funcional de PSI-RAS para diferentes valores de K_G [mmol L^{-1}]^{-1/2}.

Las aguas residuales del valle del Mezquital tienen grandes cantidades de bicarbonatos, los cuales son fácilmente hidrolizables. Como consecuencia de

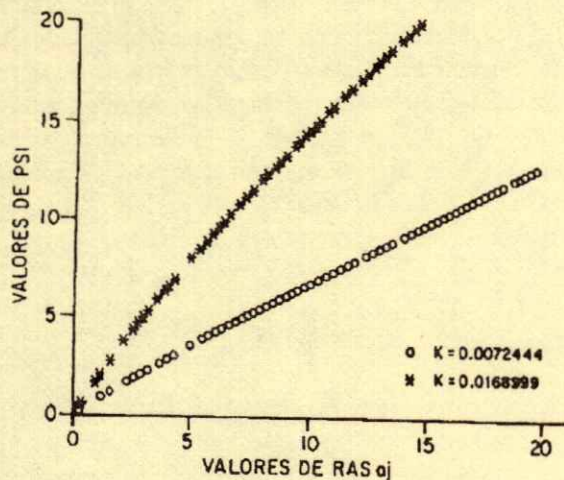


Figura 5. Relación PSI-RAS para la expresión RAS aj, de las aguas residuales.

este proceso de hidrólisis, en estas aguas aumenta el pH.

En una región alcalina, debido a los procesos de hidrólisis del sistema HCO_3^- - CO_3^{2-} , se manifiestan con mucha intensidad los centros activos que corresponden a los sesquióxidos R_2O_3 y a los grupos fenólicos de los ácidos húmicos (Gapon, 1933; Ortega y García, 1994).

Es evidente que K_G expresa directamente la complejidad de las estructuras cristalino-químicas de los sistemas arcillosos y orgánicos coloido-dispersos de los suelos.

CONCLUSIONES

Las aguas residuales del valle del Mezquital son de composición Cl^- - SO_4^{2-} - HCO_3^- . El alto contenido de bicarbonatos (valor medio = 9.65 $\text{mmoles}_e \text{ L}^{-1}$) en estas aguas modifica los valores de RAS, debido a los procesos de hidrólisis y precipitación del ion calcio Ca^{2+} . Evaluar el RAS de las aguas residuales con diferentes esquemas de conceptualización permite establecer una amplitud de valores útiles para el cálculo potencial del PSI en los suelos. Las

variaciones del PSI en los suelos dependen de los valores de K_G [mmol L^{-1}] $^{-1/2}$. Para el $\text{RAS}_{aj} = 10.0$ y $K_G = 0.0072444$, el $\text{PSI} = 8.0$, y para el $\text{RAS}_{aj} = 10.0$ y $K_G = 0.0168999$ el $\text{PSI} = 14.0$.

LITERATURA CITADA

- Antipov-Karataev, I.N. 1967. Reclamation of solonetz soils in the USSR. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, Israel.
- APHA. American Public Health Association. 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th ed. Port City Press. Baltimore, MD.
- Ayers, R.S. y D.W. Westcot. 1987. Water quality and use in agriculture. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1. FAO. Rome, Italy.
- Espino De La O., E. 1981. Reuse of municipal wastewater for industrial purposes in Mexico City. pp. 75-88. In: F.M. D'itri, J. Aguirre y M.M. Athié (eds.). Municipal wastewater in agriculture. Academic Press. New York.
- Gapon, E.N. 1933. Ion exchange reactions of soils (Russian). Pochvovedenie 2: 190.
- Nakayama, F.S. 1970. Hydrolysis of CaCO_3 , Na_2CO_3 and NaHCO_3 and their combinations in the presence and absence of external CO_2 source. Soil Sci. 109: 391-398.
- Ortega E., M. y L.F. Diaz E. 1993. Discharge waters in the watersheds of the States of Mexico and Hidalgo. pp. 139-146. In: Prevention of water pollution by agriculture and related activities. Water Reports 1. FAO. Santiago de Chile, Chile.
- Ortega E., M. y E. García G. 1994. La formación geoquímica de los suelos sódicos y sus propiedades. pp. 279-291. Vol. 3. Transactions 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México.
- Ramírez M., O., M. Ortega E., J.L. Rodríguez O., C. Ramírez A. y J.L. Rone P. 1989. Determinación experimental de la capacidad germinativa de algunos cultivos agrícolas en soluciones salinas de diferente concentración total y composición cualitativa. Agrociencia 78: 249-264.
- Shainberg, I. y J.D. Oster. 1978. Quality of irrigation water. International Irrigation Information Center. Volcani Center. Bet Dagan, Israel.
- Sposito, G. y S.V. Mattigod. 1977. On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio. Soil Sci. Soc. Am. J. 41: 325-329.
- Suarez, D.L. 1981. Relation between pH and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 464-475.
- Szabolcs, I. 1989. Salt affected soils. CRC Press. Boca Raton, FL.

EFICIENCIA DE USO DEL NITROGENO EN TOMATE DE CASCARA EN FERTIRRIEGO

Nitrogen Use Efficiency in Husk Tomato Under Fertigation

Cristóbal Ramos-Lara¹, G. Alcántar-González^{1,2}, A. Galvis-Spinola¹, A. Peña-Lomeli² y A. Martínez-Garza³

RESUMEN

Ante el aumento en el precio de los fertilizantes y el efecto de su uso excesivo sobre la contaminación del ambiente, en la actualidad, se hace más evidente la necesidad de aplicar los nutrimentos de manera racional. En este sentido, en la presente investigación se evaluó el rendimiento de fruto y la eficiencia de uso del N en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en un sistema de fertirriego, con riego por goteo en invernadero con cuatro dosis de N (0, 80, 160 y 240 kg ha⁻¹), con el propósito de evidenciar que tan efectivo es el uso de fertilizantes nitrogenados. Se determinó el rendimiento de fruto y, como parámetros de eficiencia de utilización del N, se midió la eficiencia agronómica, EA (kg de fruto kg⁻¹ de N aplicado), y la recuperación relativa del N (RRN). El diseño experimental fue completamente al azar, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. El máximo rendimiento de fruto (1.687 kg planta⁻¹) se obtuvo con 160 kg de N ha⁻¹ y fue superior al testigo. La EA fue afectada significativamente ($\alpha = 0.05$) por el N. La máxima EA se obtuvo con 80 kg de N ha⁻¹, superando en 209% a 240 kg de N ha⁻¹. La RRN más alta se encontró con 160 kg de N y fue estadísticamente igual ($\alpha = 0.05$) al resto de las dosis estudiadas. Las variables estudiadas fueron afectadas por el N. La dosis óptima para N fue de 120 kg ha⁻¹.

Palabras clave: *Physalis ixocarpa* Brot., fertirriego por goteo, nutrimento.

¹ Instituto de Recursos Naturales, ² Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados, km 35.5 Carretera México-Texcoco, 56230 Montecillo, estado de México. ³ (alcantar@colpos.mx)

² Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, 56230 Chapingo, estado de México.

Recibido: Junio de 2001. Aceptado: Mayo de 2002.
Publicado en Terra 20: 465-469.

SUMMARY

The increase in the price of fertilizers and the effect of their excessive use on environmental pollution make it more necessary than ever to apply nutrients rationally. In this study, fruit yield and nitrogen use efficiency in husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) under drip fertigation, in a greenhouse, were studied, with four N levels (0, 80, 160, and 240 kg ha⁻¹). Fruit yield was determined and also two parameters of N use efficiency: agronomic efficiency (EA) (kg of fruit kg⁻¹ of applied nitrogen) and the relative N recovery (RRN) (%). The experimental design was completely randomized, with four treatments and four replications. The maximum yield of fruit (1.687 kg plant⁻¹) was obtained with 160 kg N ha⁻¹, which was statistically different from the control. The effect of N level on EA was statistically significant ($\alpha = 0.05$). The maximum EA was reached with 80 kg N ha⁻¹, superior to 240 kg N ha⁻¹ by 209.0%. The highest RRN was found with 160 kg N ha⁻¹ and was statistically equal ($\alpha = 0.05$) to the rest of treatments. N affected the variables studied. The optimum dosage for N was 120 kg ha⁻¹.

Index words: *Physalis ixocarpa* Brot., drip fertigation, nutrient.

INTRODUCCION

El manejo adecuado de la nutrición de los cultivos, a través de la aplicación oportuna de fertilizantes, es una parte del proceso de producción que, en combinación con otros factores, fomenta el incremento en rendimiento y la calidad de las cosechas. Sin embargo, ante el incremento del precio de los fertilizantes y el efecto que se atribuye a su utilización excesiva sobre la contaminación del ambiente, es necesario hacer un uso cada vez más racional de los nutrimentos.

La eficiencia agronómica y la recuperación relativa del N permiten conocer con qué cantidad de N

el cultivo alcanza su máxima producción y el porcentaje de ese elemento que es absorbido por las plantas (Janssen, 1998).

Existen reportes sobre la eficiencia de uso y recuperación relativa del N en cultivos, como: cereales (Janssen, 1998) y chile Bell (Olsen *et al.*, 1993), en los que se han encontrado diferentes valores de estos parámetros, los cuales dependen del tipo de cultivo, características edafoclimáticas, así como de las condiciones en las que se desarrollen las plantas. Janssen (1998) señaló que, en la agricultura tradicional, la eficiencia en el uso del N, en el mejor de los casos, es de 50% cuando el manejo del fertilizante se lleva a cabo adecuadamente. Sin embargo, Olsen *et al.* (1993) encontraron para el cultivo de chile Bell, cultivado en condiciones de fertirriego, diferentes valores de recuperación aparente del N. Estos autores aplicaron 70, 140, 210 y 280 kg de N ha⁻¹ más un testigo y obtuvieron índices de recuperación aparente de 71.3, 68.3, 60.3 y 53.3%, respectivamente, y concluyeron que la eficiencia de uso del N aplicado disminuye conforme aumenta el nutrimento en el suelo.

La baja eficiencia de utilización de los fertilizantes nitrogenados (15 a 20%) se debe fundamentalmente a pérdidas por procesos, como: volatilización, lixiviación y desnitrificación (Janssen, 1998). Cuando se emplea la tecnología de fertirriego, dichas pérdidas disminuyen de manera significativa, debido a la frecuencia de aplicación de N a través del agua de riego durante el ciclo del cultivo, lo que evita su prolongada permanencia en el suelo o substrato y limita, consecuentemente, su pérdida por cualquiera de los procesos (Torres, 1999).

En el estado de México, se emplean cantidades de N establecidas empíricamente, las cuales varían de 120 a 180 kg de N ha⁻¹, sin tomar en cuenta el requerimiento interno nutrimental del cultivo, el rendimiento de fruto y la fertilidad nativa del suelo, por lo que, en la actualidad, la cantidad de N que los agricultores aplican regularmente al tomate de cáscara podría no ser la más adecuada (SAGAR, 1998).

Con base en lo anterior, la presente investigación se llevó a cabo con el objetivo de evaluar la eficiencia de uso del N en tomate de cáscara cultivado en fertirriego en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y METODOS

El experimento inició el 20 de junio de 2000, en el módulo de invernaderos del Campo Agrícola

Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, estado de México, en un Fluvisol eútrico franco arcilloso, con 29.1% de arcilla. La textura se determinó por el método del hidrómetro de Bouyoucos; densidad aparente de 1.22 g cm⁻³, por el método del terrón, descrito por Black y Hartge (1982); capacidad de campo de 23%, (1500 kPa) punto de marchitez permanente de 15.8%, (33 kPa), características que se determinaron con el método de la olla de presión (Aguilera y Martínez, 1990); conductividad eléctrica de 1.50 dS m⁻¹ se efectuó a través del puente de conductividad, relación suelo:agua 1:5 (Richards, 1990); pH de 8.16, determinado potenciométricamente relación suelo:agua 1:2 (Jackson, 1976) con un contenido de materia orgánica de 2.4% determinada por el método Walkley y Black (Jackson, 1976); 1.4 g kg⁻¹ de N total determinado por el método kjeldahl (Alcántar y Sandoval, 1999); el fósforo disponible se extrajo por el método Olsen y su determinación se efectuó por espectrofotometría (Olsen y Dean, 1965) cuyo valor fue de 9.93 mg kg⁻¹; 3.55 cmol_c kg⁻¹ de K intercambiabile extraído con CH₃COONH₄ 1N pH 7, y determinado por fotometría de llama (Chapman, 1965). El material vegetal utilizado fue tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), variedad CHF1-Chapingo, obtenida por selección a partir de la variedad Rendidora de características similares a ésta. Se evaluaron cuatro dosis de N con 0, 80, 160 y 240 kg ha⁻¹, utilizando NH₄NO₃ como fuente comercial con 33.5% de N. La dosis por planta se calculó considerando la distribución espacial de éstas en el invernadero y se extrapoló a una hectárea (16 600 plantas ha⁻¹). En total, se tuvieron cuatro tratamientos, con cuatro repeticiones, cada una representada por una maceta de plástico de 20 L de capacidad, en donde se colocaron 16 kg de suelo y una planta. Se empleó un diseño completamente al azar.

La aplicación del N por fertirriego se llevó a cabo con base en la etapa de crecimiento del cultivo, propuesta por Castro *et al.* (2000), (Cuadro 1). Las aplicaciones de N se realizaron diariamente a través del riego por goteo, como sigue: se pesó la cantidad requerida por tratamiento por etapa para una planta y se multiplicó por el número de plantas que recibieron ese tratamiento. El nitrato de amonio se disolvió en 500 mL de agua destilada y se aforó a 2 L. El volumen total se dividió en los días incluidos en la etapa y la cantidad obtenida se mezcló en el agua aplicada durante ese día.

Cuadro 1. Porcentaje y cantidad de N aplicado en cada tratamiento, según la etapa de crecimiento del tomate de cáscara.

Etapa (DDT) [†]	%	Dosis de N (kg ha ⁻¹)		
		80	160	240
		----- g planta ⁻¹ -----		
1 (1-22)	10	0.5	1.0	1.5
2 (23-51)	20	1.0	2.0	2.9
3 (52-80)	40	2.0	4.0	5.8
4 (81-102)	30	1.5	3.0	4.4
Total	100	5.0	10.0	14.6

[†]DDT = días después del trasplante.

Se aplicó el equivalente a 100 kg de P₂O₅ ha⁻¹ a todas las unidades experimentales (6.1 g planta⁻¹), utilizando como fuente comercial superfosfato de calcio triple con 46% de P₂O₅. Esta aplicación se realizó con base en los resultados del análisis de suelo.

En el invernadero, se colocaron cuatro módulos en un sistema de riego por goteo; cada uno de éstos consistió en un depósito de 200 L de capacidad, para el agua y el N aplicado, con tubería y una válvula de compuerta de PVC. Se utilizaron cintillas de polietileno negro de 5 m de largo y goteros cada 50 cm, con un gasto de 0.70 L de agua h⁻¹. El sistema de riego funcionó por gravedad, colocando los depósitos sobre bases de metal de 1.5 m de altura. Inmediatamente después del trasplante, se dio un riego con agua para asegurar que el sistema funcionara de manera adecuada. Se aplicaron 3.5 L de agua por maceta hasta saturar el suelo y se dejó drenar para luego llevarlo a capacidad de campo. Para el cálculo de la cantidad de agua aplicada diariamente y en un solo riego, se utilizó la capacidad de campo (33 kPa) y punto de marchitez permanente (1500 kPa); estas constantes hídricas se determinaron en el Laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados. En los riegos posteriores, la cantidad de agua se calculó mediante un equipo para medir humedad en suelos (Theta meter tipo HH1, con una probeta de cuatro sensores de 6 cm de largo tipo ML2).

Al final del ciclo del cultivo se determinaron las siguientes variables: rendimiento de fruto de cuatro cortes (el primero, 60 días después del trasplante, y los siguientes cada 15 días); el contenido de N en el tejido vegetal (parte aérea más fruto), por el método microkjeldahl (Alcántar y Sandoval, 1999). A partir de estos valores, se calcularon la eficiencia agronómica (EA) y la recuperación relativa del N (RRN), mediante las fórmulas propuestas por Mengel y Kirkby (1982):

$$EA = (RTFN - Rt)/NA \quad RRN = 100(ETNF - ENt)/NA$$

Donde: RTFN = rendimiento de fruto del tratamiento fertilizado con N (kg planta⁻¹), Rt = rendimiento de fruto del testigo (kg planta⁻¹), NA = N aplicado (kg planta⁻¹), ETNF = extracción total de N del tratamiento fertilizado (mg planta⁻¹), ENt = extracción de N del testigo (mg planta⁻¹)

El análisis estadístico se realizó con el programa Statistical Analysis System (SAS, 1990), utilizando la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) para la comparación de medias.

RESULTADOS Y DISCUSION

Rendimiento de Fruto

El máximo rendimiento de fruto se obtuvo con la aplicación de la dosis de 160 kg de N ha⁻¹ con 1.687 kg planta⁻¹ en promedio, valor que estadísticamente ($\alpha = 0.05$) fue igual al encontrado con las dosis de 80 y 240 kg de ha⁻¹, pero significativamente superior al testigo en 462.0% (Cuadro 2). El rendimiento de fruto presentó un incremento significativo por efecto de la aplicación de N (Figura 1); se observó una clara tendencia cuadrática ($r^2 = 0.94$) entre el rendimiento de fruto y la cantidad de N aplicada. Por otro lado, se comparó la extracción de N con el rendimiento de fruto por tratamiento, con la finalidad de encontrar el punto de máxima producción de fruto con la mínima absorción de N posible (Figura 2). Para alcanzar un rendimiento de fruto de alrededor de 28 t ha⁻¹, se requieren 120 kg de N ha⁻¹, con un coeficiente de determinación de 0.94 para el N aplicado y rendimiento de fruto, y 0.89 al tomar en cuenta la extracción de N.

Cuadro 2. Efecto de N sobre el rendimiento de fruto, eficiencia agronómica y recuperación relativa del N en tomate de cáscara.

Nitrógeno	Rendimiento de fruto	Eficiencia agronómica	RRN [†]
kg ha ⁻¹	kg planta ⁻¹	kg de fruto/kg de N aplicado	%
0	0.300 b [†]	-	-
80	1.467 a	233.3 a	67.47 a
160	1.687 a	138.7 b	66.13 a
240	1.402 a	75.5 c	47.10 a
DMS $\alpha=0.05$	0.36	45.20	23.07
CV	13.14	13.87	17.01

[†]Medias en columna con la misma letra no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha = 0.05$). [†]RRN = recuperación relativa de N.

concuera con los resultados reportados por Olsen *et al.* (1993) en Chile, en el sentido de que al aumentar la cantidad de N disponible disminuyó la eficiencia de utilización del nutrimento.

Recuperación Relativa del Nitrógeno (RRN)

Con respecto a la recuperación relativa del N en tomate de cáscara, la comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) indica que no hubo diferencias estadísticas significativas entre las dosis de N estudiadas. Sin embargo, la tendencia indica que al aumentar la dosis de N la recuperación relativa disminuye. El tratamiento con 80 kg de N ha⁻¹ presentó la máxima recuperación de N con 67.5% (Cuadro 2). El tratamiento con 240 kg de N ha⁻¹ mostró la recuperación relativa más baja de N aplicado en fertirriego. Es posible que se haya presentado una inmovilización temporal del N por los microorganismos del suelo, razón por la cual la tasa de absorción de N por la planta disminuyó cuando se aplicó la dosis más alta.

La tasa de recuperación del nitrógeno en este ensayo estuvo dentro de los valores normales, reportados por Olsen *et al.* (1993) y Janssen (1998), sobre todo para los tratamientos con 80 y 160 kg ha⁻¹, si se considera 50% como estándar normal. Los valores superiores posiblemente se debieron al sistema de riego utilizado, así como a la forma y método de aplicación del N, utilizando siempre el agua como vehículo de conducción. Los parámetros agronómicos de eficiencia del fertilizante utilizados disminuyeron conforme se incrementó la dosis de N; por ello, cuando hay un exceso de N (240 kg ha⁻¹), las pérdidas por volatilización y desnitrificación son mayores, aunado a que la planta sólo absorbe la cantidad que necesita y el resto queda libre, inmovilizado por los microorganismos del suelo o bien fijado en arcillas como illita y monmorillonita.

Es posible controlar, en buena medida, las pérdidas de N utilizando la tecnología más adecuada, fertirriego con riego por goteo, suministrando cantidades de N diariamente de acuerdo con la etapa de crecimiento y la demanda de N por el cultivo.

CONCLUSIONES

- El rendimiento de fruto y la eficiencia en la absorción del N son afectados significativamente

($\alpha = 0.05$) por el N aplicado. En rendimiento de fruto, la dosis de 160 kg ha⁻¹ presenta el promedio más alto y es estadísticamente igual a 80 y 240 kg ha⁻¹. Al aumentar la disponibilidad de N en el suelo, disminuye la eficiencia de uso de este nutrimento.

- Al relacionar la extracción de N con los tratamientos estudiados, en estas condiciones de manejo, se encontró el punto de máximo rendimiento de fruto, el cual correspondió a 120 kg de N ha⁻¹, para un rendimiento de fruto de alrededor de 28 t ha⁻¹.

LITERATURA CITADA

- Aguilera C., M. y R. Martínez E. 1990. Relaciones agua, suelo, planta, atmósfera. 4a ed. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico vegetal. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Black, G.R. y K.H. Hartge 1982. Bulk density. pp. 363-376. In: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd ed. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Castro B., R., P. Sánchez G., A. Peña L., G. Alcántar G., G. Baca C. y R.M. López R. 2000. Niveles críticos de suficiencia y toxicidad de N-NO₃ en el extracto celular de tomate de cáscara. Terra 18: 141-145.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. pp. 891-901. In: C.A. Black (ed.). Methods of analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Jackson, M.L. 1976. Análisis químico de suelos. Trad. al español por M.J. Beltran. 3a ed. Omega. Barcelona, España.
- Janssen, B.H. 1998. Efficient use of nutrients: An art of balancing. Field Crops Res. 56: 197-201.
- Mengel, K. y A.E. Kirkby. 1982. Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Worblaufen, Bern/Switzerland
- Olsen, J.K., P.J. Lyons y M.M. Kelly 1993. Nitrogen uptake and utilization by bell pepper in subtropical Australia. J. Plant Nutr. 16: 177-193.
- Olsen, S.R. y L.A. Dean. 1965. Phosphorus. pp. 1035-1049. In: C.A. Black (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Richards, L.A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 6a ed. Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América. Limusa. México, D.F.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1998. Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. Tomo I. México D.F.
- SAS Institute, Inc. 1990. SAS/STAT User's guide, Ver. 6. SAS Institute. Cary, NC.
- Torres Q., R. 1999. Dinámica nutrimental, producción y calidad de cebolla cv "Contessa" bajo condiciones de fertirriego por goteo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

PROCEDIMIENTOS PARA PREDECIR LA RESPUESTA DEL MAIZ A FOSFORO EN CONDICIONES DE SECANO. I. CONTRIBUCION DE VARIABLES DE SITIO

Methods to Predict Maize Response to Phosphorus Under Rainfed Conditions. I. Contribution of Site Variables

Diego R. González Eguiarte¹, Roberto Núñez Escobar², José Ariel Ruiz Corral¹ y Antonio Turrent Fernández³

RESUMEN

El análisis de suelo ha sido un instrumento útil para determinar las necesidades de fertilización para los cultivos, especialmente en el caso del P, para el cual se han desarrollado métodos de análisis que varían, fundamentalmente, en la solución extractora. Paralelamente, estos métodos se han calibrado con el fin de conocer los límites críticos de respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada. Aún con métodos debidamente correlacionados y calibrados, el diagnóstico no resulta siempre de toda precisión; esto debido a que el P disponible en el suelo en ocasiones no explica por sí solo la respuesta del cultivo a la fertilización, en especial en condiciones de secano, donde debe esperarse la influencia de otras variables de sitio. En el presente estudio se compara la precisión del diagnóstico que se logra con el método convencional (involucra únicamente al contenido de P disponible en el suelo) con otro que incluye variables de sitio además del propio contenido de P. Para el desarrollo de la investigación, se utilizó información recabada en campo, laboratorio e invernadero. Los trabajos de campo se desarrollaron en el estado de Tlaxcala como parte de un estudio para conocer las necesidades de fertilización del maíz. Los resultados mostraron que es posible mejorar la predicción de la respuesta del cultivo a la fertilización fosfatada, cuando ésta se expresa en términos de modelos

estadísticos que, además del contenido de P del suelo, incluyen variables de sitio. Uno de estos modelos involucró como variables independientes al contenido de P del suelo y la fecha de siembra y permitió disminuir en más de tres veces el error de la predicción, en comparación con el método convencional.

Palabras clave: Zea mays, análisis de suelo, diagnóstico de fertilidad del suelo, modelos de respuesta.

SUMMARY

Soil analysis has been a useful tool to determine fertilization requirements for crops, especially in the case of phosphorus, which has implied the development of methods of analysis that vary essentially in the extraction solution. Simultaneously, these methods have been calibrated to assess the critical limits of crop response to phosphate fertilization. Even with the use of methods correctly correlated and calibrated, the diagnostic process is not always highly precise mainly because the soil phosphorus content alone does not explain crop response to fertilization, especially under rainfed conditions where influence from other variables should be expected. In the present study, diagnostic precision in predicting crop response to phosphate fertilization of the conventional method (which uses only the soil phosphorus content as variable) is compared with a method that includes site variables plus soil phosphorus content. The study used field, lab and greenhouse data. Field experiments were conducted in the state of Tlaxcala, as part of a study to determine regional maize fertilization needs. Results showed that prediction of crop response to phosphate fertilization could be improved if this is expressed in terms of statistical models, which include site

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, Apartado Postal 6-163, Guadalajara, Jalisco, México.

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

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Centro, Apartado Postal 10, Chapingo, estado de México.

variables plus the soil phosphorus content. One model of this type included the independent variables planting date and soil phosphorus content, and reduced the prediction error by more than three times compared with the conventional method.

Index words: Zea mays, soil analysis, soil fertility diagnosis, response models.

INTRODUCCION

Por ser la fertilización uno de los factores que más influyen sobre el rendimiento de los cultivos (Rodríguez, 1996; Yibirin *et al.*, 1996), es importante conocer la fertilidad actual del suelo y así determinar la mejor práctica de fertilización. Una referencia importante para evaluar esta fertilidad es el análisis de suelo, en especial para ciertos nutrientes como: P, K, Ca y elementos menores, (Armstrong *et al.*, 1993). Con respecto al P, existen diferentes métodos de análisis de P disponible que varían fundamentalmente en la naturaleza química de la solución extractora, que es propia para cada uno de ellos (Havlin *et al.*, 1999). El gran número de métodos de extracción de P se debe a que diferentes condiciones de suelo demandan el uso de diferentes metodologías de extracción (Sharples *et al.*, 1988; He *et al.*, 1998). Al procedimiento usado para hacer la selección de un método apropiado se le denomina comúnmente correlación de métodos de análisis. Una vez que se selecciona un método de análisis, es necesario cubrir un proceso denominado calibración para fijar los límites críticos de respuesta del cultivo a la fertilización (Etchevers *et al.*, 1986).

En México, al igual que en otros países, se han desarrollado numerosos estudios encaminados a seleccionar métodos de extracción y posteriormente "calibrarlos" (González, 1975; Etchevers *et al.*, 1986; Cruz y Etchevers, 1991; Alvarez y Etchevers, 1993). Este esfuerzo ha resultado ser una importante contribución al diagnóstico de la necesidad de fertilización fosfatada, en especial para los sistemas agrícolas en que no siempre se requiere de este nutriente como fertilizante (Munson y Murphy, 1986). No obstante este importante alcance, existen evidencias de que conocer el contenido de P en un suelo, aún con el uso de un método bien seleccionado y previamente calibrado, no es la mejor forma de determinar el requerimiento de fertilizante fosfatado (Munson y Murphy, 1986; Villani *et al.*, 1998); afirmación que se basa en el hecho de que existen varios factores de suelo y de manejo del cultivos que

pueden modificar esta respuesta (Sharples *et al.*, 1989). Dentro de estos factores se ha reportado el pH (Furihata *et al.*, 1992; Villani *et al.*, 1998); la textura (Ozanne *et al.*, 1961; Shaviv y Shachar, 1989); la capacidad de intercambio de cationes (Akinremi y Cho, 1991); el contenido de carbonato de Ca (Shaviv y Shachar, 1989); el contenido de humedad del suelo (Haddock, 1952), la temperatura del suelo (Proebsting, 1957) e incluso prácticas de manejo, como es la adición de residuos orgánicos en la superficie del suelo (Langdale *et al.*, 1985).

El presente trabajo se fundamenta en la información de una zona de agricultura de secano en Tlaxcala, que se caracteriza por una marcada heterogeneidad en los factores de suelo (contenido de nutrientes, textura, profundidad y pendiente), de clima (precipitación pluvial y temperatura) y de manejo de los cultivos (fecha de siembra y variedad), por lo cual es de considerarse que, regionalmente, la respuesta del maíz a los fertilizantes fosfatados sea función, tanto del contenido de P disponible en el suelo, como de otras variables de sitio. Esta situación demanda la necesidad de ensayar metodologías de predicción que consideren, además del contenido de P del suelo, otras variables que pueden estar ligadas a la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización fosfatada en la zona de estudio. El objetivo en el presente trabajo fue comparar la precisión que se logra en la predicción de la respuesta del maíz al P con el uso exclusivo del análisis del P disponible en el suelo, con la que pueden alcanzarse, si se consideran además del dato de esta determinación, otras variables del suelo y manejo del cultivo.

MATERIALES Y METODOS

Para desarrollar el presente estudio, se utilizó información de campo recabada durante un período de cinco años (1970-1975) en campo en el estado de Tlaxcala y en invernadero y laboratorio en el Colegio de Postgraduados. Algunas determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Suelos del Campo Experimental Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Trabajo de Campo

El trabajo de campo se desarrolló en el estado de Tlaxcala, en los sitios que se señalan en la Figura 1. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales

Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) aportó tanto la información de campo como las muestras de suelo correspondientes. En el área de estudio, los suelos predominantes fueron Fluvisoles y Regosoles (SPP, 1982). La información de la parte sur del estado procede de experimentos establecidos en 1971 y 1972, con una superficie aproximada de 30 000 ha, cultivadas principalmente con maíz. Para la parte norte, la información proviene de experimentos de los ciclos agrícolas de 1970 y 1973, con una superficie aproximada de 80 000 ha. Las condiciones de siembra fueron: a) siembra en suelos de "humedad permanente", con siembras antes de iniciar el periodo de lluvias; b) siembra en suelos de secano con humedad residual, que se realiza antes de que inicien las lluvias, siempre que se hagan prácticas de conservación de humedad; c) siembra en suelos de secano, que se realiza hasta que inicia el periodo de lluvias. En cada uno de los sitios experimentales se extrajeron muestras de suelo para su posterior análisis en laboratorio. Los experimentos se establecieron siguiendo las propias condiciones de manejo del productor y se distribuyeron de manera indistinta en los sistemas de siembra antes descritos. Para el presente trabajo se utilizó exclusivamente la información que es útil para evaluar la respuesta del cultivo al P aplicado al suelo (Cuadro 1). Para los experimentos establecidos en 1973, se generó información adicional relacionada con variables de clima, manejo y profundidad y pendiente de suelos.

Con respecto a clima, se consideró únicamente precipitación pluvial, que se valoró aplicando el criterio propuesto por Ortiz (1974) quien encontró que la precipitación que más influye en el rendimiento del maíz es la que se presenta entre 50 y 130 días después de la siembra. El índice de precipitación se obtuvo multiplicando la precipitación en cada etapa por su respectiva importancia relativa y sumando estos productos. Además, se consideró el porcentaje en que se reduce el rendimiento por cada día de sequía, durante varias etapas de desarrollo del maíz (Laird y Rodríguez, 1965). También se consideraron para los experimentos de 1973, profundidad y pendiente de los suelos. La profundidad se midió de la superficie al primer estrato que impidiera el desarrollo radical, y como pendiente se consideró la de los surcos. Referente a manejo, se consideró fecha de siembra para los experimentos de 1971, 1972 y 1973. Los datos de suelo y clima se presentan en el Cuadro 2 y los correspondientes a manejo, en el Cuadro 3.

Trabajo de Laboratorio

En muestras extraídas de los sitios de campo a una profundidad de 0 a 20 cm, antes de establecer los experimentos, se realizaron las siguientes determinaciones: pH (Richards, 1954); materia orgánica (Walkley, 1947); textura (Bouyoucos, 1951) y porcentaje de fijación de P, determinación que se practicó únicamente en los experimentos establecidos

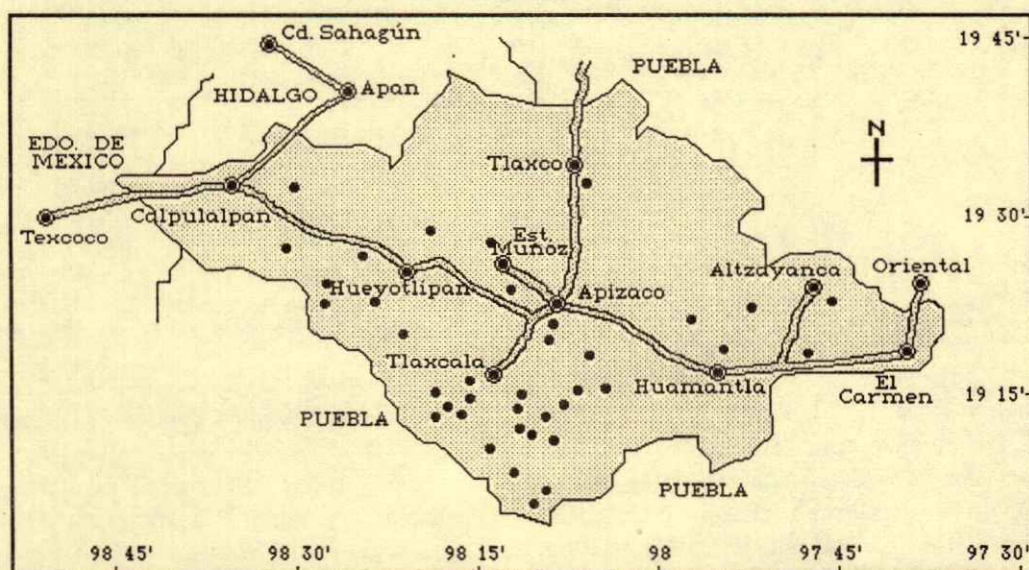


Figura 1. Localización de sitios experimentales en el estado de Tlaxcala.

Cuadro 1. Producción de maíz e incrementos de producción.

Año	Experimento	Producción de maíz [†]			Incremento producción	
		kg de P ₂ O ₅ aplicado			kg de P ₂ O ₅ aplicado	
		0	20	40	20	40
		----- kg ha ⁻¹ -----				
1972	7201	4577	4525	4217	-52	-360
1972	7202	5975	6188	6271	213	296
1972	7231	6244	5569	5902	-675	-342
1972	7233	4212	4631	4412	419	200
1973	136	1588	2946	2983	1358	1395
1973	137	1865	3116	3320	1251	1455
1973	138	1854	2692	2752	838	898
1973	139	2526	2155	2671	-371	145
1973	140	1012	2628	3127	1616	2115
1973	141	1259	2292	2873	1033	1614
1973	142	1729	2624	2885	895	1156
1973	143	2155	2524	2438	369	283
		0	30	60	30	60
1971	7101	3702	4025	3523	323	-174
1971	7105	4429	4255	3894	-174	-535
1971	7109	5495	5138	4883	-357	-612
1971	7112	5465	6405	6318	940	853
1971	7115	5358	5170	5339	-188	-19
1971	7119	3893	4333	4241	440	348
1971	7128	70	1518	1567	1448	1497
1971	7129	2598	2691	2789	93	191
1971	7130	3713	3214	3100	-499	-613
1972	7204	5039	6329	6612	1290	1573
1972	7205	2128	1443	1503	-685	-625
1972	7207	5262	6312	7214	1050	1952
1972	7208	6201	7676	8573	1475	2372
1972	7209	5926	6784	7087	858	1161
1972	7215	3579	5122	5602	1543	2023
1972	7217	5274	6629	6954	1355	1680
1972	7227	7547	7748	7540	201	-7
1972	7230	7458	8362	8415	904	957
1973	131	6220	6438	6625	218	405
1973	132	3712	4330	4309	618	597
1973	133	4031	3435	3446	-596	-585
1973	134	4332	5347	4715	1015	383
1973	135	7830	7424	7557	-406	-273
		0	40	80	40	80
1970	117	6140	7390	7910	1250	1770
1970	119	3188	4560	4320	1380	1140
1970	120	6810	6810	7070	0	260
1970	121	2440	4640	4290	2200	1850
1970	122	3390	3010	3560	-380	170

[†] contenido de humedad de 13%

en 1973 (Waugh y Fitts, 1966). Por la naturaleza del trabajo, el P se analizó por diferentes métodos, repitiendo tres veces cada determinación: Bray (Bray y Kurtz, 1945); Peech-Morgan (Peech y English, 1944); Olsen (Olsen y Dean, 1965.); Truog Modificado por IMPA (García y Sánchez, 1963); Egner-Riehm (Balerdi *et al.*, 1968).

Procedimientos para Predecir la Respuesta a P

Para probar las hipótesis planteadas en el presente estudio, se comparó la eficiencia de dos métodos de predicción de la respuesta de maíz a la aplicación de P; uno de ellos es el que tradicionalmente se utiliza (que aquí se denomina convencional) y que se basa en

Cuadro 2. Precipitación pluvial (P), índice de precipitación pluvial (I), profundidad de suelo (E), pendiente de los surcos (T) y fecha de siembra (F) para experimentos establecidos en el ciclo 1973.

Experimento	P [†]	I	E [‡]	T	F
	mm		cm	%	
131	520	1936	73	3.4	10-IV-73
132	261	1075	66	2.5	29-III-73
133	361	1901	93	2.5	30-III-73
134	430	1815	125	2.0	5-IV-73
135	345	1486	125	2.5	11-IV-73
136	390	1317	47	2.5	12-V-73
137	475	1952	49	0.8	2-V-73
138	475	1952	42	2.0	17-V-73
139	461	2259	80	2.0	28-IV-73
140	420	1846	37	2.0	17-V-73
141	371	1452	99	3.0	14-V-73
142	322	1053	15	2.0	11-V-73
143	322	1053	29	2.0	11-V-73

[†] Período 50 a 130 días después de la siembra; [‡] E = 125 cm en suelos sin impedimento en primeros 2 m.

el contenido de P disponible; el otro es un método que además del contenido de P involucra algunas variables de sitio.

Análisis Gráfico

Para establecer los límites críticos de respuesta a P, se construyeron gráficas relacionando la frecuencia de distribución de los incrementos del rendimiento, producidos por la aplicación del fertilizante fosfatado en condiciones de campo, con las cantidades de P extraídas del suelo por cada uno de los métodos químicos señalados. El límite crítico se estableció siguiendo el método de Cate y Nelson (Cate y Nelson, 1965) que implica el desplazamiento de los ejes horizontal y vertical para ubicar el límite crítico; en el presente estudio, el eje horizontal se mantuvo fijo por razones económicas. Para establecer los límites de respuesta, se consideró un incremento de rendimiento base que permitiera pagar el costo del fertilizante

fosfatado y gastos colaterales a esta práctica, incluyendo un porcentaje adicional para cubrir el riesgo propio del cultivo y de aquellos factores que no pueden ser controlados por el agricultor para que la respuesta lograda sea económicamente costeable.

Análisis Estadístico

Las variables que se manejaron en la presente investigación incluyen al método de Bray P-1 como estimador de la disponibilidad de P en el suelo dado que, además de ser un método previamente correlacionado, presenta la ventaja de ser de fácil realización en los laboratorios de rutina y, además, los valores mínimo y máximo encontrados por este método hacen que la variable "P disponible del suelo" sea de un amplio espacio de exploración

Los valores con que se codificaron las variables son los especificados en los Cuadros 2 y 3, y los propios valores de las determinaciones; la fecha de siembra se codificó, para lo cual se tomó como base el criterio de Estrella (1973), y se le dio arbitrariamente el valor del número de días transcurridos entre el 15 de marzo y el día de la siembra. Para la generación y selección de modelos estadísticos se aplicaron los procesos descritos en Barr y Goodnight (1972).

RESULTADOS Y DISCUSION

Caracterización de los Suelos en el Laboratorio

Los resultados de las determinaciones para caracterizar los suelos reflejan una variación del pH de 5.2 a 8.9, con un valor medio de 6.5; el porcentaje de arena varió de 38 a 44, con un valor medio de 68; el porcentaje de limo osciló entre 9 y 49, con un valor medio de 19.6; el porcentaje de arcilla de 5.2 a 8.9, con un valor medio de 6.5; el porcentaje de arena varió de 38 a 44, con un valor medio de 68; el porcentaje de limo osciló entre 9 y 49, con un valor

Cuadro 3. Fecha de siembra (F) de los experimentos establecidos en los ciclos 1971 y 1972.

Experimento	F	Experimento	F	Experimento	F	Experimento	F
7101	22-III-71	7128	31-V-71	7205	27-III-72	7217	15-IV-72
7105	27-III-71	7129	11-VI-71	7207	8-IV-72	7227	19-IV-72
7109	4-IV-71	7130	16-VI-71	7208	10-IV-72	7230	21-IV-72
7112	10-IV-71	7201	18-III-72	7209	12-IV-72	7231	27-IV-72
7115	12-IV-71	7202	20-III-72	7215	14-IV-72	7233	17-V-72
7119	14-IV-71	7204	25-III-72				

medio de 19.6; el porcentaje de arcilla de 5.2 a 8.9, con un valor medio de 6.5; el porcentaje de arena varió de 38 a 44, con un valor medio de 68; el porcentaje de limo osciló entre 9 y 49, con un valor medio de 19.6; el porcentaje de arcilla valores extremos fueron 25.6 y 56.2 cuando se aplicaron 50 mg kg⁻¹ de P; 18.9 y 44.7 al aplicar 100 mg kg⁻¹ de P; y 18.4 y 43.9 al aplicar 120 mg kg⁻¹ de P; los valores medios para estas tres condiciones fueron 38.1, 37.9 y 39.3, respectivamente.

Determinación de P en el Suelo

Los resultados del análisis de P, expresados en mg kg⁻¹, reflejan valores extremos de 4.4 y 74.2 para el método Bray, 1.0 y 17.5 para el método Peech-Morgan, 1.2 y 26.6 para el método Olsen, 9.6 y 30.1 para el método Troug Modificado, y 1.4 y 44.8 para el método Egner Riehm; los valores promedio fueron 17.7, 4.5, 6.9, 35.6 y 9.7, respectivamente. Todos estos métodos resultaron ser igualmente eficientes para determinar el contenido de P disponible del suelo de acuerdo con un estudio de correlación de métodos químicos realizado con suelos de la misma región (González, 1975). La totalidad de los datos de las determinaciones de P disponible en el suelo aparecen más adelante en las correspondientes figuras.

Predicción de la Respuesta a P Basada en el Contenido de P del Suelo

Las Figuras 2 a 6 son representaciones gráficas de los límites de respuesta a P del cultivo para cada uno de los cinco métodos de análisis químico previamente correlacionados; las líneas horizontales por encima del eje "X" representan los límites de respuesta para cada una de las dosis de P que se consideraron para medir la respuesta a éste; se aclara que dichos límites se establecieron con base en costos y precios vigentes en la época en que se realizó el trabajo de campo, y los cuales no se actualizan en este documento, por no requerirlo así el planteamiento del presente estudio. Para el método de Bray P-1 (Figura 2), se estableció que cuando se extrajo del suelo menos de 30 mg kg⁻¹ de P, la probabilidad de respuesta fue de 63%, mientras que a valores mayores de P extraído, esta probabilidad decrece a 40.0%

Con respecto al método de Peech-Morgan (Figura 3), se encontró que cuando se extraen del

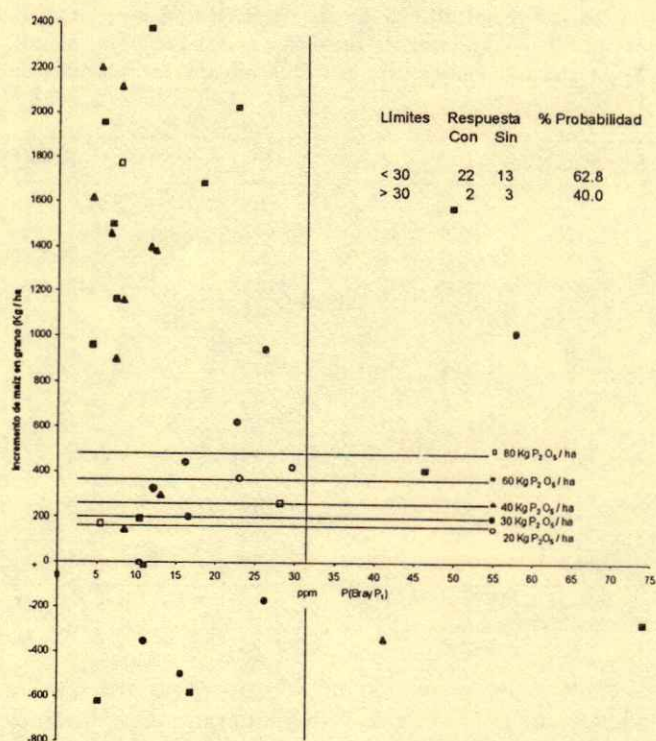


Figura 2. Frecuencia de distribución de los máximos incrementos de maíz en grano que se produjeron al aplicar al suelo las dosis de P₂O₅ indicadas y concentración de P del suelo solubilizada por el método de Bray P-1

suelo menos de 7 mg kg⁻¹ de P, existe 64% de probabilidad de respuesta económica a la aplicación del fertilizante fosfatado, y cuando el contenido de P en el suelo es mayor que 7 mg kg⁻¹, la probabilidad de respuesta se reduce a 33%.

Para el método de Olsen (Figura 4) se estableció que cuando el contenido de P del suelo es de menos de 12 mg kg⁻¹, hay 61% de probabilidad de respuesta, pero si el contenido de P en el suelo es superior al límite señalado, la probabilidad de respuesta económica es de 50%.

Con relación al método de Truog modificado por IMPA (Figura 5), se encontró que para cantidades de P disponible inferiores a 55 mg kg⁻¹, corresponde 68% de probabilidad de respuesta. Con valores de P disponible superiores a 55 mg kg⁻¹, la probabilidad de respuesta se reduce a 33%.

Finalmente, para el método de Egner-Riehm (Figura 6) se estableció que para el contenido de P inferior a 17 mg kg⁻¹, la probabilidad de respuesta es de 66%, mientras que para un contenido superior a este límite, la probabilidad de respuesta es de 37%.

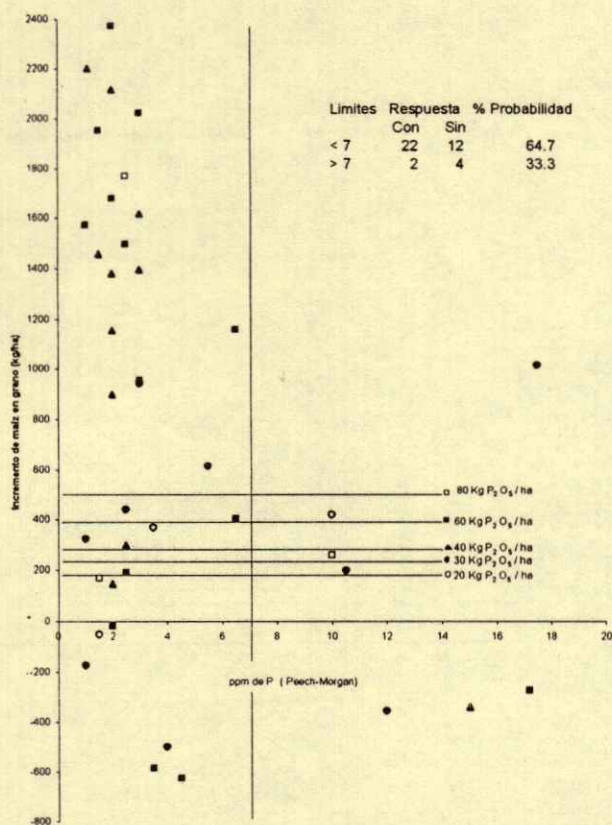


Figura 3. Frecuencia de distribución de los máximos incrementos de maíz en grano que se produjeron al aplicar al suelo las dosis de P_2O_5 indicadas y concentración de P del suelo solubilizada por el método de Peech-Morgan.

Se observa que el P extraído del suelo por cualquiera de los métodos químicos estudiados no permite establecer de una manera aceptable límites críticos definidos, lo cual impide hacer un diagnóstico satisfactorio de la respuesta a P con base únicamente en el análisis de suelo. Esto se debe a que, de manera contraria a lo esperado, con frecuencia se observó que a valores altos de P en el suelo correspondieron altos incrementos en rendimiento por efecto de la fertilización fosfatada; y *viceversa*, fue frecuente también que con bajos valores de P en el suelo fuera mínima o nula esta respuesta; más aún, también con frecuencia esta respuesta fue negativa.

Estos resultados reflejan que no es lo mejor generar recomendaciones de fertilización fosfatada con base en el análisis del suelo exclusivamente, ya que con frecuencia se estaría recomendando aplicar fertilizante cuando no habría una respuesta. De cualquier manera, esta aseveración deberá ser verificada al comparar la capacidad predictiva del

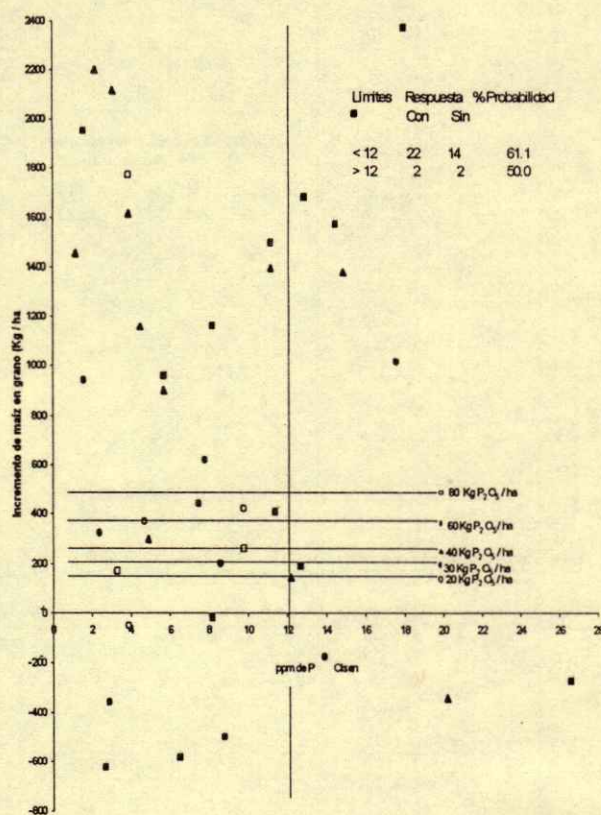


Figura 4. Frecuencia de distribución de los máximos incrementos de maíz en grano que se produjeron al aplicar al suelo las dosis de P_2O_5 indicadas y concentración de P del suelo solubilizada por el método de Olsen.

modelo $\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 D$ (donde D es el P extraído del suelo), con otros modelos que incluyan a otras variables de sitio.

Predicción de la Respuesta a P Involucrando Diferentes Variables de Sitio

Para probar la hipótesis planteada en el presente trabajo, se consideraron los datos correspondientes a los experimentos establecidos en 1973, debido a que permitían proveer suficiente información para comparar la eficiencia predictiva de sólo considerar el contenido de P del suelo, con la eficiencia predictiva al involucrar una amplia gama de variables de sitio.

Al ser graficadas cada una de las variables enunciadas contra la variable dependiente (respuesta a P) se dedujo que sus efectos son de tipo lineal, a excepción del P del suelo, cuya relación con la respuesta indicó que también debía ser incluido el término raíz cuadrada. Estas gráficas no se muestran

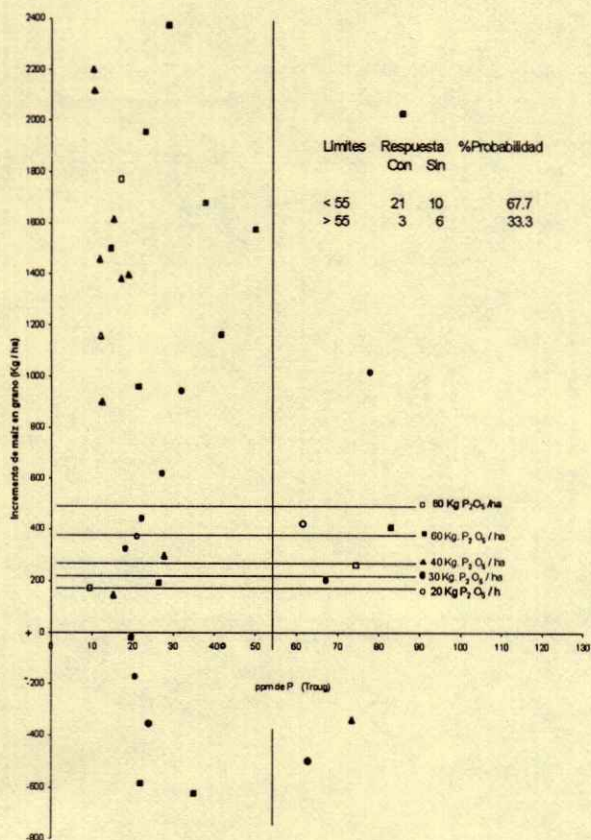


Figura 5. Frecuencia de distribución de los máximos incrementos de maíz en grano que se produjeron al aplicar al suelo las dosis de P₂O₅ indicadas y concentración de P del suelo solubilizada por el método de Troug modificado por IMPA.

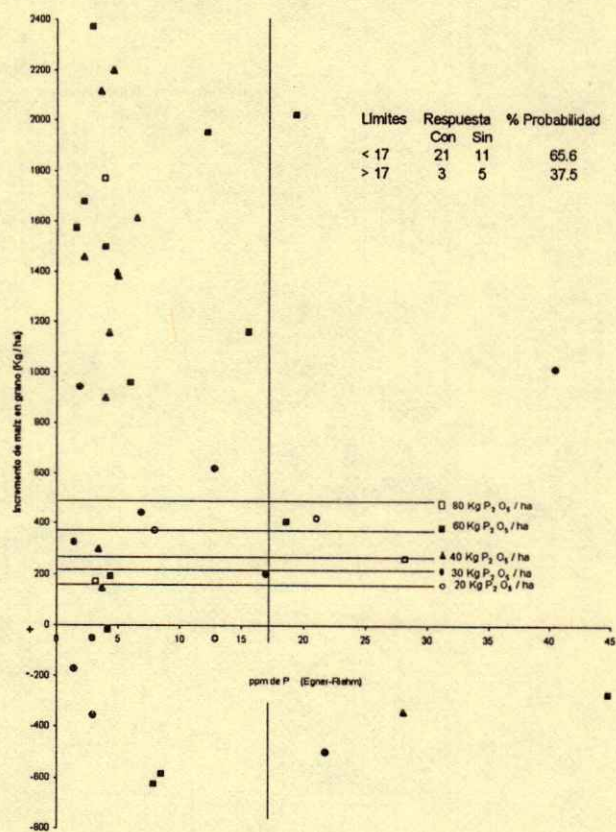


Figura 6. Frecuencia de distribución de los máximos incrementos de maíz en grano que se produjeron al aplicar al suelo las dosis de P₂O₅ indicadas y concentración de P del suelo solubilizada por el método de Egner-Riehm.

en el presente escrito; sin embargo, el efecto cuadrático de la variable P en el suelo se refleja en la distribución de las observaciones en las Figuras 2 a 6, mientras que el efecto lineal del resto de las variables es evidente en los modelos del Cuadro 4, en especial en aquéllos que tienen los más altos valores de R².

El proceso de selección de variables se inició partiendo de los efectos lineales de éstas, de sus combinaciones posibles y del efecto raíz cuadrada del P extraído del suelo por el método de Bray P-1.

Con el P extraído por el método de Bray P-1 y los incrementos máximos logrados con la fertilización fosfatada, se elaboró la Figura 7. En ella se puede observar que no es posible establecer un límite crítico bien definido, pues cuando el contenido de P del suelo es mayor que 15 mg kg⁻¹, las probabilidades de respuesta continúan siendo elevadas. Dado que en el invernadero (utilizando sorgo como planta indicadora), sí fue posible fijar un límite que divide

con máxima precisión las zonas con alta y baja respuesta (Figura 8), la falta de correlación en condiciones de campo puede atribuirse a la influencia que ejercen las variables de sitio.

Siguiendo los procesos descritos por Barr y Goodnight (1972) se generó la información presentada en el Cuadro 4. De acuerdo con los valores de R², destaca que además del contenido de P del suelo existen otras variables que contribuyen a explicar la respuesta a P, entre éstas la fecha de siembra, la capacidad de fijación de P del suelo y otras que están de alguna forma ligadas a la humedad aprovechable para las plantas. También destaca que el P del suelo considerado en forma aislada explicó únicamente 26% de la variación de la producción por efecto del fertilizante fosfatado. Esto es ya una explicación a la falta de precisión del método gráfico. Posteriormente, se derivaron las regresiones para cada modelo presentado en el Cuadro 5 con el objeto de seleccionar aquéllos que, además de tener valores de R²

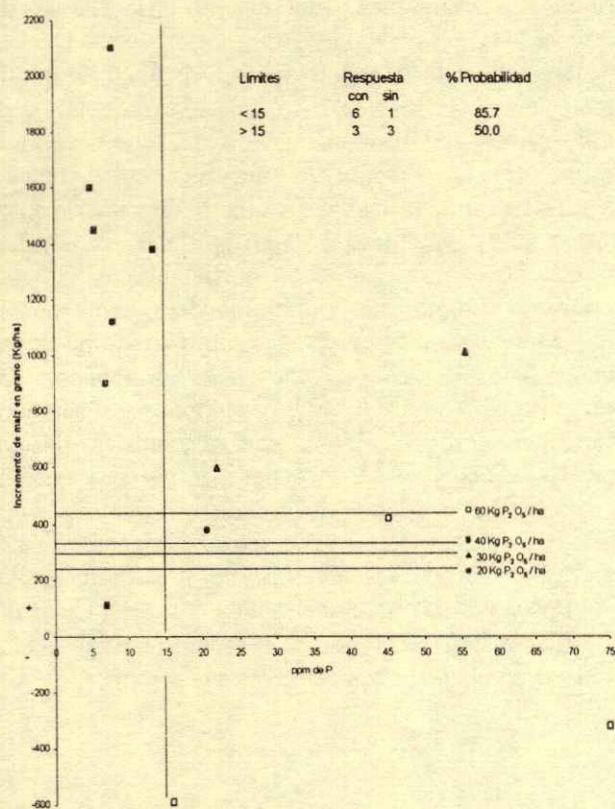


Figura 7. Frecuencia de distribución de los máximos incrementos de maíz en grano que se produjeron en los experimentos de campo de 1973 y concentración de P del suelo solubilizada por el método de Bray P-1.

aceptables, tuvieran coeficientes de regresión estadísticamente significativos y valores reducidos del cuadrado medio del error. Se optó por considerar como satisfactorios los modelos que tuvieran valores de significancia de al menos 5% para todos sus coeficientes de regresión. De los modelos incluidos en esta primera selección, los más simples son los Modelos 2, 3, 4 y 5, ya que con ellos es posible expresar la respuesta a P en términos de una sola variable independiente; sin embargo, sus valores de R^2 son bajos en comparación con los que se obtienen con modelos que incluyen un mayor número de variables independientes. Resulta interesante considerar que con cualquiera de estas cuatro ecuaciones se obtendría una predicción más precisa que la del Modelo 1, basado en el P disponible en el suelo. En este modelo, el coeficiente de regresión es significativo tan sólo a 7% y el valor de R^2 es de aproximadamente un medio del obtenido en los Modelos 2, 3, 4 y 5. Esto significa que variables como el contenido de arcilla y la fecha

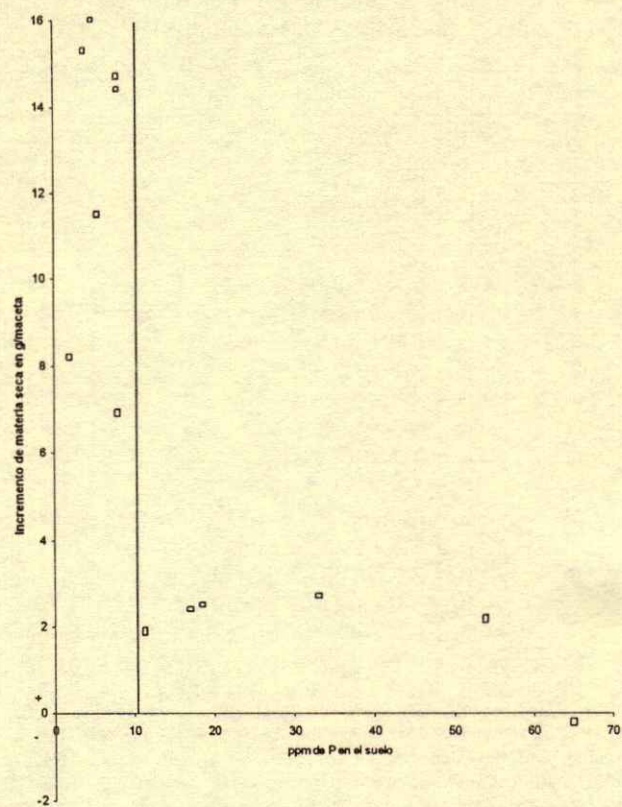


Figura 8. Frecuencia de distribución de los máximos incrementos de materia seca de sorgo que se produjeron en el invernadero al aplicar al suelo 30 ó 60 mg kg^{-1} de P y cantidades de P extraídas del suelo por el método de Bray P-1.

de siembra pueden ser un mejor índice de las posibilidades de respuesta en comparación con el contenido de P del suelo determinado por el método de Bray P-1.

Del resto de los modelos, únicamente el Número 15 pasa la prueba de los valores de significancia de los coeficientes de regresión y puede considerarse como un modelo aceptable, pues de acuerdo con el valor de R^2 permite explicar casi 75% de la variación de la producción por efecto del P aplicado al suelo. También es interesante que las variables independientes que lo constituyen son únicamente el P extraído del suelo (método Bray P-1), la fecha de siembra y la interacción entre ambas variables.

De acuerdo con lo anterior, el Modelo 15 es el que mejor describe la respuesta, tanto desde el punto de vista estadístico, como práctico. La expresión completa del modelo, incluyendo el valor de la ordenada al origen, es la siguiente:

$$\hat{y} = -5619.8422 + 93.81474F + 1230.8471D^{0.5} - 4.0052FD$$

Cuadro 4. Modelos estadísticos generados con las variables seleccionadas[†] y que tuvieron los más altos valores de R².

Modelo	Modelo	R ²
1	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 D 0.5$	0.264
2	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 M$	0.317
3	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 F$	0.423
4	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 R$	0.519
5	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 RC$	0.556
6	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 RC + \beta_2 SI$	0.579
7	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 RC + \beta_2 MT$	0.580
8	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 R + \beta_2 C$	0.595
9	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 RC + \beta_2 TI$	0.644
10	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 RC$	0.646
11	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 RC + \beta_3 TI$	0.665
12	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 R + \beta_2 CI + \beta_3 TI$	0.679
13	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 R + \beta_2 C + \beta_3 TI$	0.682
14	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 RC + \beta_2 CI + \beta_3 TI$	0.692
15	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 F + \beta_2 D^{0.5} + \beta_3 FD$	0.737
16	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 F + \beta_2 D^{0.5} + \beta_3 FD + \beta_4 RC$	0.756
17	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 F + \beta_2 D^{0.5} + \beta_3 FD + \beta_4 T$	0.757
18	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 F + \beta_2 D^{0.5} + \beta_3 FD + \beta_4 R$	0.769
19	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 F + \beta_2 D^{0.5} + \beta_3 FD + \beta_4 TI$	0.792
20	$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 F + \beta_2 D^{0.5} + \beta_3 FD + \beta_4 M$	0.806

[†] \hat{y} = incremento máximo de rendimiento de maíz en grano (kg ha⁻¹) logrado, en relación con el testigo, con la fertilización fosfatada; D = Fósforo extraído del suelo por el método de Bray P1 (mg kg⁻¹); P = Reacción del suelo; A = Contenido de arena (%); R = Contenido de arcilla (%); M = Contenido de materia orgánica (%); C = Capacidad de fijación de fósforo (%), al aplicar al suelo 50 mg kg⁻¹ de P; S = Profundidad del suelo (cm); T = Pendiente de los surcos (%); P = Precipitación pluvial entre 50 y 130 días después de la siembra (mm); I = Índice de precipitación pluvial; F = Fecha de siembra; H = Variable auxiliar (muda).

Comparación de la Eficiencia Predictiva entre el Método Convencional y la Ecuación Obtenida

Una vez definida la ecuación de regresión con la que se pretende expresar la respuesta a P, se procedió a evaluar la eficiencia de ésta, primeramente obteniendo los valores predichos para cada una de las observaciones (experimentos) de 1973. Posteriormente, habría que analizar el comportamiento de la ecuación con la totalidad de experimentos de fecha de siembra conocida.

En el Cuadro 6, se muestran los valores observados y predichos, así como también los incrementos mínimos costeables correspondientes a cada uno de los experimentos de 1973 de acuerdo con la dosis de P que fue necesario aplicar para lograr el incremento citado. En el mismo cuadro, se observa que en 11 de los 13 experimentos (85%) es posible predecir, con el modelo seleccionado, cuándo la

respuesta a P superará al incremento base establecido de acuerdo con los costos.

Respecto a la metodología convencional en que la predicción de la respuesta se basa únicamente en un límite crítico de P en el suelo y de acuerdo con la Figura 7, la predicción es acertada en 9 de los 13 experimentos (69%). El número de experimentos en que falla la predicción, tanto partiendo del modelo estadístico, como del método gráfico, no resulta tan importante como la magnitud del error en la predicción. Este error se estimó, para cada una de las metodologías que se discuten, sumando las desviaciones entre los valores observados (incrementos) y los incrementos básicos correspondientes a los experimentos en que la predicción falla y, finalmente, dividiendo esta suma entre el número de observaciones afectadas. Los valores de estas desviaciones se presentan en los Cuadros 7 y 8. De acuerdo con los datos del Cuadro 7 se tiene que el error que se produciría al pretender predecir con la ecuación seleccionada sería:

$$\text{Error} = \frac{\sum(a - b)}{n} = \frac{216}{2} = 108$$

Por lo que respecta al método gráfico (convencional) y de acuerdo con el Cuadro 8, el error que se produce es:

$$\text{Error} = \frac{\sum(a - b)}{N} = \frac{1392}{4} = 348$$

Una manera de evaluar la significancia de la magnitud de estos errores es comparar con el promedio de los incrementos básicos correspondientes a cada caso. Estos promedios son de 383 y 282 para el "caso del modelo" y del método gráfico, respectivamente. Con base en esto se establece que el error que se comete al "fallar" con el modelo es de:

$$\frac{108}{383} = 0.28 = 28\% \text{ del incremento básico,}$$

mientras que por el método gráfico es de:

$$\frac{348}{282} = 1.23 = 123\%$$

o sea casi cinco veces mayor.

Cuadro 5. Parámetros de regresión de los modelos obtenidos.

Modelo	Variable independiente [†]	Coeficiente de regresión y nivel de significancia		R ²	Cuadrado medio del error
1	D ^{0.5}	-189.0507	0.070	0.264	485209.26
2	M	1124.0330	0.043	0.317	450292.71 [‡]
3	F	26.7713	0.016	0.423	380426.71 [‡]
4	R	113.0125	0.006	0.519	317104.56 [‡]
5	RC	-588.0059	0.004	0.552	294965.31 [‡]
6	RC	2.3905	0.012	0.579	304820.57
	SI	-0.0021	0.554		
7	RC	3.0584	0.007	0.580	304463.25
	MT	-132.1579	0.559		
8	R	110.8796	0.006	0.595	293417.92
	C	23.0529	0.198		
9	RC	2.6058	0.003	0.644	257677.75
	TI	-0.1771	0.136		
10	T	-383.7739	0.133	0.646	256747.15
	RC	2.6887	0.003		
11	I	0.3277	0.521	0.665	269516.18
	RC	2.6487	0.004		
	TI	-0.2300	0.115		
12	R	103.5187	0.008	0.679	258134.06
	CI	0.0155	0.082		
	TI	-0.2699	0.091		
13	R	98.4929	0.010	0.682	256252.15
	C	33.4776	0.079		
	TI	-0.1913	0.150		
14	RC	2.3919	0.007	0.692	247985.17
	CI	0.0096	0.268		
	TI	-0.2823	0.072		
15	F	93.8174	0.004	0.737	211999.15 [‡]
	D ^{0.5}	1230.8471	0.014		
	FD	-4.0052	0.010		
16	F	77.5169	0.040	0.756	221120.02
	D ^{0.5}	1070.9856	0.047		
	FD	-3.4864	0.039		
	RC	0.8541	0.544		
17	F	95.6585	0.005	0.757	220068.48
	D ^{0.5}	1290.9893	0.015		
	FD	-4.1488	0.012		
	T	-191.8568	0.559		
18	F	76.3000	0.029	0.769	209700.04
	D ^{0.5}	1180.5313	0.019		
	FD	-3.6905	0.019		
	R	68.5264	0.326		
19	F	97.6523	0.003	0.792	188618.53
	D ^{0.5}	1355.0243	0.009		
	FD	-4.3638	0.007		
	TI	-0.1476	0.182		
20	F	81.5820	0.008	0.805	176509.13
	D ^{0.5}	1175.1339	0.013		
	FD	-3.9730	0.008		
	M	680.8108	0.130		

[†] \hat{y} = incremento máximo de rendimiento de maíz en grano (kg ha⁻¹) logrado, en relación con el testigo, con la fertilización fosfatada; D = Fósforo extraído del suelo por el método de Bray P1 (mg kg⁻¹); P = Reacción del suelo; A = Contenido de arena (%); R = Contenido de arcilla (%); M = Contenido de materia orgánica (%); C = Capacidad de fijación de fósforo (%), al aplicar al suelo 50 mg kg⁻¹ de P; S = Profundidad del suelo (cm); T = Pendiente de los surcos (%); P = Precipitación pluvial entre 50 y 130 días después de la siembra (mm); I = Índice de precipitación pluvial; F = Fecha de siembra. [‡] Con coeficiente(s) de regresión significativo(s) al 5% o menos.

Cuadro 6. Valores observados, valores predichos con el modelo $\hat{y} = \beta_0 + \beta_1F + \beta_2D^{0.5} + \beta_3FD$ e incrementos bases correspondientes a los experimentos de 1973.

Experimento	Valor observado	Valor predicho	Incremento base
	----- kg ha ⁻¹ -----		
131	405.0	463.7	433.0 [†]
132	618.0	285.0	283.0
133	-585.0	-159.0	433.0
134	1015.0	984.1	283.0
135	-273.0	-305.0	433.0
136	1395.0	1261.9	333.0
137	1455.0	714.2	333.0
138	898.0	1707.5	333.0
139	145.0	538.8	333.0 [†]
140	2115.0	1691.6	333.0
141	1624.0	1457.4	333.0
142	1156.0	1318.3	333.0
143	369.0	378.1	232.0

[†] Observaciones en que falla la predicción.

Una vez que se ha probado la bondad del modelo seleccionado para describir la respuesta a P con base en la información disponible para los experimentos de 1973, haría falta evaluar su comportamiento con base en información que incluya todos los experimentos de campo cuya fecha de siembra se conoce.

Son claras las evidencias de que la respuesta a P, en campo, está considerablemente influida por variables de suelo, clima y manejo, por lo cual es

Cuadro 7. Desviaciones con respecto a los incrementos básicos de los valores observados (incremento debido al fósforo) en los experimentos de 1973 en que falla la predicción con el modelo $\hat{y} = \beta_0 + \beta_1F + \beta_2D^{0.5} + \beta_3FD$.

Experimento	Valor observado (a)	Incremento base (b)	Desviación (a-b)
131	405	433	28
139	145	333	188

Cuadro 8. Desviaciones con respecto a los incrementos básicos de los valores observados (incremento debido al fósforo) en los experimentos de 1973 en que falla la metodología convencional.

Experimento	Valor observado (a)	Incremento base (b)	Desviación (a-b)
132	618	283	335
134	1015	82	732
139	145	333	188
143	369	232	137

interesante identificar plenamente las variables que están interviniendo en la respuesta del maíz a los fertilizantes para que, una vez determinada la magnitud de su influencia, sean consideradas en el momento de hacer una predicción. La notable influencia del clima demanda la necesidad de asociar la predicción con factores ambientales que pueden ser estimados en términos probabilísticos.

CONCLUSIONES

- La respuesta del maíz a P en condiciones de campo está notablemente influenciada por una serie de variables de sitio. Para los experimentos establecidos en el año de 1973, las variables que en forma aislada ejercieron mayor influencia sobre la respuesta a P fueron, en orden de importancia: el contenido de arcilla, la fecha de siembra, el contenido de materia orgánica del suelo y la disponibilidad de P en el mismo.

- En las condiciones en que se desarrolló el presente estudio, el análisis químico del P disponible en el suelo fue insuficiente para predecir la respuesta del maíz a la fertilización fosfatada.

- La ecuación de regresión que con mayor precisión describe la respuesta a P fue la que incluye como variables independientes a la fecha de siembra y al contenido de P asimilable del suelo.

LITERATURA CITADA

- Akinremi, O.O. y C.M. Cho. 1991. Phosphate transport in calcium-saturated systems: II. Experimental results in a model system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1282-1287.
- Alvarez S., M.E. y J.D. Etchevers B. 1993. Comparación de procedimientos estadísticos para la selección de métodos químicos de diagnóstico de la fertilidad del suelo. *Terra* 11: 73-84.
- Armstrong, R.D., K.R. Helyar y R. Prangnell. 1993. Direct assessment of mineral phosphorus availability to tropical crops using ³²P labelled compounds. *Plant Soil* 150: 279-287.
- Balardi, F.L., L. Muller y H.W. Fassbender. 1968. Estudio del P en suelos de América Central. III. Comparación de cinco métodos químicos del análisis de P disponible. *Turrialba* 18: 348-360.
- Barr, A.J. y J.H. Goodnight. 1972. *A User's Guide to the Statistical Analysis System*. North Carolina State University. Raleigh, NC.
- Bouyoucos, G.T. 1951. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agron. J.* 43: 434-438.
- Bray, R.H. y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.

- Cate, R.B. y L.A. Nelson. 1965. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. North Carolina State Univ. Agric. Exp. Sta. Raleigh, NC.
- Cruz H., L. y J.D. Etchevers B. 1991. Relación entre los procedimientos Olsen y Bray-1 de extracción de P, evaluados en suelos ácidos de Tlaxcala. *Terra* 9: 237-240.
- Estrella Ch., N. 1973. Relaciones empíricas entre el rendimiento del maíz de temporal y algunos factores ambientales en la región de Chalco-Amecameca, Edo. de México. Tesis de Maestría. Chapingo, México.
- Etchevers B., J.D., P. Anzastiga A., V. Volke H. y G. Etchevers G. 1986. Correlación y calibración de métodos químicos para la determinación de P disponible en suelos del estado de Puebla. *Agrociencia* 65: 161-178.
- Furihata, T., M. Suzuki y H. Sakurai. 1992. Kinetic characterization of two phosphate uptake systems with different affinities in suspension-cultured *Catathraanthus roseus* protoplasts. *Plant Cell Physiol.* 33: 1151-1157.
- García, L.R. y A.R. Sánchez. 1963. Método de Troug modificado. Instituto Mexicano para la Producción de Azúcar. Mimeógrafo. México, D.F.
- González E., D.R. 1975. Predicción de la respuesta del maíz a la fertilización fosfatada en el estado de Tlaxcala, basada en la disponibilidad del P del suelo y otras variables de sitio. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Haddock, J.L. 1952. The influence of soil moisture condition on the uptake of phosphorus from calcareous soils by sugar beets. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 16: 235-238.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale y W.L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. 6th ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- He, Z.L., V.C. Baligar, D.C. Martens y K.D. Ritchey. 1998. Determination of soluble phosphorus in the presence of organic ligands of flouride. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1538-1541.
- Laird, R.J. y J.H. Rodríguez. 1965. Fertilización de maíz de temporal en regiones de Guanajuato, Michoacán y Jalisco. Folleto Técnico 50. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D.F.
- Langdale, G.W., R.A. Leonard y A.W. Thomas. 1985. Conservation practice effects on phosphorus losses from Southern Piedmont watersheds. *J. Soil Water Conserv.* 40: 157-160.
- Munson, R.D. y L.S. Murphy. 1986. Factors affecting crop response to phosphorus. pp. 9-24. *In: Phosphorus for agriculture: A situation analysis.* Potash and Phosphate Institute. Atlanta, GA.
- Olsen, S.R. y L.A. Dean. 1965. Phosphorus. pp. 1035-1049. *In: C.A. Black (ed.). Methods of soil analysis.* Number 9 Series Agronomy. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Ortiz S., C.A. 1974. Evaluación de tierras según su producción de maíz en el área de influencia de Chapingo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Ozanne, P.G., D.J. Kirton y T.C. Shaw. 1961. The loss of phosphorus from sandy soils. *Aust. J. Agric. Res.* 12: 409-423.
- Peech, M. y L. English. 1944. Rapid microchemical soil test. *Soil Sci.* 67: 167-195.
- Proebsting Jr., E.L. 1957. The effect of soil temperature on the mineral nutrition of the strawberry. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 69: 278-281.
- Richards, L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Handbook 60. US Department of Agriculture. Washington, D.C.
- Rodríguez S., F. 1996. Fertilizantes: Nutrición vegetal. 3a Reimpresión. AGT. México, D.F.
- Sharpley, A.N., D. Curtin y J.K. Syers. 1988. Changes in water-extractability of soil inorganic phosphate induced by sodium saturation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 657-640.
- Sharpley, A.N., U. Singh, G. Uehara y J. Kimble. 1989. Modeling soil and plant phosphorus dynamics in calcareous and highly weathered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 153-158.
- Shaviv, A. y N. Shachar. 1989. A kinetic-mechanistic model of phosphorus sorption in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 148(3): 172-178.
- SPP. Secretaría de Programación y Presupuesto. 1982. Carta Edafológica "México", Escala 1:1 000 000. Secretaría de Programación y Presupuesto-Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística Geografía e Informática. México, DF.
- Villani E., M.A., N.F. Barros, R.F. Novais, N.B. Comerford, L.M. Costa, J.C.L. Neves y V.H. Alvarez. 1998. Phosphorus diffusive flux as affected by phosphorus source and incubation time. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 957-1061.
- Walkley, A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soil. Effect of variations in digest conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63: 251-264.
- Waugh, D.L. y J.W. Fitts. 1966. Soil test interpretation studies: Laboratory and potted plant. Soil testing. Lab. Technical Bulletin 3. North Carolina State University. Raleigh, NC.
- Yibirin, H., J.W. Johnson y D. Eckert. 1996. Corn production as affected by daily fertilization with ammonium, nitrate and phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 512-518.

TECNOLOGIAS SOBRE FERTILIZACION, DENSIDAD DE POBLACION Y VARIEDADES EN MAIZ A ESCALA COMERCIAL

Technologies for Corn Production Including Fertilization Rates, Planting Densities and Varieties in Commercial Plots

Ricardo Mendoza R.^{1†}, Ernesto Hernández R.¹, José I. Cortés F.², Antonio Turrent F.²,
Lucio A. Lerma V.¹ y Ernesto Aceves R.¹

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar la tecnología de producción recomendada sobre dosis y aplicación de nitrógeno y fósforo, densidad de población y variedades de maíz, grado de uso de la misma, así como su efecto en la nutrición de los cultivos, *versus* la tecnología de pequeños productores sobresalientes en comunidades ubicadas en varios tipos de suelos de humedad residual del área del Plan Puebla. Los resultados obtenidos en 109 parcelas comerciales indican que el mayor rendimiento de temporal (7.6 t ha⁻¹), así como los mayores beneficios netos (5.1 t de grano de maíz ha⁻¹), se obtuvieron con el plan de producción recomendado (PPM) cuando se usó el híbrido H-137. El grado de adopción de la tecnología recomendada fue más alto cuando se utilizó el híbrido (con un rendimiento y beneficio neto cercano al del PPM), no así cuando se usaron variedades criollas. En éstas, la variación en el uso de las dosis de nitrógeno y fósforo y la densidad de plantas fue muy grande, mediante algunas fórmulas desbalanceadas que ocasionan una deficiente nutrición de los cultivos, lo cual se asocia con rendimientos y beneficios netos más bajos (5.3 y 2.8 t ha⁻¹, respectivamente). Cuando se utilizó al híbrido HS-2 en condiciones de riego de auxilio, el rendimiento alcanzado fue de 9.0 t ha⁻¹.

Palabras clave: *Zea mays L.*, nutrición, productividad.

¹ Campus Puebla, Colegio de Postgraduados. km 125.5 Carr. Federal México-Puebla, Col. La Libertad, Apartado Postal I-12, 72130 Puebla, Pue., México. Tel. 01 (222) 2760011.

† rimero52@hotmail.com

² Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. km. 36.5 Carr. México-Texcoco, 56230 Montecillo, Edo. de México. Tel. 01 (595) 9520200, Ext. 1216.

Recibido: Enero de 2001. Aceptado: Marzo de 2002.
Publicado en Terra 20: 485-495.

SUMMARY

Performance of recommended fertilization rates of nitrogen and phosphorus, planting density and varieties for corn production in deep soils of Plan Puebla under rainfed agriculture was evaluated against the technology used by outstanding farmers. In 109 commercial plots, higher corn yield (7.6 t ha⁻¹) and net income, equivalent to 5.1 t ha⁻¹ of corn, were obtained when the recommended production plan was used with the hybrid maize H-137. The rate of adoption of the recommended technology was higher when the hybrid was used (with yield and net benefits close to those obtained with the recommended package) than when local varieties were used. These varieties were managed with widely varying planting densities and fertilization rates from unbalanced formulas, which caused nutrient deficiency associated with lower yields and net benefits of around 5.3 and 2.8 t ha⁻¹, respectively. When the hybrid HS-2 was used with an auxiliary irrigation schedule, yields of 9.0 t ha⁻¹ were obtained.

Index words: *Zea mays L.*, mineral nutrition, productivity.

INTRODUCCION

Dentro de la región del Plan Puebla, en el cultivo de maíz se ha llegado a una producción cercana a 3 t ha⁻¹ en promedio, con variedades criollas, una fertilización promedio de aproximadamente 130-40-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, respectivamente, la aplicación de fertilizante en la primera y segunda labor de cultivo, y una densidad de población cercana a 40 mil plantas (pl) ha⁻¹ (Díaz *et al.*, 1999). Al respecto, se tiene conocimiento de variaciones grandes en relación con estos valores, como consecuencia del uso de fórmulas de producción desbalanceadas.

Setenta por ciento de la superficie cuenta con diversos tipos de suelos profundos, de humedad

residual, en los cuales se cultivan variedades criollas de maíz de ciclo largo con buen potencial de rendimiento; sin embargo, en la actualidad no se aplican dosis de fertilización y densidades de población adecuadas, de manera oportuna y, prácticamente, no se utilizan los híbridos de buen potencial para la región, con lo cual se podría mejorar el rendimiento de maíz.

Entre otras razones, se tiene el problema de falta de abastecimiento local y oportuno de los fertilizantes y de los materiales de maíz recomendados y, sobre todo, estos últimos no están accesibles para los pequeños productores. Una alternativa a lo anterior fue el establecimiento de un pequeño negocio sobre producción y comercialización del híbrido H-137 (Mendoza *et al.*, 1993), que se llevó a cabo de 1990 a 1993 con el enfoque de microempresas de servicios del Plan Puebla (Mendoza *et al.*, 2000), con el cual se abasteció a los productores cerca de 20 t de semilla.

Con los productores que adquirieron el híbrido, incluyendo otra muestra de productores sobresalientes de maíz que utilizaron las variedades criollas, se llevó a cabo la mayor parte de este estudio, con el objetivo de evaluar la tecnología de producción recomendada *versus* la tecnología de los productores, así como el grado de uso de la misma, lo cual puede considerarse un indicador asociado al grado de fertilidad del suelo, a la nutrición y al manejo del cultivo.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se llevó a cabo en las provincias agronómicas de temporal de muy buena productividad (González *et al.*, 1990), en suelos profundos de humedad residual, localizados en 10 comunidades ubicadas en el área del Plan Puebla y de 1990 a 1992, tres años climatológicamente benignos, así como en seis comunidades de 1998 a 2000, en las cuales también se incluyeron parcelas con riego de auxilio.

Se evaluó el plan de producción de maíz (PPM) recomendado (Turrent *et al.*, 1994), en el cual, independientemente del grado de aplicación de éste, se incluyó la participación del equipo técnico del proyecto de productividad de sistemas agropecuarios del Plan Puebla en conjunto con los productores, contra la tecnología actual de producción de maíz (TAPM) del productor, que consiste en este documento en el uso indistinto de los factores controlables de la producción (fertilización y densidad de población), utilizando tanto a variedades criollas

como a algunas híbridas recomendadas para la región. El trabajo consistió en comparar 88 parcelas comerciales de 0.25 a 1.0 ha, establecidas de 1990 a 1992, y 21 parcelas de 1998 a 2000. En el primer período, además de los criollos, se incluyó al híbrido H-137 del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y, en el segundo período, al híbrido sobresaliente HS-2 del Colegio de Postgraduados y la variedad Puma-1076 de la Universidad Nacional Autónoma de México (los tres materiales mejorados se evaluaron previamente y se seleccionaron por los resultados obtenidos con ellas).

En promedio (referido éste principalmente a la densidad de población), el PPM consistió en la fórmula 160-70-50 000 (kg ha^{-1} de $\text{N-P}_2\text{O}_5$ -plantas ha^{-1}) de 1990 a 1992 y de 1998 a 2000 la misma fórmula con 60 mil plantas ha^{-1} , aplicando una tercera parte de N y todo el fósforo en la siembra y las dos terceras partes de N restantes en la segunda labor de cultivo, con la finalidad de aumentar la productividad por unidad de superficie; la siembra y fertilización se realizaron con la multibarra de tracción animal línea Plan Puebla (surcadora-sembradora-fertilizadora), para incrementar la productividad de la mano de obra y reducir los costos de producción (Mendoza *et al.*, 1994). La TAPM promedio, en este caso, consistió en aproximadamente 10 unidades menos de N y P_2O_5 , 5 mil plantas ha^{-1} menos y la fertilización en la primera y segunda labor de cultivo.

Para realizar el análisis del efecto de las tecnologías sobre la producción y el grado de adopción de las recomendaciones del Plan Puebla por los productores, así como sobre la proporción de la aplicación de la tecnología recomendada por el proyecto de productividad (en el caso de la densidad de población), se utilizó la información de 1990 a 1992; en cambio, la información de 1998 a 2000 se usó para cotejar la vigencia de los datos del primer período, para lo cual se estimaron los rendimientos de grano mediante 10 muestras en cada parcela, así como las dosis de nitrógeno y de fósforo y la densidad de población para cada variedad (criollo y H-137). Con dicha información, se realizó un análisis estadístico (cálculo de las desviaciones estándar), se analizaron los valores mínimos y máximos, y se graficaron las frecuencias relativas acumuladas de los rendimientos, fertilización con nitrógeno y fósforo y densidad de población de cada tecnología (recomendada y del productor). Para estimar la probabilidad de obtener determinados rendimientos, se utilizó la ecuación:

$$P = [N/(n+1)] \times 100$$

Donde: P es la probabilidad (%), N es el número de observaciones de determinado intervalo de rendimientos, o el número de orden de los rendimientos decrecientes para encontrar la probabilidad de un rendimiento específico, y n es el número de observaciones (parcelas) totales (FIRA, 1987). El grado de uso de insumos (N y P₂O₅) y densidad de población se calculó con la ecuación:

$$\text{Uso (\%)} = (N/n) \times 100$$

El análisis estadístico consistió en utilizar el procedimiento GLM (General Linear Model) del paquete SAS (Statistical Analysis System) en microcomputadora, para un diseño de tratamientos 3 x 2 x 2 (año x tecnología x variedad), al cual se le efectuó una prueba de comparación de medias (DMS). También se realizó un análisis de la relación entre el grado de fertilidad del suelo y el manejo del cultivo, con la nutrición de la planta y el rendimiento obtenido.

Además, se efectuó un análisis económico (relación beneficio/costo) para determinar la tecnología que optimiza el ingreso neto; tanto los costos totales de producción (insumos, mano de obra, preparación de la tierra con tractor y labores con yunta), como los ingresos netos, se calcularon en especie (en t de grano de maíz ha⁻¹), debido a que el proceso inflacionario en ciertas épocas dificulta la interpretación, cuando el análisis económico se realiza en pesos. El cálculo del ingreso neto total tiene la finalidad de expresar el grado de rentabilidad de los tratamientos estudiados; sin embargo, con fines de comparación de las fórmulas de producción, se realizó un análisis económico consistente en el cálculo de los costos variables debido al uso de N, P₂O₅ y la variedad (criollo e híbrido), en donde el ingreso incluye los costos fijos. La expresión usada para calcular los costos variables es:

$$CV = nN + pP + sS,$$

Donde: CV es el costo variable, n-p-s son los costos unitarios (kg) de N-P₂O₅-Semilla y N-P-S son las cantidades aplicadas de N-P₂O₅-S, considerando que se requieren 25 kg de semilla para obtener 50 mil plantas. La expresión para estimar el ingreso neto es:

$$IN + CF = yY - CV$$

Donde: IN + CF es el ingreso neto más costos fijos, y es el precio del kg de maíz, Y es el rendimiento obtenido y CV son los costos variables. Los costos utilizados fueron: \$4.00 por kg de N (2.67 kg de maíz), \$5.50 por kg de P₂O₅ (3.67 kg de maíz), \$2.00 por kg de semilla de maíz criollo (1.33 kg de maíz) y \$12.00 por kg de semilla de maíz híbrido (8 kg de maíz); el precio del producto (grano) es de \$1.50 por kg.

RESULTADOS Y DISCUSION

Grado de Uso de los Insumos Recomendados

En el Cuadro 1, se presentan los valores por año y el promedio de insumos y densidad de población utilizados con la tecnología de los productores (TAPM), y los correspondientes a la tecnología recomendada (PPM). En promedio, se aprecia que cuando se utilizó el criollo, la TAPM se asoció con 8 kg ha⁻¹ de N más, 15 kg ha⁻¹ de P₂O₅ menos y 9000 plantas ha⁻¹ menos que el PPM; en cambio, cuando se usó al H-137, las dosis de N, P₂O₅ y la densidad de población, asociadas con la TAPM con respecto al PPM, fueron de 4 y 9 kg ha⁻¹ y de 1000 pl ha⁻¹ menos, respectivamente. Lo anterior indica que cuando se utilizó el H-137, el grado de uso de fertilizantes y de densidad (grado de adopción por los productores) fue mayor que cuando se utilizó el criollo.

En el Cuadro 2 y las Figuras 1 y 2, se muestran las variaciones en el uso de fertilizantes, la densidad y el rendimiento; se observa que éstas fueron mayores en el caso de la TAPM con criollo (76 a 276 kg ha⁻¹ de N, 0 a 92 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 28 mil a 70 000 pl ha⁻¹) que con híbrido (123 a 200 kg ha⁻¹ de N, 46 a 69 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 30 000 a 61 000 pl ha⁻¹); en el caso del PPM, se utilizó una misma fórmula de producción (160-70-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O y de 40 000 a 65 000 pl ha⁻¹). Lo anterior significa que los productores quienes adquirieron el híbrido, son más sobresalientes que aquéllos que sembraron el criollo, en virtud de dichos intervalos en el uso de los insumos, ya que en varios casos de la TAPM se observó el uso de fórmulas muy desbalanceadas, por ejemplo, el uso de N o de estiércol únicamente (sin fósforo y sin nitrógeno y fósforo, respectivamente), o bien, el uso de la fórmula 262-11 (kg ha⁻¹ de N-P₂O₅);

Cuadro 1. Tecnología promedio utilizada en las parcelas comerciales estimadas de 1990 a 1992.

Tecnología ¹	Variedad	1990			1991			1992			Promedio		
		N	P ₂ O ₅	DP ²	N	P ₂ O ₅	DP	N	P ₂ O ₅	DP	N	P ₂ O ₅	DP
		- kg ha ⁻¹ -	- pl ha ⁻¹ -	- - kg ha ⁻¹ - -	- - kg ha ⁻¹ - -	- - pl ha ⁻¹ - -	- - kg ha ⁻¹ - -	- - pl ha ⁻¹ - -	- - kg ha ⁻¹ - -	- - pl ha ⁻¹ - -	- - kg ha ⁻¹ - -	- - pl ha ⁻¹ - -	
TAPM	Criollo			47 000	158	54	42 000	178	56	37 000	168	55	42 000
PPM	Criollo	160	70	57 000	160	70	47 000	160	70	49 000	160	70	51 000
Promedio	Criollo			52 000	159	62	44 500	169	63	43 000	164	63	46 500
TAPM	H-137			56 000	170	63	52 000	142	58	44 000	156	61	51 000
PPM	H-137	160	70	51 000	160	70	52 000	160	70	53 000	160	70	52 000
Promedio	H-137			53 500	165	66	52 000	151	64	48 000	158	66	51 500
Diferencia	H-137- Criollo			1 500	6	4	6 500	-18	6	5 000	-6	3	5 000

¹TAPM = tecnología actual de producción de maíz (del productor). PPM = plan de producción de maíz (recomendado).

²DP = densidad de población. pl = plantas.

en este último caso, se ve claramente que por falta de fósforo un productor añade más N que el requerido, con un efecto detrimental en la nutrición del cultivo y, por consiguiente, en el rendimiento.

Sin embargo, aparentemente, el grado de adopción promedio en el caso de la TAPM, aun en la situación que se utilizó el criollo, es alto para N y mediano para P₂O₅ y densidad de población, lo cual se constata con los niveles recomendados de estos insumos (PPM) (Cuadro 1). Lo que realmente sucede es que en el caso de N, por ejemplo, donde el grado de uso promedio es prácticamente el mismo que el recomendado, la variación en su uso es muy grande (de 76 a 276 kg ha⁻¹) (Cuadro 2). Algo similar ocurre con las otras variables relacionadas con las aplicaciones de fósforo y densidad de plantas, sólo que en estos casos la variación se presenta en su mayoría hacia niveles inferiores de aquéllos recomendados (Figuras 1 y 2).

En el Cuadro 3, se presenta el porcentaje de uso para diferentes dosis de N y P₂O₅ y para la densidad de población en las tecnologías evaluadas y para las dos variedades; en este cuadro puede verse claramente que el H-137 se asocia con niveles y espacios de exploración más adecuados que el criollo. Por

ejemplo, en comparación con la recomendación que incluye un solo tratamiento, en 44% de las parcelas establecidas con criollo en la TAPM, se utilizaron cantidades mayores o iguales a 160 kg ha⁻¹ de N (cuando la cantidad fue mayor, se sobrefertilizó con N), mientras que en el resto (56%) se usó menos de dicha cantidad (se subfertilizó con N); se aplicaron menos de 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ en 81% de las parcelas (se subfertilizó con fósforo) y se usaron menos de 50 000 pl ha⁻¹ en 86% de las parcelas. En el caso de la TAPM establecida con híbrido, este tipo de comportamiento fue diferente, ya que los niveles de insumos aplicados por los productores fueron más apropiados, como se mencionó, con una menor variación en relación con los niveles recomendados (Cuadro 3).

En el Cuadro 4, se aprecia que existe una clara concordancia entre el uso de fórmulas desbalanceadas, fórmulas balanceadas y aquellas parcelas sobre-fertilizadas o subfertilizadas con el rendimiento, los costos de producción variables y, por lo tanto, con el ingreso. Así, en el caso de la TAPM, cuando se usó el criollo, en promedio el uso de fórmulas desbalanceadas (relación N/P₂O₅ = 5.1, cuando éstas

Cuadro 2. Valores máximos y mínimos de fertilizantes y densidad de población utilizados, desviaciones estándar, rendimientos, costos e ingresos netos asociados.

Tecnol. ¹	Variedad	N (±DE)	P ₂ O ₅ (±DE)	DP (±DE) ²	Rendim. (±DE)	Costo ³	Ingreso	Rel. B/C
		- - - - - kg ha ⁻¹ - - - - -	- - - - - kg ha ⁻¹ - - - - -	- - - - - mp ha ⁻¹ - - - - -	- - - - - t grano ha ⁻¹ - - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -
TAPM	Criollo	76 a 276 (51)	0 a 92 (27)	28 a 70 (8)	1.4 a 7.4 (1.1)	2.5	2.8	1.12
PPM	Criollo	160 (0)	70 (0)	40 a 65 (6)	5.1 a 8.0 (0.7)	2.3	3.8	1.65
TAPM	H-137	123 a 200 (24)	49 a 69 (11)	30 a 61 (8)	3.4 a 10.0 (1.6)	2.7	4.6	1.70
PPM	H-137	160 (0)	70 (0)	39 a 62 (6)	5.5 a 10.9 (1.2)	2.5	5.1	2.04

¹TAPM = tecnología actual de producción de maíz (del productor). PPM = plan de producción de maíz (recomendado).

²DP = densidad de población en miles de plantas ha⁻¹. DE = desviación estándar.

³Costo total e ingreso neto. Relación Beneficio Neto/Costo Total, que indica la ganancia adicional por peso invertido.

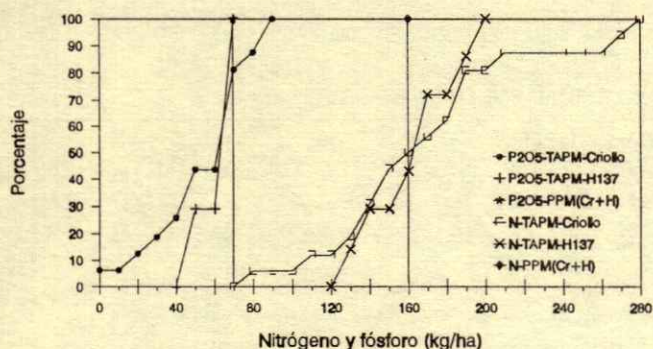


Figura 1. Frecuencias relativas acumuladas de la dosis de nitrógeno y fósforo.

deben arrojar valores de 2 a 3), el rendimiento fue de 3.2 t ha⁻¹, asociado con un ingreso también muy bajo; en cambio, la utilización de fórmulas balanceadas, tanto de la TAPM como del PPM (relación N/P₂O₅ = 2.6 y 2.3, respectivamente), se asociaron con rendimientos de alrededor de 6 t ha⁻¹ y con beneficios mucho mayores. La sobre y subfertilización con N y P₂O₅, también ocasionaron pérdidas en el rendimiento (de 0.7 a 1.6 t ha⁻¹) al igual que las fórmulas desbalanceadas, en función de la tecnología recomendada (Cuadro 4), excepto en las parcelas sobrefertilizadas con P₂O₅ en las cuales esto fue todavía aceptable. En este caso, la sobre y subfertilización se consideró para aquellas parcelas que recibieron más de 170 y menos de 150 kg de N ha⁻¹, así como más de 70 y menos de 60 kg de P₂O₅ ha⁻¹, respectivamente.

De acuerdo también con el Cuadro 4, 44% de los productores utilizan una fertilización deficiente en N y en P₂O₅, 37 y 12% de los agricultores realizan una fertilización excesiva de estos nutrientes, respectivamente (cálculos realizados para cada

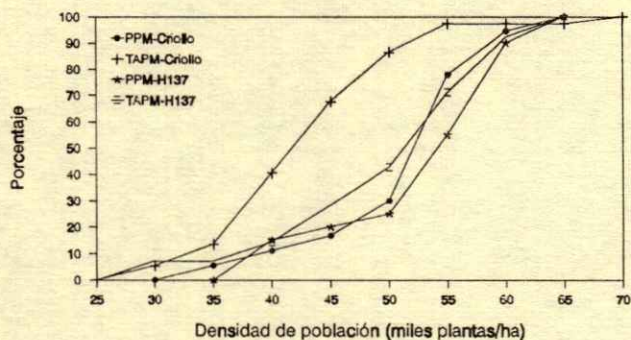


Figura 2. Frecuencias relativas acumuladas de la densidad de población.

nutrimento); el uso de fórmulas desbalanceadas se asocia con 42% de los productores (cálculos realizados para la fórmula de N y P₂O₅). El rendimiento se afecta, como se explicó en el párrafo anterior, de tal manera que, de acuerdo con este estudio y considerando la existencia en el Plan Puebla de 51 y 56 mil ha de siembras de maíz con el sistema de humedad residual (CIMMYT, 1974; González *et al.*, 1990), debido a la sobre y subfertilización se dejan de cosechar en el Plan Puebla cada año, en promedio, cerca de 1 t ha⁻¹, o sea, más de 50 000 t en la condición con suelos de humedad residual. En tanto que los costos variables de producción se incrementan alrededor de 150 kg de maíz por ha con la sobrefertilización (para ambos nutrientes), en comparación con la tecnología recomendada y las fórmulas balanceadas, y se reducen en aproximadamente 100 kg de maíz por ha en el caso de la subfertilización y el uso de las fórmulas desbalanceadas. Esto es, considerando las fórmulas de producción completas (N-P₂O₅-Semilla), pero, por ejemplo, la sobrefertilización con N en promedio tiene un costo adicional a la cantidad recomendada de 150 kg de maíz; sin embargo, se tiene el caso de dos parcelas en que dicho costo adicional fue de 290 kg de maíz.

Por el grado de respuesta obtenido con ambas tecnologías (TAPM y PPM), se deduce que no es conveniente utilizar cantidades superiores a las recomendadas (160 kg ha⁻¹ de N y 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Estas dosis son razonables de acuerdo con Konno *et al.* (1994), quienes describieron el concepto de capacidad ambiental de asimilación de nitrógeno (CAAN) y su aplicación en Japón; la definieron como la cantidad anual de N que puede aplicarse a un suelo agrícola, que satisface simultáneamente los requerimientos para la productividad agrícola y para la preservación ecológica, que en un cultivo de arroz inundado no debe rebasar la dosis de 330 kg ha⁻¹ año⁻¹. De esta manera, se logra que las aguas de lavado de los terrenos agrícolas contengan una concentración de N-NO₃, en cantidades que las hace potencialmente potables.

Smaling *et al.* (1993) indicaron que la extracción de nutrientes minerales por los cultivos no es causa única de su salida del suelo; también lo es el lavado en aguas de infiltración profunda y en aguas de escurrimiento superficial. Buol (1994) añadió que el manejo racional de los nutrientes minerales debe buscar la sincronía con la extracción por los cultivos,

Cuadro 3. Porcentaje de uso de N, P₂O₅ y densidad de población en las tecnologías de producción evaluadas de 1990 a 1992.

Tecn. [†]	Var.	Porcentaje de uso de N, P ₂ O ₅ y densidad de población ≥ a las cantidades indicadas																		
		70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
		Nitrógeno, kg de N ha ⁻¹																		
TAPM	Criollo	94	94	94	88	88	81	69	56	50	44	38	19	19	13	13	13	13	13	6
TAPM	H-137	0	0	0	0	0	0	86	71	71	57	28	28	14	0	0	0	0	0	0
		Fósforo, kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹																		
TAPM	Criollo				10		20		30		40		50		60		70		80	
TAPM	H-137	0			0		0		0		0		71		71		0		0	
		Densidad de población, miles de plantas ha ⁻¹																		
TAPM	Criollo	30			35		40		45		50		55		60		65		65	
TAPM	H-137	95			86		60		32		14		3		3		3		3	
PPM	Criollo	93			93		86		72		57		29		8		8		0	
PPM	H-137	0			0		89		82		70		22		6		6		0	
PPM	H-137	0			0		85		80		75		45		10		10		0	

[†] TAPM = tecnología actual de producción de maíz (del productor). PPM = plan de producción de maíz (recomendado).

para hacer mínima la eutrofización de la ecología (reducción del oxígeno por organismos parásitos como algas, lo que ocasiona la muerte de animales y otros organismos). En circunstancias de deficiencia extrema de nutrimentos, el uso de fertilizantes contribuye a limitar la erosión hídrica a través de incrementar la producción de biomasa vegetal (Ríos, 1991). Todo lo anterior se menciona porque,

normalmente, en la agricultura tradicional (de temporal) se critica el uso de dosis de fertilización del orden de magnitud a las recomendadas en este trabajo, señalándose que éstas son muy altas; sin embargo, en las condiciones del valle de Puebla se observa que éstas son factibles en términos de las respuestas observadas y de acuerdo con la literatura revisada.

Cuadro 4. Análisis agronómico y económico de diferentes fórmulas de producción (balanceadas, desbalanceadas, sobrefertilizadas y subfertilizadas).

Tecnología [†]	Variedad	N	P ₂ O ₅	Relac. N/P ₂ O ₅	DP pl ha ⁻¹	Porciento	Rend.	Pérdidas t ha ⁻¹	CV [‡]	IN + C F [‡]
Fórmulas desbalanceadas										
TAPM	Criollo	172	34	5.1	36 000	42	3.2	2.9	0.60	2.6
TAPM	H-137	§	§		35 000	22	4.6	3.0		
Fórmulas balanceadas										
TAPM	Criollo	164	64	2.6	42 000	58	5.7	0.4	0.70	5.0
TAPM	H-137	159	620	2.6	53 000	78	8.0	-0.4	0.86	7.1
Tecnología recomendada										
PPM	Criollo	160	70	2.3	51 000	100	6.1	0	0.72	5.4
PPM	H-137	160	70	2.3	52 000	100	7.6	0	0.89	6.7
Sobrefertilización con N										
TAPM	Criollo	217	57	3.8	42 000	37	5.4	0.7	0.82	4.6
Subfertilización con N										
TAPM	Criollo	126	47	2.7	37 000	44	4.7	1.4	0.53	4.2
Sobrefertilización con P ₂ O ₅										
TAPM	Criollo	184	92	2.0	41 000	12	6.1	0	0.85	5.2
Subfertilización con P ₂ O ₅										
TAPM	Criollo	183	29	6.3	40 000	44	4.5	1.6	0.62	3.9

[†] TAPM = tecnología actual de producción de maíz (del productor). PPM = plan de producción de maíz (recomendado).

[‡] CV significa costos variables, IN + CF significa ingresos netos + costos fijos.

§ Se aplicaron únicamente 100 t ha⁻¹ de estiércol fresco de bovino en una de las parcelas.

Rendimientos de Maíz

Los resultados del análisis estadístico mostraron diferencias altamente significativas debido a los efectos principales de los factores variedad y tecnología, no así para el caso de año, ni para las interacciones de dos o tres factores; tampoco fue significativo el efecto de sitio, o sea, no hubo diferencias estadísticas entre los rendimientos de las diferentes parcelas de cada uno de los tratamientos generados (Cuadro 5) en el factorial 3 x 2 x 2 (año, variedad y tecnología), aun en las condiciones de variabilidad observadas. El efecto de tecnología fue de 1.1 t ha⁻¹ a favor del plan de producción de maíz recomendado (PPM), *versus* la tecnología del productor (TAPM), mientras que el de variedad fue de 2.0 t ha⁻¹ asociado con el H-137 en comparación con el criollo (Cuadro 5), en tanto que las diferencias mínimas significativas a 1% de probabilidad

(DMS_{α=0.01}) fueron de 0.78 y 0.79 t ha⁻¹, respectivamente, para tecnología y variedad.

De acuerdo con lo anterior, en el Cuadro 5 se observa que en las condiciones de suelos profundos de humedad residual, el híbrido superó al criollo en promedio en 1.4, 2.2 y 2.1 t ha⁻¹, respectivamente, en 1990, 1991 y 1992. También se aprecia que hay mayores rendimientos asociados a la tecnología recomendada respecto a la del productor y que esta respuesta (diferencia) es mayor cuando se utiliza el criollo, debido a que en el caso del híbrido con la TAPM el productor utilizó, en promedio, casi el mismo tratamiento que el recomendado (PPM). Sin embargo, en el criollo el productor usó dosis de N muy variables y menores cantidades de fósforo y densidad de población, por lo cual los rendimientos promedio fueron más bajos.

En el período de 1998 a 2000, se observa que los rendimientos fluctuaron de 4.0 t ha⁻¹ en 1999 con

Cuadro 5. Respuesta de dos variedades de maíz y dos tecnologías de producción durante tres años en la condición de temporal en suelos de humedad residual.

Tecnología ¹	Variedad	Régimen hídrico ²	Rendimiento			
			1990 (n) ³	1991 (n)	1992 (n)	Promedio (n)
----- t ha ⁻¹ -----						
TAPM	Criollo	Temporal	5.5 (08)	5.3 (13)	5.0 (14)	5.3 (35)
PPM	Criollo	Temporal	6.3 (05)	5.6 (06)	6.5 (07)	6.1 (18)
Promedio	Criollo		5.9 (13)	5.4 (19)	5.7 (21)	5.7 (53)
TAPM	H-137	Temporal	7.0 (02)	7.4 (07)	7.5 (05)	7.3 (14)
PPM	H-137	Temporal	7.3 (03)	7.8 (05)	7.7 (13)	7.6 (21)
Promedio	H-137		7.2 (05)	7.6 (12)	7.6 (18)	7.5 (35)
Promedio anual general ⁴			6.2 (18)	6.2 (31)	6.5 (39)	NS
PPM-TAPM	Diferencia		0.9 (18)	0.6 (31)	1.6 (39)	1.1 (88)**
Diferencia ¹	H-137-Criollo		1.4 (18)	2.2 (31)	2.1 (39)	2.0 (88)**
----- t ha ⁻¹ -----						
			Rendimiento			
			1998 (n)	1999 (n)	2000 (n)	Promedio (n)
----- t ha ⁻¹ -----						
TAPM	Criollo	Temporal		4.0 (02)	5.6 (02)	4.8 (04)
TAPM	Criollo	Riego aux.		5.3 (02)		5.3 (02)
PPM	Híbrido [#]	Temporal		6.5 (03)	7.2 (02)	6.9 (05)
PPM	Híbrido [#]	Riego aux.	8.6 (03)	10.3 (03)	8.0 (04)	9.0 (10)
Total			(03)	(10)	(08)	(21)

** Diferencias altamente significativas: DMS_{0.01} = 0.78 t ha⁻¹ para tecnología y DMS_{0.01} = 0.79 t ha⁻¹ para variedad. NS = Diferencias no significativas.

El coeficiente de variación (CV) fue de 21.7%.

¹TAPM = tecnología actual de producción de maíz (del productor). PPM = plan de producción de maíz (recomendado).

²Condiciones de temporal en suelos de humedad residual y, en su caso, con riego de auxilio.

³(n) = número de parcelas comerciales estimadas con 10 muestras cada una en promedio.

⁴Promedio ponderado por el número de observaciones (n).

[#]En 1998 y 1999 las parcelas se sembraron con el híbrido HS-2 del Colegio de Postgraduados y en el 2000 con el Puma-1076 de la Universidad Nacional Autónoma de México.

criollo en condiciones de temporal, hasta 10.3 t ha^{-1} en el mismo año utilizando el HS-2 con riego de auxilio, un mejor híbrido desarrollado para riego en suelos profundos; en promedio, los rendimientos para la TAPM con las variedades criollas fueron de alrededor de 5 t ha^{-1} ; ahora bien, para el PPM con híbridos en temporal, los rendimientos fueron aproximadamente de 7 t ha^{-1} , mientras que éstos con riego fueron de 9 t ha^{-1} . Los rendimientos para este período resultan en aproximadamente media tonelada menos que sus homólogos del período anterior, incluyendo al tipo de tecnología (TAPM y PPM) y a la variedad (criollo y al híbrido). El rendimiento está influido por un menor número de observaciones y es un buen indicador de que el análisis realizado en el primer período es vigente en virtud de que el rendimiento del segundo período no difiere del primero.

En la Figura 3, se muestran las frecuencias relativas acumuladas del rendimiento de las dos variedades de maíz (criollo y H-137), para ambas tecnologías (recomendada y del productor), con las cuales fue posible calcular la probabilidad para la obtención de determinados rendimientos (Cuadro 6). Se aprecia que hay rendimientos desde 3 hasta 6 t ha^{-1} , con una alta frecuencia, cuando se utiliza la tecnología del productor (TAPM) con maíz criollo, mientras que si se usa el plan de producción recomendado (PPM) con dicha variedad, los rendimientos fluctúan de 5 a 7 t ha^{-1} ; en cambio, el H-137 con ambas tecnologías se asocia con rendimientos que van de 6 a 10 t ha^{-1} (aproximadamente con 85% de probabilidad).

Lo anterior indica que hay una gran variabilidad en los rendimientos asociada, por un lado, con el efecto de los factores y tratamientos estudiados (tecnología sobre fertilización y densidad de población, variedad y sus combinaciones) y, por otro lado, variabilidad debida al efecto de otros factores de manejo (fecha de siembra, cultivo anterior, uso de estiércol, grado de control de las hierbas, etc.) y de factores del suelo y del clima. Dentro del PPM para ambas variedades, como se trata básicamente de una sola fórmula de producción, está claro que la variabilidad en los rendimientos se debe al resto de factores de manejo que involucra la tecnología, así como aquéllos debidos al suelo y al clima. En cambio, en el caso de la TAPM, dicha variabilidad se debe a estas razones, además de aquéllas por concepto de la no aplicación de una misma fórmula de producción, o sea, al uso de diferentes cantidades de insumos, lo cual ya se ha mencionado reiteradamente.

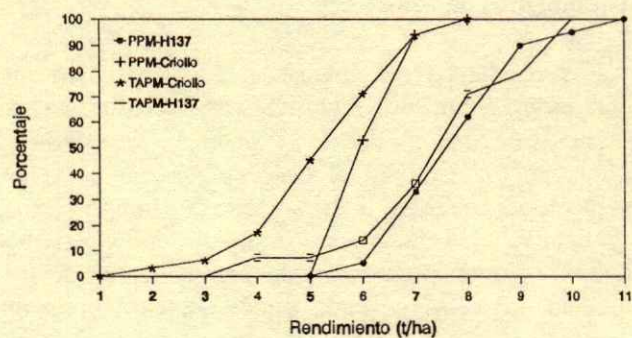


Figura 3. Frecuencias relativas acumuladas de los rendimientos de maíz.

En las Figuras 4 y 5, se presentan las relaciones causa-efecto existentes entre el uso de nitrógeno, fósforo y densidad de población y los rendimientos de maíz para la TAPM; se observan niveles de respuesta a 140 kg ha^{-1} de N, 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 y $50\,000 \text{ pl ha}^{-1}$, tanto con el criollo como con el híbrido (hay un caso de respuesta del criollo a 190 kg de N), con fluctuaciones en los rendimientos debidas a la variación en el uso de dichos insumos (3 a 7 t de grano ha^{-1} por efecto de N y P_2O_5 y de 1 a 7 t de grano ha^{-1} por densidad de plantas en el caso del criollo, mientras que en el H-137 fueron de 7 a 10 t ha^{-1} , debido a N y P_2O_5 , y de 4 a 9 t ha^{-1} por densidad), así como también debido a un efecto derivado de las diversas condiciones de producción de cada parcela ya mencionadas, el cual busca reducirse con el número de observaciones (parcelas y número de muestras en la estimación de los rendimientos de cada parcela).

En el PPM se utilizó una sola fertilización, mientras que en la densidad de población hubo una respuesta a $50\,000 \text{ pl ha}^{-1}$, lo cual es congruente con lo esperado, sólo que se recomiendan densidades de población mayores ($60\,000 \text{ pl ha}^{-1}$) para incrementar la producción de rastrojo.

Algunos efectos de los factores de manejo que no se contemplaron, pero implícitos en el estudio, como ya se mencionó, son los relacionados con la rotación de cultivos y el manejo previo del terreno, o sea, con el uso de estiércol bovino, el cual tiene efectos sobre la producción durante tres años, así como el cultivo anterior; en la región los más comunes son el maíz, el frijol de mata, la alfalfa y las hortalizas. En este sentido, Ludwick (1994) indicó que 1) en la rotación maíz-avena-alfalfa y en la de maíz-maíz, el uso de estiércol, fertilizantes a base de N, P y K, y cal fue

Cuadro 6. Probabilidades de obtener determinados intervalos de rendimiento durante el periodo de 1990 a 1992.

Tecnología ¹	Variedad	Probabilidad (%) de obtener rendimientos (t ha ⁻¹) ≥ a:									
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
TAPM	Criollo	97	94	92	81	53	28	6	0	0	0
PPM	Criollo	0	0	0	95	47	5	0	0	0	0
TAPM	H-137	0	0	93	87	87	80	60	27	20	0
PPM	H-137	0	0	0	95	95	91	64	36	9	5

¹TAPM = tecnología actual de producción de maíz (del productor). PPM = plan de producción de maíz (recomendado).

necesario para sostener una alta productividad del suelo, 2) la combinación de la rotación y el uso de fertilizantes se asociaron con el máximo rendimiento de maíz, y 3) la utilización de fertilizantes, por intensa que sea, no es capaz de sustituir el efecto de la rotación.

Nivel de Nutrición del Cultivo

En el Cuadro 7, se observa que el nivel de fertilidad del suelo (con base en la fórmula de fertilización utilizada) y el manejo del cultivo (densidad de población, variedad) están relacionados con la nutrición del cultivo (también con base en la fórmula utilizada), que se infiere por medio de los rendimientos obtenidos. Se aprecia que el uso de fórmulas desbalanceadas (sólo N, sólo estiércol, relaciones N/P₂O₅ anormales, densidades de población muy bajas, etc.), conlleva a niveles de nutrición deficientes de los cultivos y, por lo tanto, a rendimientos bajos (3.4 t ha⁻¹), mientras que las fórmulas balanceadas con relaciones N/P₂O₅ del orden de 2.5, se asocian con niveles de nutrición adecuados y rendimientos altos (6.0 t ha⁻¹ con criollo y 7.6 t ha⁻¹ con H-137). La parcela que se sembró con H-137 y sin fertilizante químico, pero con 100 t ha⁻¹

de estiércol fresco de bovino se asoció con 5.9 t ha⁻¹ de maíz; en cambio, el promedio de siete parcelas con este híbrido, mediante la fórmula 166-63-52 000 (kg de N-P₂O₅-planta ha⁻¹) se asoció con un rendimiento de 7.6 t ha⁻¹, lo cual indica que aplicar estiércol únicamente no es suficiente para lograr una buena nutrición y productividad del cultivo.

Análisis Económico

En el Cuadro 2, se presenta el análisis económico para las tecnologías y variedades evaluadas, considerando los costos totales de producción. Estos fueron más altos en el caso de la TAPM, debido a que, por un lado, el uso de insumos fue cercano al del PPM y, por otro, en este último se obtuvo una ganancia de 0.2 t ha⁻¹ de maíz por concepto de ahorro de mano de obra en las labores de siembra, fertilización y labores de cultivo, y por el menor costo de la mecanización con la multibarra.

Se observa que el tratamiento que optima la producción es el PPM con el uso del H-137 (mayor relación beneficio/costo), con un beneficio neto de 5.1 t ha⁻¹ de grano de maíz. La TAPM con híbrido es una mejor alternativa que con criollo, debido a que en este caso se intensifica y racionaliza el uso de los insumos, por lo cual se generan ingresos netos con esta tecnología de 4.6 t ha⁻¹. La TAPM con criollo fue la que se asoció con menores ganancias (2.8 t ha⁻¹) y una menor relación beneficio/costo; sin embargo, dicho orden de magnitud es importante en el caso del cultivo de maíz ya que, como se mencionó anteriormente, el presente estudio se llevó a cabo con productores sobresalientes.

En cuanto al análisis económico del Cuadro 4, con base en el cálculo de los costos de producción variables, se observa que éstos fluctuaron del orden de magnitud de 0.6 a 0.9 t ha⁻¹ de maíz, dependiendo del tipo de fórmula de producción utilizada; de esta forma, se obtienen ingresos netos más costosos fijos de 2.6 a 7.1 t ha⁻¹, para el caso de fórmulas

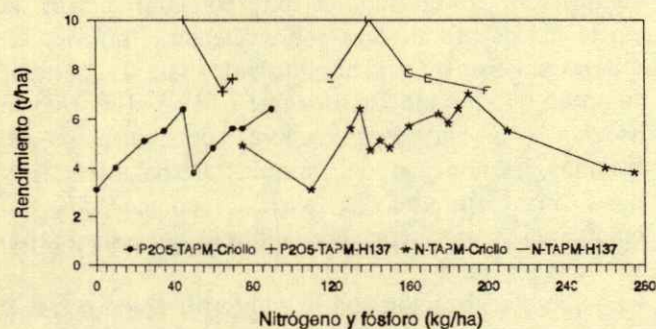


Figura 4. Tendencia de los rendimientos de maíz con relación a la dosis de nitrógeno y fósforo.

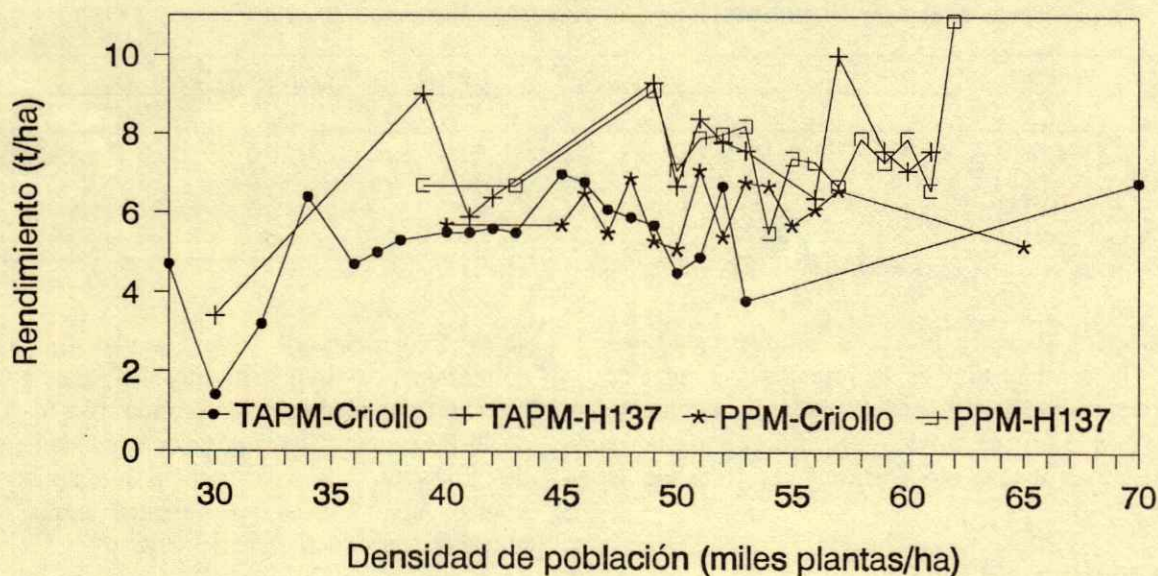


Figura 5. Tendencia de los rendimientos de maíz con relación a la densidad de población.

Cuadro 7. Relación entre el nivel de fertilidad del suelo y el manejo del cultivo con la nutrición de la planta y el rendimiento obtenido en suelos de humedad residual.

Fórmula			Relación N/P ₂ O ₅	Densidad de población		No. Obs.	Nutrición de la planta	Rendimiento		
N	P ₂ O ₅	Categoría		Cantidad	Categoría			Variedad	Cantidad	Categoría
-- kg ha ⁻¹ --				pl ha ⁻¹				t ha ⁻¹		
167	40	Desbalanceada [†]	4.2	36 000	Baja	Criollo	10	Deficiente	3.40	Bajo
167	63	Balanceada	2.7	43 000	Regular	Criollo	18	Buena	5.98	Buena
160	70	Balanceada	2.3	49 000	Optima	Criollo	13	Buena	6.02	Buena
160	70	Balanceada	2.3	52 000	Optima	H-137	18	Buena	7.70	Alto
156	91	Balanceada	2.6	48 000	Optima	H-137	11	Buena	7.50	Alto

[†] Se compone de: 76-69-42 000, 109-00-32 000, 142-69-28 000, 276-46-53 000, 138-46-32 000, 262-11-38 000 (kg de N-P₂O₅-plantas ha⁻¹, respectivamente).

desbalanceadas de la TAPM con criollo y fórmulas balanceadas de la misma tecnología con híbrido, respectivamente.

CONCLUSIONES

- Los resultados del análisis estadístico de los rendimientos de maíz expresan diferencias altamente significativas con respecto a la variedad (el híbrido superó al criollo en 2 t ha⁻¹) y a la tecnología (el PPM rebasó a la TAPM en 1 t ha⁻¹), no así en el caso de año ni del efecto de sitio (entre parcelas con el mismo tratamiento).

- La tecnología recomendada superó, de manera amplia, a la de los productores, fundamentalmente cuando se utilizaron las variedades criollas; sin embargo, cuando los productores utilizaron el híbrido,

los rendimientos obtenidos fueron cercanos a los del plan de producción de maíz recomendado.

- De acuerdo con la conclusión anterior, el grado de uso (adopción) de la tecnología recomendada fue mayor y más eficiente por aquellos productores que adquirieron el híbrido H-137, lo cual indica la existencia de productores sobresalientes a quienes les interesa invertir más en el cultivo de maíz. Lo anterior significa que los productores que usaron el híbrido se asocian con intervalos menores de aplicación de insumos, menor uso de fórmulas desbalanceadas y dosis más aproximadas a las recomendadas, en comparación con los agricultores que sembraron variedades criollas.

- La sobrefertilización con N, subfertilización con N y P₂O₅ y el uso de fórmulas desbalanceadas con respecto a N, P₂O₅ y densidad de población, están

ocasionando pérdidas en los rendimientos de casi 1 t ha^{-1} en los suelos de humedad residual (más de 50 000 ha en el Plan Puebla), incrementos en los costos variables ($150 \text{ kg de maíz ha}^{-1}$) y menores ingresos, con relación a las fórmulas recomendadas.

- Por el grado de respuesta obtenido, se infiere que cuando se utilizaron fórmulas de producción balanceadas, se obtuvieron niveles adecuados de fertilidad del suelo y de nutrición del cultivo, no así cuando se usaron fórmulas desbalanceadas.

- La rentabilidad por unidad de superficie del cultivo de maíz con ciertas condiciones de producción (humedad residual) queda demostrada en este estudio, si bien, por un lado, influyó que éste se condujera en años climatológicamente benignos, pero, por otro lado, el tipo y niveles de los factores considerados en la tecnología fueron importantes, como: la dosis de fertilización con nitrógeno y fósforo, la densidad de población y la variedad. Sin embargo, la escala de operación en el cultivo de maíz es un factor importante a considerar en estudios futuros sobre la rentabilidad del maíz como monocultivo.

- En este tipo de estudios, es necesario obtener información más detallada sobre los costos y factores no controlables de la producción importantes, sobre factores de manejo como uso de estiércoles, fechas de siembra, rotaciones de cultivos, intercalado del maíz en los huertos de frutales, y relacionar estos factores con los grados de respuesta, para generar recomendaciones más precisas para cada condición en función de las necesidades del cultivo, y aplicar sólo la cantidad de fertilizante requerida para contribuir a la preservación de los recursos.

LITERATURA CITADA

- Buol, S.W. 1994. Soil, societies yoke to the earth. pp. 89-103. *In*: J.D. Etchevers B., A. Aguilar S., R. Núñez E., G. Alcántar G. y P. Sánchez G. (eds.). Vol. 1. Transactions 15th World Congress of Soil Science. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- CIMMYT. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 1974. El Plan Puebla, siete años de experiencia: 1967-1973. Análisis de un programa para ayudar a agricultores minifundistas de subsistencia a aumentar su producción en una región de temporal de México. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. El Batán, México.
- Díaz C., H., L. Jiménez S., R.J. Laird y A. Turrent F. 1999. El Plan Puebla, 25 años de experiencia: 1967-1992. Análisis de una estrategia de desarrollo de la agricultura tradicional. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- FIRA. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. 1987. Instructivos técnicos de apoyo para la formulación de proyectos de financiamiento y asistencia técnica. Serie agricultura: Suelos. Banco de México. México, DF.
- González A., I.J., A. Turrent F. y R. Avelaño S. 1990. Provincias agronómicas de las tierras de labor bajo temporal en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, DF.
- Konno, T., M. Uwasawa y Y. Ozaki. 1994. Future prospect for integrated farming systems in Japan in relation to mineral cycling and sustainable agroecosystem to establish the environmental preservation type system. pp. 10-19. *In*: J.D. Etchevers B., A. Aguilar S., R. Núñez E., G. Alcántar G. y P. Sánchez G. (eds.). Vol. 5a Transactions 15th World Congress of Soil Science. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Ludwick, A.E. 1994. Maximum yield research. pp. 2-12. *In*: J.D. Etchevers B., A. Aguilar S., R. Núñez E., G. Alcántar G. y P. Sánchez G. (eds.). Research for maximum yield in harmony with nature. Transactions 15th World Congress of Soil Science. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Mendoza R., R., E. Aceves R., J.I. Cortés F., G. González V. y A. Turrent F. 1993. Evaluación, producción y comercialización de semilla certificada de maíz H-137 con pequeños productores del valle de Puebla: Informe de 1990 a 1992. Documento interno, Plan Puebla, Colegio de Postgraduados. Puebla, Pue.
- Mendoza R., R., J.I. Cortés F., A. Turrent F., J.J. Castellón G. y J. Díaz A. 1994. Desarrollo de la multibarra portaimplementos de tracción animal línea Plan Puebla. 1a ed. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México.
- Mendoza R., R., J.I. Cortés F., A. Turrent F., E. Hernández R., L.A. Lerma V. y E. Aceves R. 2000. Establecimiento de microempresas familiares de servicios para promover la producción agropecuaria. Catálogo de fichas técnicas, Parte II: Sistema de agronegocios en traspaso familiar, Capítulo 15. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural-Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Ríos B., D. 1991. La fertilización, componente de las prácticas de conservación de suelos. p. 400. *In*: Memorias del XXV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Smaling, E.M.A., J.J. Stoorvogel y P.N. Windmeier. 1993. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. II. District scale. *Fert. Res.* 35: 237-250.
- Turrent F., A. y R. Moreno D. 1995. La producción sostenible de alimentos de origen vegetal en el mundo. *Terra* 16: 93-111.
- Turrent F., A., J.I. Cortés F., R. Mendoza R., J.L. Alonso A., J. Díaz A., C. Bársenas S., E. Inzunza I. y N. Estrella Ch. 1994. Desarrollo de un prototipo de explotación agropecuaria familiar para el Distrito de Desarrollo Rural de Cholula-Plan Puebla. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

DESBALANCE NUTRIMENTAL Y RESPUESTA EN RENDIMIENTO EN EXPERIMENTOS DE FERTILIZACIÓN EN NOGAL PECANERO

Nutritional Imbalance and Response in Yield in Experiments of Fertilization in Pecan Tree

Ma. del Consuelo Medina Morales¹

RESUMEN

Se analizaron los datos de cinco experimentos de fertilización en nogal pecanero (*Carya illinoensis*), con aplicaciones de N, P, K, Zn y Mn. El objetivo fue demostrar que un aumento en la concentración foliar y una reducción en el Índice de Desbalance Nutricional (IDN) determinan cuál fue el mejor tratamiento de fertilización aplicado. Con el Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS) se calculó el IDN a la concentración foliar de nutrientes de cada experimento. Además, el IDN se relacionó con el rendimiento de nuez. En los experimentos donde sobresalió estadísticamente un tratamiento de fertilización, se incrementó la concentración foliar del nutriente aplicado y se redujo el IDN el cual coincidió con el rendimiento mayor. En los experimentos donde no sobresalió ningún tratamiento de fertilización, los resultados obtenidos fueron opuestos.

Palabras clave: *Carya illinoensis*, *nutrición foliar*, *DRIS*.

SUMMARY

Data of five experiments of fertilization in pecan (*Carya illinoensis*) with application of N, P, K, Zn, and Mn were analyzed. The objective was to explain whether an increase in the foliar concentration and a reduction in the Nutritional Imbalance Index (IDN) determine which was the best fertilization treatment applied. The IDN at the foliar concentration of nutrients of each experiment was estimated by the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). Additionally, the IDN was related with nut

yield. In those experiments where an outstanding fertilization treatment was detected, the foliar concentration of a nutrient applied was increased and the IDN was reduced, which coincided with the highest yield. In those experiments where no outstanding fertilization treatment was observed, opposite results were obtained.

Index words: *Carya illinoensis*, *foliar nutrition*, *DRIS*.

INTRODUCCION

En nogal pecanero, la respuesta en rendimiento a los fertilizantes aplicados ha sido variable. La mayoría de los experimentos no reporta una respuesta significativa en rendimiento a corto plazo. Worley (1974) aplicó cinco tratamientos de N-P-K al suelo durante 10 años (1962-1971): 1) 0-0-0, 2) 22-10-19, 3) 45-20-37, 4) 90-39-74 y 5) 134-59-112 kg ha⁻¹. Los suelos eran ácidos y se aplicaron 2.2 toneladas métricas por hectárea de dolomita (Ca y Mg) en 1963 y se aplicó Zn foliarmente. Los árboles eran del cv. Stuart y no hubo diferencia significativa en rendimiento hasta el octavo y décimo año, independientemente de la alternancia, con el Tratamiento 3: 45-20-37.

Smith *et al.* (1985) realizaron un experimento factorial durante seis años. El piso de la huerta se mantuvo con césped nativo segado fuertemente y no se suplementó riego, sólo el agua de lluvia. Aplicaron cuatro dosis de N: 0, 56, 112 ó 224 kg ha⁻¹ y tres dosis de K: 0, 93 ó 186 kg ha⁻¹; encontraron que el rendimiento de nuez se incrementó con la aplicación de 56 kg ha⁻¹ de N. Sólo en un año (1979) hubo respuesta en rendimiento con la aplicación de 186 kg ha⁻¹ de K y el rendimiento acumulado (el cual es un mejor indicador de la respuesta del árbol) fue positivamente correlacionado con la dosis de K.

Durante siete años, Hunter y Hammar (1961) aplicaron N-P-K a la dosis de 50 y 100 libras árbol⁻¹ de las fórmulas: 8-8-8, 0-8-8, 0-16-8 y 0-8-16. El suelo tenía un alto porcentaje de arcilla y era compacto

¹ Campo Experimental La Laguna. Centro de Investigación Regional Norte-Centro. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Apartado Postal 247, 27000 Torreón, Coahuila. (celala@halcon.laguna.ual.mx)

a horizontes más bajos. Durante cinco años, entre los árboles se sembró avena y zacate en el otoño y se suspendió cuando se sembró trébol, no se aplicó fertilizante a estos cultivos de cobertera. Los fertilizantes no afectaron el rendimiento, 85% de la producción total se produjo en dos años.

La aplicación foliar de K, en forma de nitrato de potasio (KNO_3), incrementó el rendimiento del nogal en el segundo año, cuando la aplicación se hizo en mayo (Hunter, 1967). Los tratamientos fueron: 1) testigo sin aplicación, 2) dos aplicaciones en mayo con 1.8 kg de KNO_3 , 3) dos aplicaciones en mayo con 3.6 kg de KNO_3 , y 4) dos aplicaciones en agosto con 3.6 kg de KNO_3 . Todas las dosis en 380 L de agua.

El Zn es el nutrimento más deficiente en nogal pecanero, sobre todo en suelos calcáreos (O'Barr, 1977). En un experimento durante tres años, se encontró un efecto residual del Zn en el follaje de un año a otro. La dosis de 3.3 L de Nitrozinc (NZN) en 1000 L de agua fue adecuada. Los niveles altos de 9 L de NZN parecen ser depresivos para el rendimiento (Storey *et al.*, 1979). En la Región Lagunera no se encontró respuesta en rendimiento, al aplicar 4.5 L de NZN en 1000 L de agua durante tres años. Se probaron cero, una, dos, tres y cinco aplicaciones y se encontró que después de dos aplicaciones, aunque se incrementaba la concentración de Zn en el follaje, el rendimiento se reducía (Medina y Chávez, 1999).

Los resultados anteriores indican que es difícil encontrar respuesta en rendimiento en nogal pecanero, aplicando fertilizantes solamente, porque éste depende de la interacción de varios factores (características y manejo de suelo, poda, riegos, plagas, fertilización, y enfermedades) (Hunter y Hammar, 1961), además de la alternancia o producción irregular que tiene este frutal (Medina *et al.*, 2000). Lo que se debe esperar al aplicar fertilizantes en frutales perennes como el nogal pecanero, es un aumento en la concentración foliar (prueba de que se absorbió) y una reducción en el Índice de Desbalance Nutrimental (IDN); estas dos variables ayudarían a determinar cuál fue el mejor tratamiento de fertilizante aplicado.

El Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS), desarrollado por Beaufils (1973), puede evaluar el IDN. Se ha encontrado que árboles con un IDN bajo tienen rendimiento alto; en cambio, los que tienen un IDN alto tienen un rendimiento bajo. Puede haber un rendimiento bajo con un IDN bajo, porque se sugiere que el problema

principal que reduce el rendimiento, no es nutrimental (Davee *et al.*, 1986).

El objetivo del trabajo fue explicar a través del método DRIS que un aumento en la concentración foliar y una reducción en el IDN determinan cuál fue el mejor tratamiento de fertilizante aplicado en cinco experimentos de nogal pecanero.

DESARROLLO DEL TEMA Y DISCUSION

En cinco experimentos de fertilización en nogal pecanero, realizados por Worley (1974), Medina *et al.* (1999), Medina y Chávez (1999), Medina y Aguilar (1989) y por el autor de este artículo en 1987, se analizó la concentración foliar reportada por estos autores de 6, 8 y 10 nutrimentos; N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B. Con la metodología del DRIS (Beaufils, 1973; Sumner, 1986), utilizando las normas DRIS para nogal pecanero en México (con 670 observaciones de análisis foliar y rendimiento por árbol) (Medina y Medina, 1994) y con un programa de computadora elaborado por Sánchez (1988), se calcularon los índices DRIS, el Orden de Requerimientos de Nutrimentos (ORN) y IDN de los análisis foliares. Se determinó si con el mejor tratamiento de fertilización se incrementaba la concentración foliar de los nutrimentos aplicados y se reducía el IDN. Además, se evaluó si el IDN menor coincidía con el rendimiento mayor o, por el contrario, el IDN mayor con el rendimiento menor según Sumner (1986) y Davee *et al.* (1986).

Experimentos de Fertilización con N-P-K y Mn con Respuesta en la Concentración Foliar y en el Rendimiento

1. Efecto de N-P-K aplicado al suelo, en nogal cv. Stuart de 40 años, realizado durante 10 años (1962-1971) en Georgia, EUA por Worley (1974). Se probaron cinco tratamientos y se encontró respuesta en rendimiento hasta el octavo año (1969) que es el que se analizó y el décimo año (1971) con el tratamiento tres: 45-20-37 (Cuadro 1). Los suelos eran ácidos y se aplicaron 2.2 toneladas métricas de dolomita (Ca y Mg) en 1963, para corregir la deficiencia de Zn; el Zn se aplicó al follaje.

El testigo indica en el ORN como los más requeridos al Mg y Ca, le siguen el N y el K y los que están en suficiencia o exceso relativo son P y Mn. Al aplicar el

Cuadro 1. Índice de desbalance nutrimental (IDN) y rendimiento en un experimento con aplicaciones de N-P-K en nogal pecanero 'Stuart'. 1969.

No.	Tratamiento			Nutrimentos						Rend.	IDN	Orden de requerimiento nutrimental					
	N	P	K	N	P	K	Ca	Mg	Mn								
kg ha ⁻¹			%						mg kg ⁻¹	kg árbol ⁻¹							
1	0	0	0	2.09 [†] -8 [‡]	0.17 16	0.99 -4	1.47 -15	0.28 -20	312 40	55 a	102	Mg>	Ca>	N>	K>	P>	Mn
2	22	10	19	2.11 -6	0.17 16	1.01 -2	1.48 -15	0.31 -14	300 37	54 a	90	Ca>	Mg>	N>	K>	P>	Mn
3	45	20	37	2.12 -4	0.18 21	1.11 3	1.62 -12	0.36 -8	318 38	79 b	86	Ca>	Mg>	N>	K>	P>	Mn
4	90	39	74	2.26 -2	0.17 16	1.21 6	1.43 -19	0.28 -21	397 59	65 b	123	Mg>	Ca>	N>	K>	P>	Mn
5	134	59	112	2.18 -4	0.18 22	1.20 9	1.62 -16	0.22 -43	511 85	66 ab	178	Mg>	Ca>	N>	K>	P>	Mn

[†] Concentración foliar. [‡] Índice DRIS.

* Significativo a P < 0.05. Los tratamientos con la misma letra en columna son estadísticamente iguales.

Tratamiento 2 (22-10-19), el IDN de K se redujo de -4 a -2 y el de N de -8 a -6; el rendimiento se mantuvo igual. Con el Tratamiento 3 (45-20-37), el índice de K se redujo hasta 3 (ya estaba en suficiencia) y el de N a -4, lo que indica respuesta a estos dos nutrimentos, pero con mayor intensidad a K. Este fue el mejor tratamiento porque se incrementó la concentración foliar de K y se redujo el IDN, además, el rendimiento de nuez se incrementó y fue diferente en forma significativa a los Tratamientos 1 y 2, lo que coincidió con Sumner (1986) y Davee *et al.* (1986) quienes indicaron que a menor IDN se produce mayor rendimiento.

Worley (1974) explicó que aún con la alternancia en la producción durante 10 años (Cuadro 6), las diferencias significativas en el rendimiento no ocurrieron hasta el

octavo año (1969) (Cuadro 1) con el Tratamiento 45-20-37. Sin embargo, indicó que no hubo grandes diferencias en el N y K foliar con los tratamientos aplicados y los valores bajos de N se debieron a que el muestreo fue en noviembre y no en agosto o septiembre.

2. Efecto de manganeso aplicado en forma foliar en nogal cv. Western de 14 años realizado en Zaragoza, Coahuila (Medina *et al.*, 1999). Se probaron tres tratamientos: 0, 1000 y 2000 mg kg⁻¹ de Mn, se hicieron cuatro aplicaciones y se encontró respuesta en rendimiento con 1000 mg kg⁻¹ (Cuadro 2). El suelo es alcalino (pH > 8), sin problema de sales, de textura arcillosa, con alto contenido de carbonatos de calcio (> 50%), pobre en materia orgánica y de fertilidad media. Se aplicaron 164 kg ha⁻¹ de N y cinco

Cuadro 2. Índice de desbalance nutrimental (IDN) y rendimiento en un experimento con aplicación de manganeso, en nogal pecanero 'Western'. 1990.

Mn	Nutrimentos										Rend.	IDN	Orden de requerimiento nutrimental
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B			
mg kg ⁻¹	%										mg kg ⁻¹	kg árbol ⁻¹	
0	2.2 [†] -5 [‡]	0.10 -15	1.2 1	2.3 12	0.43 5	97 -6	33 b -43	57 -4	7 -8	103 -1	20.3 c	99	Mn>P>Cu>Fe>N>Zn>B>K>Mg>Ca
1000	2.2 2	0.09 -12	1.1 3	1.9 -3	0.43 -1	98 -11	148 a 4	52 -1	6 -6	101 4	28.5 a	47	P>Fe>Cu>Ca>Mg>Zn>N>K>B>Mn
2000	2.3 3	0.10 -9	1.1 2	1.6 -8	0.43 -1	90 -13	165 a 8	48 -3	6 -7	91 1	22.5 b	53	Fe>P>Ca>Cu>Zn>Mg>B>K>N>Mn

[†] Concentración foliar. [‡] Índice DRIS.

* Significativo a P < 0.05. Los tratamientos con la misma letra en columna son estadísticamente iguales.

aplicaciones foliares de Zn, se aplicaron ocho riegos durante el ciclo.

El testigo indicó en el ORN al Mn como el más requerido. Al aplicar el Tratamiento 2 (1000 mg kg^{-1}), la concentración subió de 33 a 148 mg kg^{-1} y el índice DRIS se redujo de -43 a 4, lo que indica suficiencia; el rendimiento fue el mayor en forma significativa y el IDN el menor; el Mn pasó a suficiencia en el ORN. Este es el mejor tratamiento porque se aumentó la concentración foliar del Mn y se redujo el IDN. Lo anterior indica que la dosis de 1000 mg kg^{-1} de Mn influyó significativamente sobre el rendimiento de nuez. Con la aplicación de 2000 mg kg^{-1} de Mn, el rendimiento se redujo, porque el IDN aumentó.

En estos dos experimentos anteriores, la metodología del DRIS demostró que con el mejor tratamiento de fertilización se incrementó la concentración foliar de los nutrimentos aplicados y se redujo el IDN. Además, el rendimiento mayor siempre coincide con el IDN menor, como lo indicó Sumner (1986), y puede ocurrir una reducción en el rendimiento porque aumenta el IDN.

Experimentos de Fertilización de K, Zn y P sin Respuesta en la Concentración Foliar ni en el Rendimiento

1. Efecto de K aplicado al follaje en nogal cv. Western de 10 años, realizado en la Región Lagunera por el autor de este artículo en 1987. Se probaron cuatro tratamientos: a) testigo sin aplicación; b) dos aplicaciones: el 20 de mayo y el 3 de junio, con

2 kg de KNO_3 ; c) dos aplicaciones: el 20 de mayo y 20 de julio con 2 y 3.5 kg de KNO_3 , respectivamente, y d) dos aplicaciones: el 20 de julio y el 3 de agosto con 3.5 kg de KNO_3 . Todas las dosis en 400 L de agua (Cuadro 3).

El testigo indicó que los más requeridos son: $\text{Zn} > \text{Mn} > \text{N}$ y el K está en suficiencia, por lo tanto, no se esperaría respuesta. Al aplicar los Tratamientos 2 y 3, no hubo un incremento en la concentración y los índices no se volvieron más positivos o suficientes, por lo tanto, el IDN no se redujo. Aunque el rendimiento mayor ($40.2 \text{ kg árbol}^{-1}$) sí coincidió con el menor IDN (111), la diferencia entre tratamientos no fue significativa. Los índices DRIS de Zn y Mn se hicieron más negativos o deficientes y siguieron siendo los más requeridos en los tres tratamientos porque no se aplicaron. Al incrementar las dosis de K con los Tratamientos 3 y 4, se ocasionó un aumento en el IDN y una reducción en el rendimiento.

La baja respuesta en el follaje a las aplicaciones de KNO_3 , puede deberse a que el testigo sin aplicación tenía 1.9% de K foliar (el óptimo es de 1 a 2%), por lo tanto, no existía una gran deficiencia en las hojas (pero esto se supo hasta que se analizaron las muestras en el laboratorio, después del inicio del experimento). El suelo es alcalino y el análisis reportó 2.15 me L^{-1} de K soluble, que es mayor que en otras huertas donde sí se ha observado deficiencia de K. Además, la textura es arena migajonosa y aparentemente no puede existir fijación de este nutrimento, como podría ocurrir en suelos arcillosos.

Cuadro 3. Índice de desbalance nutrimental (IDN) y rendimiento en un experimento con aplicación de potasio, en nogal pecanero 'Western'. 1987.

KNO ₃ kg	Nutrimentos										Rend. kg árbol ⁻¹	IDN	Orden de requerimiento nutrimental
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B			
	----- % -----												
	----- mg kg ⁻¹ -----												
0	1.9 [†]	0.12	1.9	1.5	0.58	141	59	32	9	136	31.7	114	Zn>Mn>N>Ca>P>Cu>Fe>B>Mg>K
	-10 [†]	-5	22	-6	17	4	-17	-21	3	9			
2 - 2	1.9	0.12	1.5	1.8	0.62	136	55	29	5	119	40.2	111	Mn>Zn>Cu>N>Ca>Fe>P>B>Mg>K
	-5	1	17	-4	15	-1	-25	-20	-15	8			
2 - 3.5	1.9	0.11	1.4	1.2	0.48	93	46	28	6	158	34.9	148	Zn>Mn>Ca>Cu>N>P>Fe>K>Mg>B
	-13	-10	8	-16	10	-8	-27	-29	-13	14			
3.5- 3.5	1.9	0.12	2.2	1.6	0.56	91	45	28	9	176	34.3	157	Zn>Mn>N>P>Fe>Ca>Cu>B>Mg>K
	-16	-9	27	-1	21	-8	-26	-33	1	17			
											ns		

ns = no significativo

[†] Concentración foliar. [†] Índice DRIS.

Cuadro 4. Índice de desbalance nutrimental (IDN) y rendimiento en un experimento con aplicación de zinc, en nogal pecanero 'Western'. 1989.

Trata- miento	Nutrimentos										Rend.	IDN	Orden de requerimiento nutrimental		
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B					
	----- % -----			----- mg kg ⁻¹ -----							----- kg árbol ⁻¹ -----				
0	2.7 [†] 3 [†]	0.14 1	1.6 11	1.9 3	0.50 12	217 20	70 -10	68 -1	9 1	156 11	44.6	70	Mn>Zn>P>Cu>N>Ca>K>B>Mg>Fe		
1	2.2 -4	0.16 8	1.5 8	1.8 -1	0.53 12	194 13	96 -3	77 4	7 -7	160 13	56.0	73	Cu>N>Mn>Ca>Zn>K>P>Mg>B>Fe		
2	2.70 -1	0.16 3	1.6 8	1.9 7	0.48 13	200 18	83 -4	139 19	9 -3	150 7	41.3	83	Mn>Cu>N>P>Ca>B>K>Mg>Fe>Zn		
3	2.5 -5	0.16 4	1.7 10	1.6 1	0.49 14	241 27	81 -4	167 27	9 -3	141 6	45.9	100	N>Mn>Cu>Ca>P>B>K>Mg>Zn>Fe		
4	2.6 -1	0.15 3	1.6 8	1.8 4	0.50 14	233 25	85 -3	154 24	9 -3	149 8	43.3	92	Mn>Cu>N>P>Ca>B>K>Mg>Zn>Fe		
5	2.6 1	0.15 1	1.7 11	1.7 1	0.53 16	251 28	91 -2	131 17	10 2	154 10	40.3	89	Mn>N>Ca>P>Cu>B>K>Mg>Zn>Fe		
	ns														

Fuente: Medina y Chávez (1999). [†] Concentración foliar. [†] Índice DRIS. ns = no significativo.

2. Efecto de Zn aplicado en forma foliar, en nogal cv. Western de 16 años, realizado durante tres años (1988-1990) en la Región Lagunera (Medina y Chávez, 1999). Se analizó el año de 1989, en 1988 y 1990 no hubo respuesta en rendimiento. Se probaron cinco tratamientos: cero, una, dos, tres y cinco aplicaciones de NZN a la dosis de 4.5 L en 1000 L de agua (Cuadro 4). Las características de suelo son de pH alcalino (8.5), conductividad eléctrica de 0.95 dS m⁻¹, materia orgánica 0.46%, carbonatos totales 10.3%, PSI 3.9% y textura arena migajonosa. Se fertilizó con 100 kg de N al suelo y se aplicaron siete riegos en el ciclo.

El testigo indicó que los nutrimentos más requeridos son Mn y Zn. Con una aplicación, la concentración de Zn subió de 68 a 77 mg kg⁻¹ y el índice de -1 se hizo positivo (4), lo que indica respuesta a Zn. También hubo respuesta en rendimiento, subió a 56 kg, fue el mayor de los seis tratamientos, pero no hubo diferencia significativa ni el IDN fue el menor, ya que subió a 73; sin embargo, el Zn estaba en suficiencia como en quinto lugar del ORN. Con dos, tres y cinco aplicaciones, los resultados fueron negativos, ya que a pesar de que la concentración de Zn aumentó y los índices se hicieron más positivos, el IDN aumentó y el rendimiento bajó. El Zn ya estaba en los últimos

lugares del ORN, lo que indica suficiencia o probable exceso.

Medina y Chávez (1999) explicaron que no se encontró respuesta en rendimiento durante los tres años con los tratamientos de Zn aplicados, debido a la variabilidad anual y alternancia en la producción de nuez. Además, el rendimiento puede depender de la interacción de otros factores (agua, suelo y poda) que no se estudiaron. En la Región Lagunera, se recomiendan de tres a cinco aplicaciones de Zn durante el desarrollo del brote (Anónimo, 1985); estos resultados sugieren que con sólo dos aplicaciones oportunas (durante el crecimiento más acelerado del brote, en seguida de la brotación) se logra aumentar el valor de Zn foliar de 68 a 139 mg kg⁻¹ y, por lo tanto, son suficientes para corregir la deficiencia de zinc, ya que el intervalo de suficiencia es de 50 a 150 mg kg⁻¹ (O'Barr y McBride, 1980). Más aplicaciones pueden ocasionar una reducción en el rendimiento, porque aumentan el IDN por un probable exceso de Zn y deficiencia de otros nutrimentos como Mn, Cu y N. Esto sugiere que en nogal deben realizarse pruebas de respuesta con dos o tres nutrimentos menores juntos, ya que existe interacción entre ellos; por ejemplo, se han reportado deficiencias de varios nutrimentos menores por huerta en la Región Lagunera, sur de Chihuahua y norte de Coahuila (Medina *et al.*, 1993).

Cuadro 5. Índice de desbalance nutrimental (IDN) y rendimiento en un experimento con aplicación de fósforo, en nogal pecanero 'Western'. 1989.

P ₂ O ₅	Nutrimentos										Rend.	IDN	Orden de requerimiento nutrimental	
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B				
g	%										mg kg ⁻¹	kg árbol ⁻¹		
0	2.3 [†] -7 [†]	0.09 -26	1.1 -8	1.8 8	0.38 4	92 -4	19 -89	65 -4	6 -12	71 -17	6.9	186	Mn>P>Cu>B>K>N>Fe>Zn>Mg>Ca	
30	2.3 -7	0.09 -27	1.0 -10	1.5 -2	0.33 -3	89 -5	20 -83	65 -4	7 -13	51 -32	10.4	185	Mn>B>P>Cu>K>N>Fe>Zn>Mg>Ca	
60	2.3 -9	0.09 -29	1.1 -7	1.5 2	0.33 -2	94 -2	15 -124	65 -5	6 -24	40 -52	11.4	256	Mn>B>P>Cu>N>K>Zn>Fe>Mg>Ca	
90	2.3 -13	0.09 -33	1.2 -6	1.5 -7	0.32 1	85 -3	15 -109	65 -8	7 -18	63 -27	17.4	225	Mn>P>B>Cu>N>Zn>K>Fe>Mg>Ca	
	ns													

[†] Concentración foliar. [†] Índice DRIS.

ns = no significativo.

3. Efecto de P aplicado al suelo, en nogal cv. Western de 14 años, realizado en Zaragoza, Coahuila por Medina y Aguilar (1989). Se probaron cuatro tratamientos: 0, 30, 60 y 90 g de pentóxido de fósforo (P₂O₅) por cm² de área transversal del tronco (Cuadro 5). El suelo es de textura arcillosa, sin problemas de sales, la concentración de P es muy baja, el N de bajo a moderado, y el K es muy alto. Además, el suelo es alcalino (7.8 a 8.1) con altas concentraciones de carbonatos de calcio (> 50%) que reducen la disponibilidad de P, Zn, Mn, Cu y Fe.

El testigo indicó que los nutrimentos más requeridos son Mn y P; al aplicar P, la concentración se mantuvo igual, en cambio, el índice DRIS se hizo más negativo o deficiente y el IDN aumentó. Aunque el rendimiento se incrementó en forma progresiva, no hubo diferencia significativa y el IDN más bajo no coincidió con el rendimiento más alto. El Mn se hizo más deficiente porque no se aplicó y es el nutrimento más deficiente en la región de Zaragoza, Coahuila. Medina y Aguilar (1989) explicaron que no se obtuvo una respuesta al incrementar las dosis de P, debido a la alta variabilidad en el rendimiento de los árboles (el coeficiente de variación fue de 49.9%), e indicaron que es necesario incrementar el número de repeticiones (> 4) para minimizar esta variabilidad. Como la concentración foliar de P no se incrementó al aumentar las dosis de P aplicado, las cantidades fueron insuficientes o se fijó en el suelo y no fue absorbido por el árbol, por lo que es necesario aumentar las dosis de P aplicadas al suelo.

En estos tres experimentos no hubo respuesta en rendimiento y, según la metodología del DRIS, esto fue

porque: a) no hubo un aumento en la concentración foliar del nutrimento aplicado con respecto al testigo, b) no hubo una reducción del IDN y c) el rendimiento mayor no coincidió con el IDN menor.

La relación entre el rendimiento de nuez e IDN también se observa en el experimento de Worley (1974), realizado durante 10 años donde se aplicó N-P-K (Cuadro 6). El año que no hubo rendimiento (1962) por la alternancia, el IDN fue mayor que los demás años. En los ocho años que no hubo respuesta significativa en rendimiento (de 1962 a 1968 y 1970), el rendimiento mayor no coincidió con el IDN menor. Incluso en 1971 ocurre esto, porque el Tratamiento 3 sólo fue superior al testigo. En cambio, en 1969 cuando sí hubo una respuesta significativa mayor, el Tratamiento 3 fue superior al testigo y al Tratamiento 2; el rendimiento mayor (79 kg árbol⁻¹) coincidió con el IDN menor (86) y se obtuvo el mayor rendimiento acumulado en los 10 años.

Worley (1974) explicó que la condición inicial de la huerta determina en gran medida la respuesta a obtener, ya que los árboles habían sido bien fertilizados y su apariencia era buena, el P del suelo fue alto y el K de medio a alto a 75 cm de profundidad al final del estudio, aún en las parcelas sin fertilizar. También los valores de P y K estuvieron dentro de los intervalos de suficiencia y fueron afectados muy poco por los tratamientos, lo que indica que fueron adecuados. En el rendimiento acumulado en los 10 años (Cuadro 6), ningún tratamiento rindió significativamente más que el testigo sin fertilización. Sin embargo, el Tratamiento 3 (45-20-37) fue el de

Cuadro 6. Índice de desbalance nutrimental (IDN) y rendimiento en kg árbol⁻¹, en un experimento con aplicación de N-P-K en 10 años, en nogal pecanero 'Stuart'. 1962-1971.

Tratamiento			1962		1963		1964		1965		1966		
N	P	K	kg	IDN	kg	IDN	kg	IDN	kg	IDN	kg	IDN	
			kg ha ⁻¹										
0	0	0	0	170	66	66	27	93	38	127	52	86	
22	10	19	0	201	70	43	23	114	37	134	57	84	
45	20	37	0	192	79	54	29	104	40	143	44	79	
90	39	74	0	168	67	66	22	126	38	122	47	79	
134	59	112	0	203	61	77	24	133	52	147	53	112	
			ns		ns		ns		ns		ns		

Tratamiento			1967		1968		1969		1970		1971		Rendimiento
N	P	K	kg	IDN	kg	IDN	kg	IDN	kg	IDN	kg	IDN	acumulado
			kg ha ⁻¹										
0	0	0	21	99	12	65	55 a	102	10	87	78 a	89	359 ab
22	10	19	18	91	20	58	54 a	90	11	82	99 ab	104	389 ab
45	20	37	15	86	13	66	79 b	86	64	82	105 b	121	468 b
90	39	74	18	98	15	80	65 ab	123	8	104	94 ab	115	374 a
134	59	112	16	132	22	97	66 ab	178	16	198	98 ab	182	408 b
			ns		ns		*		ns		*		*

Fuente de datos originales (kg árbol⁻¹): Worley (1974).

* Significativo a P < 0.05. ns = no significativo. Los tratamientos con la misma letra en columna son estadísticamente iguales.

mayor producción (468 kg) y fue superior al Tratamiento 4 (90-39-74).

CONCLUSIONES

- El diagnóstico con la metodología del DRIS explica razonablemente porque hubo o no hubo respuesta en la concentración foliar y el rendimiento de los experimentos de fertilización analizados.
- Hubo respuesta significativa en rendimiento porque los nutrimentos aplicados aumentaron su concentración foliar, el IDN se redujo y el rendimiento mayor coincidió con el IDN menor.
- No hubo respuesta significativa en rendimiento porque los nutrimentos aplicados no incrementaron su concentración foliar, el IDN aumentó y el rendimiento mayor no coincidió con el IDN menor.

LITERATURA CITADA

- Anónimo. 1985. Guía Técnica del Nogalero. Publicación Especial 15. Centro de Investigaciones Agrícolas del Norte-Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Matamoros, Coahuila, México.
- Beaufils, E.R. 1973. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). A general scheme for experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. Soil Science Bulletin 1. University of Natal. Pietermaritzburg, South Africa.
- Davee, D.E., T.L. Righetti, E. Fallahi y S. Robins. 1986. An evaluation of the DRIS for identifying mineral limitations on yield in 'Napoleon' sweet cherry. J. Am. Soc. Hort. Sci. 111: 988-993.
- Hunter, J.H. 1967. Nitrate of potash sprays on pecans. pp. 28-30. In: Procc. Southeastern Pecan Growers Association. 60th. Annual Convention. Pine Mountain, GA.
- Hunter, J.H. y H.L. Hammar. 1961. Effects of different grades and rates of fertilizers applied to 'Schley' pecan trees as influenced by other factors. pp. 29-41. In: Procc. Southeastern Pecan Growers Association. 54th. Annual Convention. Savannah, GA.
- Medina M., E.J. y J.H. Aguilar P. 1989. Curva de respuesta a fósforo en nogal pecanero en el Norte de Coahuila. Informe de Investigación. CAEZAR-Centro de Investigaciones Agrícolas del Norte-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Zaragoza, Coahuila, México.
- Medina M., M.D.C. y J.F.J. Chávez G. 1999. Efecto del abastecimiento foliar de zinc sobre el balance nutrimental del nogal pecanero. Terra 17: 293-298.
- Medina M., M.D.C. y E.J. Medina M. 1994. Evaluation of DRIS in pecan tree in Mexico. pp. 277-292. Volume 5a: Commission IV. Symposium ID-1. Soil testing and plant analysis: Methodology and interpretation. 15th. World Congress of Soil Science. Acapulco, Guerrero, México.
- Medina M., M.D.C., E.D.J. Medina M., A. Alvarado M. y S. Enriquez R. 1993. Comparación de dos métodos de interpretación foliar en nogal pecanero en 3 regiones de México. Hort. Mexicana 2: 9-16.

- Medina M., M.D.C., E.D.J. Medina M., H. Aguilar P. y S.J. García G. 1999. Aspersiones foliares de manganeso y cobre en nogal pecanero. *Terra* 17: 317-323.
- Medina M., M.D.C., J.A. Samaniego G., J. Santamaría C., R. Faz C., T. Herrera P., M. Ramírez D. y G. González C. 2000. Alternancia en la producción del nogal pecanero en la Comarca Lagunera de México. *Información Técnica Económica Agraria (ITEA)*. Zaragoza, España. 96V (2): 132-138.
- O'Barr, R.D. 1977. Nutrients: Their impact. *The Pecan Quarterly* 11(4): 4-10.
- O'Barr, R.D. y J.H. McBride. 1980. Pecan leaf sampling for commercial growers. *Pecan South* 7: 42-45.
- Sánchez V., L.R. 1988. Programa Basic para calcular los índices DRIS. Informe de Investigación de Cómputo y Estadística. CIFAP-Región Lagunera- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Matamoros, Coahuila, México.
- Smith, M.W., P.L. Ager y D.S.W. Endicott. 1985. Effect of Nitrogen and Potassium in yield, growth and leaf elemental concentration of pecan. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 110: 446-450.
- Storey, J.B., M. Smith y P.N. Westfall. 1979. Why do pecans need Zinc? *The Pecan Quarterly* 13(2): 3-9.
- Sumner, M.E. 1986. The Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) as a guide to orchard fertilization. Extension Bulletin No. 231. Food and Fertilizer Technology Center. Taipei City, Taiwan, Republic of China.
- Worley, R.E. 1974. Effects of N-P-K and lime on yield, nut quality, tree growth, and leaf analysis of pecan (*Carya illinoensis* W.). *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 99: 49-57.

PROBLEMAS FINANCIEROS DE LAS ASOCIACIONES DE USUARIOS Y SU EFECTO EN LA CONSERVACION Y OPERACION DE DISTRITOS DE RIEGO

Financial Problems of Associations of Users and the Effect on Conservation and Operation of Irrigation Districts

Enrique Palacios Vélez¹, Adolfo Exebio García¹, Enrique Mejía Saénz^{1‡},
Ana Laura Santos Hernández¹ y Ma. Eugenia Delgadillo Piñón¹

RESUMEN

En el mundo entero, el agua se está convirtiendo en el recurso natural más valioso. Sin embargo, en México, los recursos hidráulicos se encuentran mal distribuidos por la naturaleza. Por lo tanto, para lograr el desarrollo sostenible de la agricultura de riego, es necesario que las asociaciones de usuarios de agua establezcan cuotas de cobro por servicio de riego que les permitan ser autosuficientes económicamente, en especial, después de realizar el proceso de transferencia de los distritos de riego a estas asociaciones. Además, el proceso inflacionario ha afectado, en forma negativa, las finanzas de dichas asociaciones. En la mayoría de los módulos, se dispone de menos dinero para la operación y la conservación que al inicio de la transferencia. El proceso de actualización de las tarifas de riego es difícil, dada la situación económica de los productores agrícolas, y no pueden mantenerse constantes los ingresos; en la mayoría de los casos hay una disminución de los ingresos, en términos reales. Por ello, resulta conveniente generar una forma de indexar las tarifas de riego, respecto al valor de la producción de los usuarios, a fin de disminuir el efecto del proceso inflacionario. Es recomendable implementar un método para el cálculo de la tarifa de riego, semejante al propuesto en el Título de Concesión de los Módulos y Distritos de Riego. El método propuesto es el sugerido en 1934 por la Comisión Nacional de Irrigación (CNI) en los distritos de riego. Este método sugiere que la tarifa de riego se cobre en dos partes: una, de acuerdo con la superficie beneficiada con el riego para cubrir los gastos fijos de conservación y administración; y otra, en forma volumétrica para fomentar el uso eficiente del agua.

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

[‡] (mejiasac@colpos.colpos.mx)

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

Publicado en Terra 20: 505-513.

Palabras clave: Tarifa de riego, costo unitario, ingresos por riego, sequía.

SUMMARY

All over the world, water and environment are becoming the most valuable of natural resources. In Mexico, however, water resources are badly distributed by nature. Therefore, to attain sustainable development of irrigated agriculture, it is necessary that associations of water users establish fees to pay for the service to allow them to become economically self-sufficient, especially now that irrigation districts have been transferred to these associations. The inflationary process has negatively affected the finances of these associations, and in most of the modules there is less money available for the operation and conservation now than at the beginning of the transference. The process of bringing irrigation tariffs up to date is difficult, due to the economic situation of the agricultural producers, and it is not possible to maintain income constant; in most cases, there is a decrease in income, in real terms. For that reason, it is convenient to generate a proper way to index the irrigation rates, related to the cost of production of the users, with the purpose of reducing the effect of the inflationary process. It is recommended that a method of calculating irrigation fees, similar to that proposed in the Title of Concession of the Module and Irrigation Districts, be implemented. The proposed method was suggested in 1934 by the National Commission of Irrigation (CNI) for the irrigation districts. This method suggests that irrigation fees must be charged in two parts: one, in proportion to the area benefited by irrigation, in order to pay the permanent costs of conservation and administration, and two, by volume of water used, in order to encourage the efficient use of water.

Index words: Irrigation rate, unit cost, irrigation income, draft.

INTRODUCCIÓN

Desde su creación en 1930, los distritos de riego han operado bajo el esquema centralizado. El gobierno federal se encargó de estudiar, proyectar y construir las obras de infraestructura hidráulica necesarias.

Las grandes dimensiones y los elevados costos de muchas obras obligaron a que su funcionamiento se realizara con fondos federales, por lo cual se les considera bienes nacionales de propiedad pública. Los usuarios se limitaron a pagar cuotas por los servicios de operación y conservación, los cuales, al resultar insuficientes, tuvieron que ser complementados por la federación. Así, el Estado propició una administración centralizada.

Los usuarios mismos cubrían el presupuesto autorizado para los distritos mediante el pago de la cuota por servicio de riego; además, se tenían subsidios del gobierno federal. A principios de la década de los 80s, las cuotas cubiertas por los usuarios representaban 80% del presupuesto autorizado, proporción que se invirtió hacia finales de la misma, cuando sólo representaba 20%.

La difícil situación económica del país y la participación cada vez menor en los gastos por parte de los usuarios originó, en esa década, el deterioro de la infraestructura de los distritos de riego y la disminución de la eficiencia en el servicio de riego, que redundó en una considerable disminución de la producción, por la menor extensión de las áreas cosechadas y los bajos rendimientos de los cultivos.

A finales de 1989, ante la falta de recursos presupuestales, la necesidad de identificar diversas fuentes de inversión en la infraestructura requerida y de contar con esquemas de mayor corresponsabilidad dentro de la economía mixta, después de haber asumido el cargo de los distritos de riego, la Comisión Nacional del Agua (CNA) estableció una política para que la operación, conservación y administración de los mismos fueran transferidas a los usuarios con el fin de lograr la autosuficiencia financiera y mejorar el aprovechamiento de los recursos naturales.

La Ley de Aguas Nacionales tiene como principal objetivo regular y administrar las aguas propiedad de la nación. A fin de lograr un desarrollo integral sostenible, el gobierno se propuso transferir los grandes distritos de riego (DR) a las Asociaciones de Usuarios de Agua (AUA) (Viesca, 1993; Palacios *et al.*, 1994).

Para lograr el desarrollo sostenible de la agricultura de riego, es necesario que las AUA establezcan cuotas de cobro por servicio de riego que les permitan ser autosuficientes económicamente (Santos *et al.*, 2000), debido a que el precio del agua de riego puede alcanzar un importante número de metas sociales y de manejo (Allam, 1987). Sin embargo, en pocos sectores de la economía es tan grande la disparidad entre las necesidades identificadas y los recursos disponibles, como en el caso del abastecimiento del agua (Sandoval, 1993).

FINANZAS DE LOS DISTRITOS ANTES DE LA TRANSFERENCIA

Al inicio del proceso de transferencia, en 1989, cuando se creó la CNA, los distritos de riego apenas recaudaban por cuotas por servicio de riego 20% de los costos de operación y mantenimiento de ese entonces; es decir, el gobierno subsidiaba con 80% los gastos que implicaban el manejo deficiente de los mencionados distritos de riego (IMTA, 1997).

Además, los ingresos totales, incluyendo cuotas y subsidios, no alcanzaban a cubrir el mínimo necesario para una operación y mantenimiento adecuado de la infraestructura de riego y drenaje de los distritos de riego, por lo cual se notaba un deterioro de la infraestructura, que crecía continuamente, por la conservación diferida que se acumulaba.

Una de las acciones iniciales del personal de la CNA fue convencer a los usuarios de los distritos de riego de la necesidad de aportar cuotas superiores, que garantizaran la autosuficiencia administrativa, con el fin de dar un adecuado servicio de riego, ya que el gobierno no disponía de los recursos necesarios para mantener el subsidio. Este fue uno de los problemas más difíciles de resolver, como condición previa a la transferencia.

Después de una ardua labor, se consiguió aumentar la contribución de los usuarios a 37%, con lo que el subsidio se redujo a 63%, y se preparó la transferencia de dos distritos de riego: el 038 Río Mayo, Sonora, y parte del 094 Jalisco Sur, Jalisco.

El Cuadro 1 muestra las finanzas de los distritos de riego al finalizar el año de 1990 (CNA, 1991).

Los fondos fiscales, denominados Capítulo 1000, se refieren al subsidio para cubrir el costo del personal que operaba los distritos de riego. Así, los fondos para inversión ascendían a 148.566 millones de pesos, de los cuales la Gerencia de Distritos de Riego de la

Cuadro 1. Ingresos para el manejo de los distritos de riego. 1990.

Concepto	Ingreso	
	Millón \$	%
Ingreso por cuotas de usuarios	83.463	36.99
Fondos fiscales directos	65.103	28.85
Fondos fiscales (Capítulo 1000)	77.065	34.16
Total	225.631	100.00

CNA destinó 73.5 millones de pesos para la conservación y el mantenimiento.

En ese mismo año, se regaron 3 052 551 ha; la cuota media por servicio de riego que pagaron los usuarios por hectárea fue de \$ 27.34 y el costo total de operación fue de \$ 73.92 ha⁻¹. Sin embargo, la estimación del requerimiento de inversión para una operación y mantenimiento adecuado era del orden de 390 millones de pesos, por lo que se suponía un déficit de 165 millones de pesos, es decir, sólo se estaba invirtiendo 58% de lo necesario.

IMPACTO INFLACIONARIO EN LAS TARIFAS

Conforme avanzó el proceso de transferencia de los distritos de riego, se logró una mayor autosuficiencia financiera de las AUA que se hicieron cargo de la operación, conservación y administración de los distritos de riego. El porcentaje de 37 de autosuficiencia lograda en 1990, en 1993 se aumentó hasta 78; sin embargo, el subsidio del gobierno federal se redujo. En realidad, no se disponía de los fondos necesarios para rescatar toda la conservación diferida acumulada hasta esa fecha, y lo más grave es que se seguía acumulando el requerimiento de conservación, por falta de fondos suficientes.

Aunque la CNA hizo inversiones considerables en rehabilitación y modernización de algunos distritos de riego, principalmente del noroeste de México, dicha inversión fue insuficiente para cubrir las necesidades de los mismos. Aun así, la compra de maquinaria nueva entregada a los distritos también contribuyó a mejorar la conservación y el mantenimiento de la infraestructura, aunque por debajo de las necesidades reales de los distritos de riego.

Desafortunadamente, la situación empeoró a partir de 1994 y se agravó después de 1995, debido al aceleramiento del proceso inflacionario. La inflación, que en 1993 y 1994 se había reportado de un dígito, se disparó en 1995 hasta un valor mayor que 50%, lo

cual afectó de manera significativa la recaudación de la mayoría de las organizaciones de usuarios encargadas de operar los distritos de riego transferidos.

Debido a esta situación, la CNA incrementó su participación en la conservación de las obras en 1995; sin embargo, este aumento no fue suficiente para compensar la notable disminución del ingreso de las asociaciones de usuarios.

Otro problema relacionado con la inflación fue la baja en los ingresos de los productores agrícolas en la mayor parte de los casos, por lo cual se mantuvieron renuentes a aumentar las tarifas por servicio de riego, con el fin de compensar el efecto del proceso inflacionario.

Como se observa en la Figura 1, en el DR 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, en 1990, se logró incrementar la tarifa de riego en más de 400%. De esta manera, en 1992 se logró transferir el distrito a las asociaciones de usuarios. También se aprecia que, a precios corrientes, las tarifas de riego se han incrementado; sin embargo, al deflactar los valores con el índice implícito de precios del PIB, las tarifas se reducen considerablemente. Aun con el primer aumento de 1990, sólo se alcanzó una recuperación parcial para 1997, sin llegar al nivel que tenía en 1994.

En el DR 009, Ciudad Juárez, Chihuahua, también se observa que las tarifas de riego aumentaron, tanto en términos reales como a precios corrientes hasta el año de 1994. A partir de 1995, se inició un rápido descenso, debido al efecto inflacionario y a que las tarifas permanecieron constantes, como puede

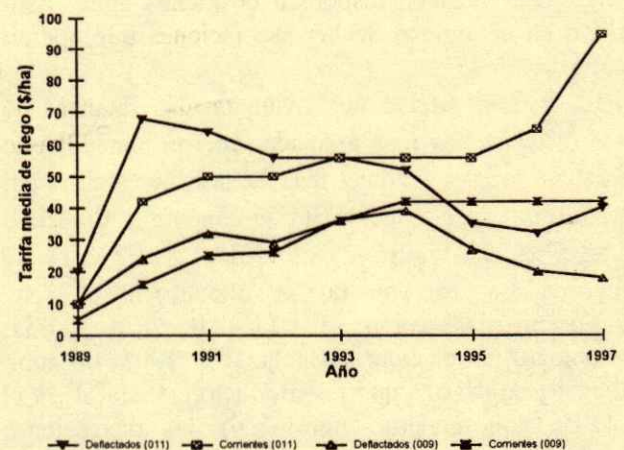


Figura 1. Variación de las tarifas de riego en el DR 011 y el DR 009.

notarse en el valor a precios corrientes. En 1998, este distrito de riego recibía un subsidio de 52%, con relación a sus gastos; sin embargo, los ingresos totales, incluyendo el subsidio, son insuficientes para cubrir las necesidades de conservación, mantenimiento y operación.

En el caso del DR 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, el incremento de la tarifa de riego inicial fue considerable (400%), mientras que, una vez transferido el distrito de riego, los incrementos han sido poco significativos o nulos, por lo que, en términos reales, la tarifa ha disminuido, excepto en los años 1992 y 1997, en los cuales se tuvo una pequeña recuperación, aunque insuficiente para llegar al valor original de 1990. En contraste, en el DR 009 Ciudad Juárez, Chih., los incrementos en el período de 1989 a 1994 fueron menores pero relativamente constantes, lo que indica el esfuerzo desarrollado por la CNA; no obstante, el problema es que a partir de 1995 no se continuó con los aumentos y, por lo tanto, no se logró que el distrito tuviera autosuficiencia financiera.

IMPACTO DE LA SEQUIA EN LAS FINANZAS DE LAS ASOCIACIONES DE USUARIOS

A partir del año 1995, se presentó una disminución en las lluvias, en la parte alta de varios de los distritos de riego más importantes de México, cuyos efectos generaron una disminución de los volúmenes de agua en los almacenamientos. Por otra parte, las presas se habían operado, extrayendo la mayor parte del agua almacenada, razón por la cual, al iniciarse un período más seco que en años con aportaciones medias, disponían de menos agua. Esto influyó en el ingreso de las asociaciones que operan dichos distritos.

Lo anterior afectó negativamente las finanzas de estos distritos, los más afectados fueron aquéllos que cobraban tarifas volumétricas o por hectárea-riego, una forma especial de tarifa volumétrica. Como se muestra en la Figura 2, alrededor de 52% de la superficie con riego paga tarifas volumétricas.

En distritos como el 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, en el ciclo agrícola 1997-1998, no hubo suficiente agua para que los productores regaran en el ciclo de otoño-invierno, por lo cual las asociaciones de usuarios sólo recibieron un tercio del ingreso. En consecuencia, la conservación y el mantenimiento de las obras disminuyó, a pesar de los créditos conseguidos con el gobierno estatal.

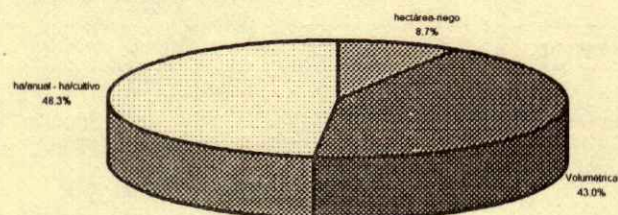


Figura 2. Proporción por tipo de pago de la tarifa de riego en los distritos transferidos.

El DR 026 Bajo Río San Juan, Tamaulipas, también ha sido sumamente afectado por la falta de agua. Debido a la sequía regional y a la construcción de la presa el Cuchillo sobre el mismo río para abastecer de agua potable a la ciudad de Monterrey, primero redujo la superficie regada y luego, por una deficiencia total del recurso, ya no pudo regar. Por lo tanto, este distrito de riego no tuvo ingresos para cubrir los gastos de operación y de conservación.

IMPACTO DE LOS APOYOS GUBERNAMENTALES EN LA AGRICULTURA DE MEXICO Y ESTADOS UNIDOS

A partir de mediados de la década de los 80, se han generado problemas que están afectando al sector primario, en general, y al subsector agrícola, en forma particular. Estos problemas se han agravado a partir de la firma del Tratado de Libre Comercio (TLC) con Estados Unidos de América y con Canadá, debido a las profundas diferencias entre los sectores primarios de México y los de los nuevos socios. Así, se nota que el crecimiento del sector primario del país, en el lapso de 1990 a 1997, sólo ha sido a una tasa media anual de 0.51%, mientras que la población creció a una tasa promedio anual de 2.28%, lo cual se manifiesta en un empobrecimiento del subsector y la necesidad de que el país importe, en forma creciente, los alimentos y materias primas que dicho sector no puede producir para satisfacer la demanda.

En un ambiente de apertura comercial, es importante hacer una comparación de los apoyos que reciben los agricultores de los principales socios comerciales, de parte de sus respectivos gobiernos. A continuación, se mencionarán los apoyos gubernamentales que reciben los productores mexicanos y acto seguido se hará lo mismo con aquéllos recibidos por los productores

norteamericanos, vecinos de los usuarios de los distritos de riego 026 Bajo Río San Juan y 025 Bajo Río Bravo, Tam.

Sin duda, el programa de apoyos a la agricultura más importante, por su magnitud y por su cobertura, es el Programa de Apoyos Directos al Campo (PROCAMPO). Este programa entrega dinero en efectivo por hectárea a cada productor en forma individual. Dicho apoyo se otorga a aquellos usuarios que demuestren haber sembrado los cultivos elegibles por este programa, durante al menos tres ciclos agrícolas anteriores en el momento de solicitar su inscripción. Los cultivos beneficiados por el programa son: maíz, frijol, sorgo, trigo, arroz, algodón y soya. Este programa benefició, en 1995, a 2 934 194 productores en todo México y a 13 321 194 ha en los dos ciclos agrícolas, según información de Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA).

Otro paquete de programas de apoyos lo integra la Alianza para el Campo. Estos programas tienen como objetivo mejorar las habilidades de los agricultores y promover el desarrollo tecnológico, con la finalidad de incrementar la productividad y la competitividad del sector agrícola en un contexto de economía abierta.

La Fundación Produce es el principal componente de la Alianza para el Campo; a través de esta fundación, los pagos se hacen una sola vez a los agricultores en el período 1996-2000 y están destinados a la compra de bienes de capital y al suministro de asistencia técnica por parte de fundaciones privadas.

Los agricultores pueden solicitar los diferentes apoyos pero hay un límite máximo en cada uno de ellos. PRODUCE contiene cinco subprogramas que son: ferti-irrigación, praderas, equipo rural, mecanización y estudios y proyectos agrícolas.

Otros de los programas que integran la Alianza para el Campo se ligan a la producción de cultivos específicos, mientras que otros tienen un carácter más general. Se tienen los siguientes programas adicionales: apoyo al cultivo del café, al cultivo del caucho, a la producción de leche, a la mejora genética del hato ganadero, al intercambio de semillas (kilo por kilo) para maíz y frijol, y para la producción de oleaginosas. Todos ellos tienen un límite por productor y por número de productores.

Por otro lado, los apoyos que brinda el gobierno de Estados Unidos a sus agricultores incluyen los siguientes programas: el de flexibilidad de cultivos, el

de pagos directos de transición, los programas de apoyos a la comercialización, los programas de apoyos a la comercialización que incluyen préstamos prendarios y subsidios a compradores, el de conservación de reservas, el de seguro contra catástrofes, el de seguro contra riesgos múltiples, el de crédito para compra de equipo especializado, el de suministro de diesel y el de exención de varios impuestos.

Adicionalmente, los productores norteamericanos reciben, en muchos casos, subsidios privados, principalmente de agroindustrias, o de otras fuentes que pueden estar relacionadas con actividades paralelas que tienen los productores agrícolas.

En general, en Estados Unidos de Norteamérica hay un mayor número de programas de apoyo para los agricultores que en México, y el monto y cobertura de los mismos también son mayores. Por citar dos ejemplos: el diesel es 28% más caro en México que en Estados Unidos y la tasa de interés de préstamos a la agricultura lo es en más de 180%.

Tan solo, el monto del subsidio por unidad de superficie que se otorga mediante pagos directos con el programa de flexibilidad de cultivos para el sorgo en Texas, es superior al total de apoyos promedio por hectárea que se asigna al mismo cultivo en Tamaulipas, por conducto de Alianza para el Campo y PROCAMPO. Esto ocasiona que el costo por tonelada de sorgo en Estados Unidos sea de \$509 y en México de \$795 (para 1997); para temporal, estos costos son de \$591 en Estados Unidos y de \$961 en México, lo que indica la competitividad, tanto de los productos mexicanos como de los productores.

IMPACTO DE LOS PRECIOS DE LOS PRODUCTOS AGRICOLAS Y SUBSIDIOS

Los precios de los productos agrícolas se liberaron desde fines de la década de los ochenta, cuando México abrió totalmente su economía, quitando los precios de garantía de la mayor parte de los productos, con excepción de algunos básicos. También se quitaron los subsidios a la mayor parte de los insumos que en un principio producía el gobierno, como fue el caso de los fertilizantes.

Al firmarse el Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos de América y Canadá, el gobierno liberó los precios y apoyó con un subsidio directo a los agricultores, denominado PROCAMPO. En un inicio, se dijo que los precios internacionales de los productos agrícolas serían los que regirían; sin

embargo, esta situación no ha prevalecido, ya que hay muchos intermediarios entre los productores y los consumidores finales de los productos agrícolas.

Como consecuencia, los precios de los productos del campo han tenido fuertes variaciones, no siempre relacionadas con el cambio de los precios internacionales. Al relacionar los cambios en los precios de los productos agrícolas con los de insumos, mediante los respectivos índices de precios, se observa que, a partir de 1985, los precios de los insumos han crecido a mayor velocidad que los de los productos agrícolas. Esta diferencia afecta de manera negativa a los productores al reducir sus márgenes de utilidad; por esta razón, muchos de los usuarios de los distritos de riego se han salido del mercado, principalmente los del sector ejidal. En general, los productores dicen que la agricultura se está convirtiendo en una actividad más técnica, por lo que los menos preparados no están en condiciones de competir.

El efecto combinado de inflación, de escasez de agua, de menores precios y mayores costos, aunado a falta de crédito, altas tasas de interés en el sector, falta de asistencia técnica y apoyos reducidos al campo, eliminación de subsidios e importación de productos agrícolas, han estado afectando a los productores y son algunas de las razones por las cuales ha sido difícil mantener las tarifas de riego por lo menos a valores constantes, y que ha venido impactando negativamente en el mantenimiento y la conservación de la infraestructura hidroagrícola de los distritos de riego.

INVERSIONES EN CONSERVACION EN DISTRITOS DE RIEGO

En 1990, el gasto total ejercido de los distritos de riego fue de 225.631 millones de pesos y la inversión en conservación y mejoramiento fue de 73.5 millones de pesos, es decir, 32.6% del total del presupuesto. En 1996, los ingresos por tarifas de riego en los distritos de riego fueron 652.248 millones de pesos, mientras que el gobierno federal aportó 32.128 millones de pesos; en total se utilizaron 684.376 millones de pesos. De esta cantidad, no se conoce el ejercicio o gasto correspondiente, pero la cantidad gastada en conservación y mejoramiento fue de 115.8 millones de pesos, equivalente a sólo 16.92%.

En el Cuadro 2 se muestran estas relaciones, a precios constantes de 1993. Se observa que en 1996 se dispuso de menor cantidad de dinero que en 1990, a

Cuadro 2. Inversiones en conservación en distritos de riego en millones de pesos de 1993.

Año	Ejercicio	Inversión en obra	% del ejercicio
1990	351.530	117.786	32.58
1996	329.344	55.718	16.92

pesar de no haber sido considerado como seco. Para la conservación de las obras, la inversión en 1996, en términos reales, fue menor que 50% de la que se tuvo en 1990.

Por lo anterior, es necesario regular el cobro de las tarifas de riego en los distritos, para evitar el deterioro en la captación de ingresos debido al proceso inflacionario. Aunque, como lo mencionaron Palacios y Exebio (1989), para una regulación de estas tarifas, los usuarios serán renuentes a pagar más dinero por el servicio, que el valor del mínimo beneficio que de él pueden obtener. Sin embargo, en el DR 011 Alto Río Lerma, Gto., en algún tiempo se indexó la tarifa de riego a un equivalente a kilogramos de sorgo por hectárea, de manera que no se afectara a los usuarios en sus ingresos, pues siempre pagarían una cantidad relativamente fija de dicho ingreso.

Los impactos negativos de la inflación y la falta de agua en muchos distritos de riego han afectado su operación, conservación y mantenimiento. Por otra parte, el gobierno tampoco ha dispuesto de fondos para apoyar a las AUA, a fin de aminorar estos impactos.

ESTIMACION DE TARIFAS DE RIEGO Y ADMINISTRACION

El establecimiento de una tarifa para el servicio de riego requiere de información acerca de los costos y se diseña para objetivos y condiciones particulares de los distritos de riego. En México, se han planteado alternativas de estimación de cuotas por servicio de riego (Correu, 1980). Además, durante la transferencia de los distritos a las AUA, se otorgó un Título de Concesión del Agua, de la Infraestructura de Riego y del Equipo; también se proporcionó un instructivo donde se detalla como deben calcularse las tarifas por servicio de riego. El método recomendado es volumétrico, es decir, cobrar por millar de metros cúbicos de agua servida.

No obstante, la mayoría de las AUA continúa calculando sus tarifas por los métodos tradicionales, sin considerar las mencionadas recomendaciones. Por esta razón, existen multitud de tipos de tarifas de

riego: por hectárea regada anualmente; por hectárea y tipo de cultivo; por hectárea y tipo de demanda de agua del cultivo, es decir, de alta demanda, de demanda media y de baja demanda; por hectárea-riego; volumétrica por millar de metros cúbicos; volumétrica por litro por segundo por hectárea en 24 horas; por hora con cierto gasto, en el caso de bombeos, entre algunas.

Es evidente que el método más apropiado debería ser mixto; es decir, una parte de la tarifa debería cobrarse en función de la superficie beneficiada con el riego, para cubrir los gastos fijos de conservación y administración, y otra parte en forma volumétrica, para fomentar el uso eficiente del agua. Desde 1934, la extinta Secretaría de Agricultura y Fomento estableció este método mixto de cobro por el servicio de riego. Este método señala que la cuota por servicio de agua se compondrá de una cuota fija, destinada a la conservación y administración del sistema, y una cuota por cada millar de metros cúbicos usados en el terreno, destinada a las atenciones de la distribución de las aguas (DOF, 1934). Se señala que dicha cuota deberá ser cubierta en su totalidad por adelantado, de manera que no se dará curso a ninguna solicitud de agua si el propietario del terreno no ha pagado la cuota correspondiente.

Si la forma de cobro propuesta en 1934 se implementara, las AUA que cobran volumétricamente o por hectárea-riego tendrían menos problemas financieros; por otra parte, las AUA que cobran tarifas por hectárea anual mejorarían el manejo del agua.

Con objeto de tener un mejor conocimiento de la forma cómo se integra una tarifa de riego y después observar cómo se invierte el dinero recaudado, Santos *et al.* (2000) llevaron a cabo un estudio en los módulos de riego que operan las AUA del DR 011 Alto Río Lerma y el DR 085 La Begoña, en el estado de Guanajuato. Este estudio muestra gran disparidad en tamaño y número de usuarios por módulo de riego; además, los ingresos unitarios, que es el equivalente a la tarifa media por servicio de riego, varían en forma considerable. En estos distritos, el servicio de riego se cobra por hectárea riego, por lo cual el ingreso depende del número de riegos dados en cada uno de los módulos, y varía en función del patrón de cultivos dominante, del tipo de suelos y de las condiciones climáticas que hayan prevalecido en cada módulo. En adición, en varios módulos se utiliza agua de pozos que operan las AUA, con un costo mayor que el del agua extraída de presas. Por último, las tarifas de

riego son diferentes, según se hayan definido en cada módulo.

Como se muestra en el Cuadro 3, los egresos generados en los módulos de riego son 10% menores que los ingresos.

La Figura 3 muestra la distribución de egresos por concepto en módulos del DR 011 y el DR 085.

Al comparar los valores de los módulos con la media, son evidentes las discrepancias en la distribución de gastos por conceptos.

En varios distritos de riego, la proporción del gasto por concepto es aproximadamente la siguiente: operación 40%, conservación 40% y administración 20%, la cual coincide con los valores medios observados en los módulos de riego del DR 011 y el DR 085. Esto difiere de la distribución que manejaba la extinta SARH o la CNA, cuya composición media era: operación 25%, conservación 50%, riego y drenaje 10% y administración 15%.

El servicio de Ingeniería de Riego y Drenaje prácticamente ha desaparecido, sin embargo, en algunos distritos de riego, la CNA aún considera personal en este rubro, pero no es pagado por los usuarios. Por otra parte, los gastos de los módulos en administración y operación aumentaron y los de conservación disminuyeron.

Cada módulo ejerce su presupuesto según reglas definidas por las directivas de las AUA responsables de su manejo, sin que se haya definido una regla a nivel nacional. En general, en módulos y distritos de riego, los fondos financieros no alcanzan a cubrir los gastos mínimos necesarios para realizar actividades de operación, conservación o administración.

Cuadro 3. Ingreso y gasto unitario en módulos de riego de Guanajuato.

Módulos	Ingreso unitario	Gasto total unitario
	----- \$ ha ⁻¹ -----	
Corralejo (DR 011)	464.23	417.16
Margen Izquierda (DR 085)	259.18	224.26
Huanímaro (DR 011)	150.49	134.18
La Purísima (DR 011)	193.11	185.85
Jaral del Progreso (DR 011)	314.55	291.37
Margen Derecha (DR 085)	206.43	201.26
Acámbaro (DR 011)	161.24	153.71
Valle de Santiago (DR 011)	114.19	91.19
Salvatierra (DR 011)	197.51	196.29
Abasolo (DR 011)	271.85	228.27
Cortazar (DR 011)	173.87	162.37
Media	227.88	207.81

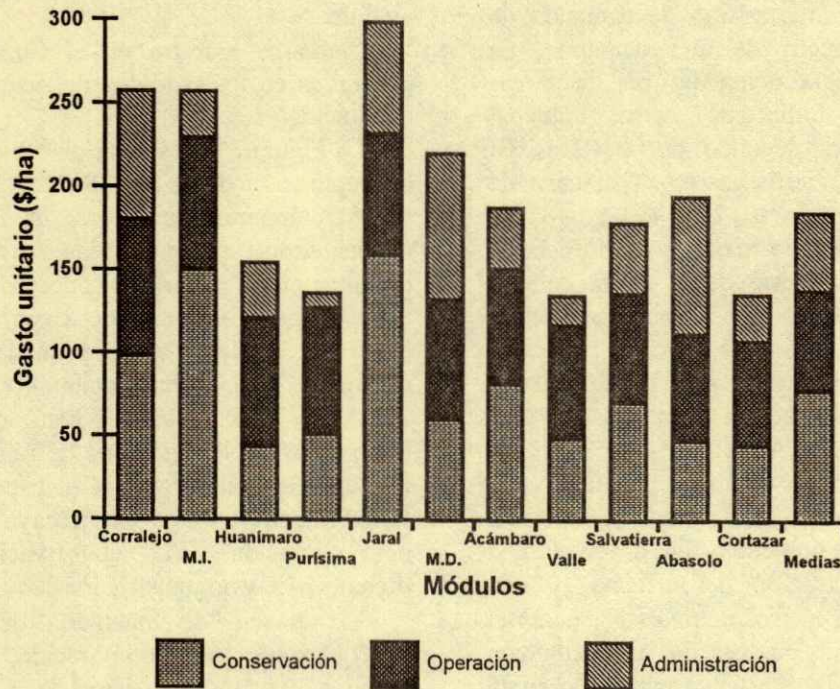


Figura 3. Egresos por concepto en módulos de Guanajuato.
M.I. = margen izquierda; M.D. = margen derecha.

CONCLUSIONES

- El proceso inflacionario ha afectado las finanzas de las asociaciones de usuarios del agua en forma negativa. En la mayoría de los módulos, se dispone de menos dinero que al inicio de la transferencia, para la operación y la conservación. El proceso de actualización de las tarifas de riego es difícil, dada la situación económica de los productores agrícolas, y no puede mantenerse un ingreso constante; en la mayoría de los casos hay una disminución de los ingresos, en términos reales.
- Es conveniente generar una forma de indexar las tarifas de riego respecto al valor de la producción de los usuarios, a fin de disminuir el efecto del proceso inflacionario.
- El período de sequía que se inició en 1994 en varias zonas del norte del país, donde se encuentran varios de los distritos de riego más importantes, tiene un efecto negativo en las finanzas de las asociaciones de usuarios. Los distritos de riego que cobran los servicios mediante tarifas volumétricas o por hectárea riego, han resentido el efecto de las sequías en forma más acentuada.

- Aunque el gobierno federal ha tratado de ayudar a los productores agrícolas con apoyos, agrupados en lo que es la Alianza para el Campo, éstos tienen varias limitaciones, ya que en muchos casos se requiere que el productor participe económicamente, con parte de los requerimientos de inversión. Por otra parte, al comparar los apoyos al productor mexicano con los que recibe su contraparte en Estados Unidos de Norteamérica, se hace evidente una notable diferencia en favor de los productores agrícolas norteamericanos, lo cual hace menos competitivos a los mexicanos.
- Los precios de los productos agrícolas se han venido rezagando, en comparación con los de los insumos, a partir de 1985, cuando se inició la apertura económica de México. Esta diferencia en el crecimiento de los precios ha repercutido negativamente en el ingreso de los productores agrícolas, ya que se están reduciendo sus márgenes de utilidad. Esta situación, a su vez, perjudica a las asociaciones de usuarios del agua, encargadas de manejar los distritos de riego, debido a que ha impedido mantener las tarifas de riego adecuadas para garantizar la operación y conservación de la infraestructura de riego transferida.
- Aun cuando en el Título de Concesión se recomienda un método para el cálculo de la tarifa de

riego, en la mayoría de los módulos manejados por las AUA se siguen usando los métodos tradicionales, que son sumamente variables y no permiten hacer comparaciones entre módulos.

- Es necesario cambiar el tipo de cobro actual de tarifas de riego en los distritos, por el propuesto en 1934 por la Comisión Nacional de Irrigación (CNI).

De manera que la tarifa de riego se cobre en dos partes: una, en función de la superficie beneficiada con el riego, para cubrir los gastos fijos de conservación y administración; y otra, en forma volumétrica, para fomentar el uso eficiente del agua.

- Es recomendable definir metodologías de clasificación de gastos y formas similares de integrar presupuestos de egresos, a fin de vigilar que los ingresos se inviertan en forma más eficiente, para cubrir los gastos prioritarios que garanticen un buen servicio de riego y una adecuada conservación.

LITERATURA CITADA

- Allam, M.N. 1987. Allocation model for irrigation water cost: Case study of the Nile Valley in Egypt. *Water Resources Bull.* 23: 207-219.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1991. Informe sobre el ejercicio del presupuesto de los distritos de riego. Gerencia de Distritos de Riego. Distrito Federal, México.
- Correu G., S. 1980. Metodología para estimar cuotas por servicio de riego en el distrito No. 10 Culiacán, Sin. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- DOF. Diario Oficial de la Federación. 1934. Reglamento Provisional para el Servicio de Colonización de Sistema Nacional de Riego Número 09, Valle de Juárez, Chih. Cd. de México. México.
- IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1997. Conservación de Distritos de Riego. México.
- Palacios V., E y A. Exebio G. 1989. Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego. Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Palacios V., E., A. Exebio G. y E. Mejía S. 1994. Diagnóstico de las Asociaciones de Usuarios. Informe Técnico. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Sandoval F., G. 1993. Financiamiento para la expansión y mantenimiento de la infraestructura de servicios de agua potable, saneamiento y preservación de los recursos hidráulicos. Ponencia presentada en el 6° Congreso Nacional de Irrigación. Chapingo, México.
- Santos H., A.L., E. Palacios V., A. Exebio G., L.E. Chalita T. 2000. Metodología para evaluar la distribución de costos e ingresos relacionado con el servicio de riego. *Agrociencia* 34: 639-649.
- Viesca D., E. 1993. Ley de Aguas Nacionales. 1a Reunión Internacional sobre Economía del Agua y Medio Ambiente. Distrito Federal. México.

- Aceves Navarro, Lorenzo A. 209
 Aceves R., Ernesto 485
 Adams Schroeder, Randy H. 253
 Aguilar G., Ramón 199
 Aguilar García, L. 277
 Alanís R., Eduardo 199
 Alcántar González, Gabriel 383, 411, 465
 Alonso Baéz, Moisés 209
 Alvarez, Hugo 45
 Ambrosano, E.J. 17
 Armenta Bojórquez, Adolfo D. 311
 Arrieta Rivera, Agrícola 435
 Baca Castillo, Gustavo A. 267
 Bárbaro, Néstor 7
 Bárcenas Abogado, Patricia 123
 Barrientos D., Leticia 39
 Becerril Román, A. Enrique 113, 123
 Berúmen Padilla, Salvador 329
 Boaretto, Antonio E. 17, 25
 Bonetto, Juan Pablo 7
 Bortoletto, N. 17
 Braz-Filho, Raimundo 371
 Bugarín Montoya, R. 391, 401
 Caballero H., F. 171
 Cabrera B., Evelyn 81
 Camacho, Alejandro D. 147
 Canellas, Luciano P. 371
 Carcaño Montiel, M.G. 141
 Carrera, M.A. 65
 Carrera Martel, M.A. 347
 Carrillo Avila, Eugenio 129, 435
 Castellanos Ramos, Javier Z. 161, 199, 383
 Cecanti, Brunello 81
 Cerveñanasky, A. 71
 Colinas de León, Ma. Teresa 123
 Cortés F., José I. 485
 Cruz Flores, Gerardo 411
 Curtis Monger, H. 89
 De la Isla de Bauer, Ma. de Lourdes 243
 Delgadillo Piñón, Ma. Eugenia 505
 Díaz M., P. 171
 Díaz Martínez, J. Ramón 183
 Domínguez Rodríguez, Verónica I. 253
 Dueñas, Graciela 45
 Durán García, H.M. 227, 235
 Enriquez, Sergio A. 161
 Escalante Estrada, J. Alberto 209, 277
 España, Mingrelia 81
 Espinosa Flores, José 129
 Estrada Botello, Maximiano A. 189
 Etchevers Barra, Jorge D. 189
 Exebio García, Adolfo 217, 505
 Fernández Linares, Luis 423
 Ferrera-Cerrato, R. 303, 423
 Flores Román, David 411
 Fortanelli Martínez, Javier 153
 Fucikovsky Zak, L. 277
 Gallardo V., M. 171
 Gallegos Robles, Miguel 321
 Galvis Spinola, A. 391, 401, 465
 García Calderón, N. 459
 García Estrada, Raymundo S. 311
 García Moya, E. 383
 García Paredes, D. 391, 401
 Gavi Reyes, Francisco 189
 Godoy Avila, Claudio 285
 Gómez, Luis 45
 Gómez D., Jesús D. 359
 González Eguarte, Diego R. 471
 Goyenola, R. 71
 Grageda-Cabrera, O.A. 51, 57, 65, 161
 Guevara, Edgardo 7
 Guillén A., H. 449
 Guridi, Fernando 371
 Gutiérrez C., Ma. del Carmen 101, 359
 Hernández R., Ernesto 485
 Hurtado, B. 161
 Infante Gil, Said 243
 Kohashi Shibata, Josué 267, 459
 Lagunes Espinoza, Luz del C. 347
 Larqué Saavedra, Alfonso 123
 Lerma V., Lucio A. 485
 Lopes Olivares, Fábio 371
 López, Silvia 7
 López Castañeda, Cándido 113
 López Martínez, José Dimas 183, 321, 329
 López Montoya, Isaías 285
 López Reyes, L. 141
 López Upton, J. 291
 Martín, Olga 7
 Martínez, J.G. 161
 Martínez-Cruz, Angélica 141
 Martínez Garza, Angel 123, 209, 267, 459, 465
 Martínez-Ríos, Juan José 89
 Martínez Rubin de Celis, Enrique 183, 321
 Martínez Trinidad, T. 291
 Martins, A.L.M. 17
 Maturano, Marisa 7
 Medina Morales, Ma. del Consuelo 497
 Meira, Santiago 7
 Mejía Saéñz, Enrique 217, 505
 Melaj, Mariana 7

- Mendoza R., Ricardo 485
 Mier, Teresa 147
 Monroy, J. 65
 Montenegro B., Adolfo 39
 Muñoz, Olegario 45
 Muñoz Orozco, Abel 243, 291
 Muñoz Ramos, J.J. 161
 Muraoka, Takashi 17, 25
 Nario, Adriana 33
 Nikolskii Gavrilov, Iourii 189
 Núñez Escobar, Roberto 471
 Obrador Olán, José J. 347
 Ortega Escobar, M. 459
 Ortega Guerrero, A. 161, 199
 Ortiz Arellano, Alvaro 329
 Ortiz S., Carlos A. 359
 Osuna Enciso, Tomás 311
 Otegui, O. 71
 Palacios Vélez, Enrique 217, 505
 Palacios Vélez, Oscar L. 189
 Palma-López, David Jesús 129, 347
 Parada, Ana María 33
 Parra Quezada, Rafael A. 113
 Peña-Cabriales, Juan José 51, 57, 65, 129
 Peña Lomelí, A. 465
 Perdomo, C. 71
 Pérez Zamora, Octavio 337
 Pino N., Inés 33, 39
 Potter, K.N. 171
 Preciado Rangel, Pablo 267
 Ramos Lara, Cristóbal 465
 Rangel Lucio, J.A. 383
 Reyes Juárez, Isidro 285
 Rivera Becerril, Facundo 147
 Rivera Cruz, Ma. del Carmen 423
 Rodríguez, Belkys 81
 Rodríguez González, M.T. 277
 Rodríguez Vázquez, Refugio 423
 Rouanet, Juan Luis 33
 Ruiz Bello, Alejandrina 347
 Ruiz Corral, José Ariel 471
 Rumjanek, Victor M. 371
 Salgado García, Sergio 129, 347
 Salinas G., J.R. 171
 Salinas R., J. 449
 Sánchez, Tamara 45
 Sánchez G., Patricio 359
 Sánchez García, Prometeo 209, 391, 401
 Santamaría Romero, S. 303
 Santos, Gabriel de A. 371
 Santos Hernández, Ana Laura 217, 505
 Scivittaro, W.B. 17, 25
 Serrato C., J. Santos 321
 Serrato Sánchez, Raúl 329
 Servín Montoya, Ma. Eugenia 153
 Silva Gómez, Sonia Emilia 243
 Tapia V., L.M. 449
 Tijerina Chávez, Leonardo 123, 209, 267
 Tirado Torres, J. Luis 267
 Tiscareño L., M. 449
 Trejo López, C. 383
 Trinidad Santos, Antonio 411
 Trivelin, P.C.O. 17
 Trujillo Narcía, Antonio 347
 Turrent Fernández, Antonio 471, 485
 Urrutia E., Francisco 199
 Valdés, María 147
 Valdez Cepeda, Ricardo D. 183, 321
 Vaquera Huerta, H. 383
 Vargas, P. 161
 Vargas C., Carlos 199
 Vargas Hernández, J.J. 291
 Vázquez Alarcón, Antonio 161, 199
 Vega P., A. 449
 Velázquez G., J. de J. 171
 Velázquez Machuca, M.A. 459
 Velázquez V., M. 449
 Velloso, Ary Carlos X. 371
 Vera-Núñez, J.A. 51, 57, 65
 Villalobos, S. 161
 Villarreal Romero, Manuel 311
 Vinalay Carrillo, Laudiel 253
 Vivanco Escobar, Rafael 411
 Volke Haller, Victor 423
 Vuelvas-Cisneros, M.A. 57
 Zamalvide, J. 71
 Zamudio, B. 161
 Zapata, F. 1, 17
 Zavala Cruz., Joel 101, 347

Acevedo Sandoval Otilio Arturo
Adams Schroeder Randy H.
Adriano Anaya Ma. De Lourdes
Aguirre Gómez Arturo
Alarcón Alejandro
Alcántar González Gabriel
Alvarado López Jorge
Alvarez Sánchez Ma. Edna
Alves Bruno
Arteaga Ramírez Ramón
Arteaga Tovar Eduardo
Berenguer Fernández Juan Jesús
Bornemisza Elemer
Bravo Espinosa Miguel
Bravo Lozano Angel Gabriel
Bullón Ames Juan
Buschiazzo E. Daniel
Caballero Mellado Jesús
Cabrera Delgado Jesús Manuel
Cadena Zapata Martín
Campos Cascaredo Adolfo
Castellanos Ramos Javier Z.
Contreras Magaña Efraín
Contreras Jaen David
Coras Merino Pablo M.
Corlay Chee Langen
Cristóbal Acevedo David
Cueto Wong José Antonio
Chávez Aguilera Noel
Díaz Maldonado Salvador
Espinosa E. José Refugio
Espinosa Espinosa Honorio
Espinosa Victoria David
Espinoza Hernández Vicente
Estrada Avalos Juan
Etchevers Barra Jorge D.
Exebio García Adolfo
Faz Cano Angel
Fernández Ordoñez Yolanda M.
Ferrera Cerrato Ronald
Fimbres Fontes Adán
Flores Lui Luis Fernando
Flores Román David
Gama Castro Jorge
García Calderón Norma
García Herrera Gabriel
García Mina Freire José María
García Moya Edmundo
García Pérez Rafael
García Prechác Fernando
Garrigo Reixach Jorgi

Gavi Reyes Francisco
Gaytan Acuña E. Araceli
Geissert Kientz Daniel
Godoy Avila Claudio
Gómez Cruz Manuel Angel
González Norma Susana
González Barrios José Luis
González Chávez Ma. del
Carmen
González Eguiarte Diego R.
Grageda Cabrera Oscar Arath
Granados Sánchez Diodoro
Guizar Nolasco Enrique
Gutiérrez Castorena Carmen
Gutiérrez Coronado Marco
Antonio
Islas Gutiérrez Fabián
Krasil Nov Pavel
Larqué Saavedra Alfonso
López Alcocer Eduardo
López Martínez José Dimas
Lucena Marotta Juan José
Maldonado Torres Ranferi
Martínez Gloria
Martínez Rodríguez J.
Guillermo
Medina Morales Ma. del
Consuelo
Mesta Howard Ana María
Mirafuentes
Meza Dabancens Francisco
Javier
Mora Gutiérrez Manuel
Morras Héctor José María
Nakama Vicente
Narro Farias Eduardo A.
Núñez Escobar Roberto
Olalde Portugal Víctor
Olivares Rodríguez Felipe
Ordaz Chaparro Víctor Manuel
Ortiz Olgún Miguel
Oscar Belloso Claudio
Palacios Mayorga Sergio
Parada Carrasco Ana María
Peña Cabriales, Juan José
Pérez Moreno Jesús
Pérez Nieto Joel
Pineda Pineda Joel
Ramírez Ayala Carlos
Ramírez Gama Rosa María
Rebolledo Robles Héctor H.

Román Calleros Jesús A.
Rossel A. Ramón
Rubio Covarrubias Oswaldo A.
Salgado García Sergio
Salvador Figueroa Miguel
Sánchez del Castillo Felipe
Sandoval Villa Manuel
Schwentenius Rindermann Rita
Solleiro Rebolledo Elizabeth
Soria Ruiz Jesús
Tavares Espinosa Carlos
Tijerina Chávez Leonardo
Tiscareño López Mario
Trinidad Santos Antonio
Urquiaga Segundo
Valdez Ramírez María
Varela Fregoso Lucia
Vargas Hernández Mateo
Vázquez Alarcón Antonio
Vázquez Alvarado Rigoberto E.
Velasco Velasco Vicente A.
Ventura Ramos Eusebio Jr.
Vera Núñez José Antonio
Wall Luis Gabriel
Zapata Flores Felipe
Zermeño González Alejandro
Zermeño González Héctor

NORMAS PARA PUBLICAR EN TERRA

TIPOS DE MANUSCRITOS PARA PUBLICACION

La Revista TERRA acepta trabajos en español, portugués e inglés, sobre temas relacionados con la ciencia del suelo y el agua. Estos pueden ser artículos científicos, notas de investigación, ensayos, cartas al editor y reseñas de libros.

Se entiende por artículo científico aquél basado en un trabajo de investigación en el cual se ha aplicado en forma rigurosa el método científico y se ha estudiado el efecto que tienen diferentes tratamientos sobre la respuesta medible de un sistema, como metodología para comprobar o rechazar una hipótesis claramente establecida en el trabajo.

Las notas de investigación son artículos basados en trabajos experimentales que presentan aspectos metodológicos novedosos o resultados que el autor quisiera publicar antes de finalizar su investigación.

Los ensayos son artículos basados en una recopilación de artículos científicos o informes de investigación, en los que el autor aporta su opinión personal sobre el tema y establece conclusiones respecto al estado actual del conocimiento sobre el mismo.

TERRA publicará en la sección cartas al editor, aquéllas que juzgue convenientes, las cuales deben contener opiniones o comentarios debidamente argumentados. Esta sección tiene por objeto fomentar la discusión sobre temas publicados en sus páginas o de interés para la comunidad científica.

La reseña de libros es una sección destinada a dar a conocer la obra, en particular de autores mexicanos e iberoamericanos, que sea de interés para los científicos del suelo.

Los trabajos que se envíen deberán ceñirse a estas normas para publicación y estarán sujetos a revisión por el Comité Editorial o por quien éste designe, antes de su publicación. No se aceptan trabajos ya publicados o que estén sometidos a la consideración de otras revistas.

CONTENIDO Y FORMATO DEL MANUSCRITO

Los artículos científicos y las notas científicas que se presenten deberán constar de las siguientes partes: 1) título, título en inglés; 2) autor(es); 3) institución(es) del trabajo y dirección de los autores; 4) resumen; 5) palabras clave; 6) summary; 7) index words; 8) introducción; 9) materiales y métodos; 10) resultados y discusión; 11) conclusiones y 12) literatura citada. El Comité Editorial podrá aceptar algunas modificaciones a esta estructura, cuando el tenor del texto así lo aconseje.

Los ensayos deberán constar de las siguientes partes: 1) título, título en inglés; 2) autor(es) y dirección; 3) institución donde se desarrolló el trabajo y dirección de autores; 4) resumen; 5) palabras clave; 6) summary; 7) index words; 8) introducción; 9) desarrollo del tema, con los subtítulos que se estimen convenientes; 10) discusión, cuando proceda; 11) conclusiones y 12) literatura citada.

Las cartas al editor y las reseñas de libros no tienen un formato definido, pero no deberán exceder de dos cuartillas a máquina y a doble espacio.

Los trabajos deben enviarse con original y dos copias, mecanografiados en papel tamaño carta a doble espacio, dejando márgenes de 2.5 cm en los cuatro costados y con las líneas numeradas. Las páginas, incluyendo los cuadros y las figuras, se numerarán progresivamente. El texto no deberá exceder 15 páginas para un artículo científico y de ocho para una nota científica **incluidos cuadros y figuras**. En la primera versión, cada cuadro o figura deberán estar insertados en el texto.

Los cuadros y las figuras contendrán sólo la información esencial y en ningún caso repetirán los datos que se presenten en otra forma. Las unidades que se empleen serán las del Sistema Internacional de Unidades, por ejemplo para ppm usar mgkg^{-1} o mgL^{-1} . Los manuscritos, figuras y cuadros deberán entregarse también en un disquete de 3.5" en procesador Word para Windows de la versión más reciente. Las figuras deberán estar en un formato que permita hacer modificaciones posteriores.

FORMATO PARA PUBLICACION

En Terra, los trabajos se publican con el formato que se describe a continuación; sin embargo, los manuscritos deben ser preparados por los autores como se indicó en la sección anterior y tomando en cuenta, hasta donde sea posible, las instrucciones en esta sección. El personal editorial de Terra preparará la versión definitiva para su impresión en las páginas de la revista.

Título. El título se escribirá con mayúsculas, al inicio, centrado, con negritas y tipo de letra TIMES NEW ROMAN 14, se colocará su traducción al inglés debajo del título en español. El título en inglés se escribirá con minúsculas, excepto la primera letra de cada palabra, centrado, con negritas y tipo de letra TIMES NEW ROMAN 12. Para el encabezado de páginas se requiere un título corto con 60 caracteres o menos.

Autores. Se incluirá el nombre del autor o autores en la manera en que éstos acostumbran escribirlo en sus publicaciones. No se usarán títulos ni grados. La primera letra del nombre y apellidos se escribirán con mayúsculas. Los nombres de los autores se separarán por comas, se centrarán, con negritas, tipo de letra TIMES NEW ROMAN 12, a un espacio después del título en inglés.

Institución(es) patrocinadora(s) y dirección de los autores. El objetivo de esta parte del artículo es dar el crédito respectivo a la institución que patrocinó el trabajo y que los lectores puedan contactar a los autores en caso necesario; la dirección postal y electrónica deben quedar claramente especificadas. Esta identificación se escribirá con minúsculas, excepto las siglas, debajo de los autores, centrado y con tipo de letra TIMES NEW ROMAN 11.

Notas al pie de página. Se podrán utilizar, cuando sea necesario para identificar información adicional; se numerarán progresivamente a través de todo el texto. Deberán emplearse sólo cuando sea imprescindible.

Forma de titular. Los títulos tienen diversos órdenes y señalan automáticamente la posición de una parte del artículo dentro de éste.

Título de primer orden. Es el título principal del artículo.

Título de segundo orden. A este tipo corresponden las diferentes partes del artículo; Resumen, Summary, Introducción, etc. Se escriben con mayúsculas, centrados, con negritas (TIMES NEW ROMAN 11).

Títulos de tercer orden. Se escriben al margen izquierdo, con minúsculas, excepto la primera letra de las palabras, en negritas, con espacios sencillos después del último texto escrito y antes del que continúa.

Títulos de cuarto orden. Se escriben al margen izquierdo, con negritas, con minúsculas excepto la primera letra, con punto seguido de texto. Sin numeración.

Títulos de quinto orden. Se escriben al margen izquierdo, sin negritas, con minúsculas excepto la primera letra, con punto seguido de texto. Sin numeración.

Resumen. Esta sección debe sintetizar, en aproximadamente 300 palabras, los aspectos más importantes del trabajo, esto es, su justificación, importancia, método experimental (cuando corresponda) y las conclusiones más importantes.

Palabras clave. Estas palabras no deben incluir los mismos términos contenidos en el título. Se colocan a un espacio debajo del resumen al margen izquierdo, con un máximo de cinco. El término "palabras clave:" se escribe con letra TIMES NEW ROMAN 11, con cursivas, negritas y las palabras clave con el mismo tipo de letra, cursivas, sin negritas. Ejemplo:

Palabras clave: Rizósfera, agroquímicos.

Summary. Se siguen las mismas normas que para el resumen en español.

Index words. Se seguirán las instrucciones dadas para palabras clave.

Introducción. En esta sección se indica la motivación, la importancia y los objetivos del trabajo que llevan implícitas las hipótesis del mismo. Contiene, además, los aspectos más relevantes del tema tratados por otros autores e identificados en la revisión de literatura. La introducción no debe exceder tres cuartillas a doble espacio.

Materiales y Métodos. Esta sección debe describir las características relevantes de los materiales usados en el estudio y los métodos experimentales empleados. Se le debe dar particular importancia a la descripción del método experimental utilizado para lograr los objetivos planteados. Debe mostrar concordancia plena con las hipótesis.

Resultados y Discusión. Aquí se incluyen los resultados obtenidos en la investigación. Estos se presentarán en forma de texto, cuadros, o figuras, estos últimos no deberán duplicar la información presentada en el texto. La información presentada en cuadros y figuras tampoco deberá duplicarse, e

incluira resultados que puedan ser fácilmente calculables.

En la discusión se resaltarán los principios más importantes y las relaciones causa-efecto derivadas del análisis de los resultados. Además, se deberá explicar, en función de las observaciones hechas, el porqué de lo observado sin establecer suposiciones. Los resultados obtenidos se compararán con los de otros investigadores y se señalarán las divergencias y las semejanzas.

Conclusiones. Las primeras conclusiones que se presenten deben ser aquellas correspondientes a los objetivos planteados. Se pueden incluir, además, otras conclusiones relevantes y recomendaciones que emanen del trabajo.

Citas en el texto. Las citas en el texto se harán de acuerdo con la forma en que éstas participan en la oración. Se seguirán las siguientes reglas: 1) se citará el apellido principal del(los) autor(es) y el año, cuando se trate de uno o dos autores, y el apellido principal del primer autor seguido de *et al.* y el año cuando se trate de tres o más autores; 2) las citas, cuando más de una, se colocarán en orden cronológico; 3) cuando el nombre del(los) autor(es) participa en la oración se colocará el apellido principal seguido del año entre paréntesis, ejemplo: Martínez (1982) observó que., Carrasco (1983) y Merino (1984) encontraron gran diferencia.; 4) cuando la cita se agrega al final de la oración los nombres de los autores y el año se colocarán entre paréntesis separados por una coma, ejemplo: al final de la cosecha (Martínez, 1982) o (Carrasco, 1983; Merino, 1984) o (Bravo *et al.*, 1979); 5) cuando el autor tiene más de una publicación en un año se adiciona a este a, b, c, ejemplo: (Moreno, 1984a) o (Moreno, 1984b); 6) las comunicaciones personales se citarán sólo en el texto, ejemplo: (R. Nuñez E., 1984 Comunicación personal); 7) Las referencias bibliográficas consultadas en internet, se redactarán de acuerdo con lo enunciado previamente, además de incluir la dirección electrónica y fecha en que se obtuvo la referencia.

Howell, A. T. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture.

<http://agron.sci-journals.org/cgi/content/abstract/93/2/281>

(28 mayo 2001).

Literatura Citada. Para confeccionar la lista de citas de literatura se seguirán las normas que se detallan con ejemplos a continuación.

1. Caso de artículos en revistas seriadas, ejemplo:
Nuñez E., R., A. Trinidad S. y J.J. Martínez H, 1984. Efecto del estiércol de vacuno en la producción de maíz. *Agropecuaria Técnica* 54: 385-388.

Obsérvese que la inicial del nombre propio se ha trasladado al final de los apellidos sólo para el caso del primer autor, y que se ha mantenido la inicial del segundo apellido y del nombre propio en el lugar que corresponde en el resto de los casos. Es común que los nombres ingleses se escriban con dos nombres personales y un apellido; ejemplo: L.J. Brown, el cual se redactará en caso de ser primer autor como Brown, L.J. y como L.J. Brown, si es coautor.

2. Caso de artículos en una publicación colectiva no periódica con o sin editor, ejemplo:

a) con editor

Turrent F., A. 1984. Los agrosistemas del trópico. pp. 315-328. *In:* E. Hernández X. (ed.). Los sistemas agrícolas de México. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

b) sin editor

Cortés F., J. I. 1984. El manejo de los frutales en zonas frías. pp. 181-192. *In:* La fruta y su perspectiva en México. CONAFRUT. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F.

3. Caso de los boletines técnicos u otras publicaciones seriadas no periódicas, ejemplo:

Clement, H.F. 1952. Factors affecting the growth of sugarcane. Univ. Hawaii Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 18.

4. Caso de los libros, ejemplo:

Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de los suelos. Traducción al español de J. Huerta. Editorial Omega. Barcelona, España.

Zamudio H., B. 1970. Las especies latifoliadas del Cono Sur. 2a. edición. Editorial Inca. Lima, Perú.

No deben incluirse referencias de tesis ni de trabajos publicados en memorias. La lista de citas se confeccionará en orden alfabético, con sangría francesa de 0.6 cm exceptuando el nombre del autor, con tipo de letra TIMES NEW ROMAN 9, sólo se incluirá en ella los trabajos citados en el texto.

Otros Aspectos del Manuscrito

Para referir a plantas, animales u otros organismos, usar el nombre en latín binomial y con letras itálicas. A continuación se dan algunas indicaciones acerca de los cuidados y consideraciones que hay que tomar en cuenta para la elaboración de las figuras, cuadros, mapas, etc. Los cuadros deben ser numerados en forma secuencial con números arábigos y en el mismo orden como aparecen en el texto. Los cuadros y las figuras se emplean para reemplazar al

texto, cuando el contenido de éstos no puede expresarse claramente con palabras o su uso contribuye a un ahorro importante de espacio. Los cuadros y las figuras deben ser claros, simples y concisos. Para ello es necesario seleccionar los datos de modo que se presenten sólo aquellos que se emplearán para hacer énfasis en algún aspecto o que expliquen otros. Los datos deben ordenarse en una forma tal que sean fáciles de interpretar.

En el pie de cuadro se incluirán las llamadas que sean pertinentes. Los asteriscos se reservarán para indicar significación a 5% (*) y 1% (**), respectivamente, es recomendable incluir el error estándar promedio en las figuras. Otras notas serán señaladas con los siguientes símbolos en orden: †, ‡, §, ¶, #, ††, ‡‡, ..., †††.

Los cuadros deben ser numerados en forma secuencial con números arábigos y en el mismo orden como aparecen en el texto. Los cuadros deben tener tres líneas horizontales continuas: al inicio del cuadro, al inicio del campo del cuadro (no en el encabezamiento) y al final. El campo y el encabezamiento de las columnas se pueden dividir a conveniencia del autor. No se deben añadir líneas verticales. Los encabezamientos, de columnas y líneas, se describirán con minúsculas, excepto la primera letra de la oración. Las unidades se colocan debajo de la segunda línea horizontal. Se empleará sólo el número de cifras significativas necesarias para destacar el punto que se desee. Los cuadros no podrán ser mayores que una página tamaño carta, considerando los márgenes antes señalados.

Los mapas y las figuras no deben exceder las dimensiones de una página tamaño carta con márgenes especificados previamente. La leyenda debe ser con letras y números lo suficientemente grande (con minúscula excepto la primera letra), como para que puedan leerse al ser reducidos, al igual que el grosor de los ejes y líneas interiores. En una figura lo que interesa destacar es el contenido y no los ejes. Consecuentemente, el grosor de estos últimos tiene que ser menor que el de las líneas interiores. Los puntos experimentales deben marcarse visiblemente con símbolos que puedan diferenciarse entre sí, sin color en el relleno y sin marco, por ejemplo: ○● □■ △▲. Para dividir los ejes se deben escoger intervalos constantes para cada uno.

Los mosaicos fotográficos deben entregarse montados en hojas de papel, totalmente terminados, con leyenda y numeración. El aumento de las microfotografías debe indicarse en la leyenda.

Agradecimientos. Podrán incluirse al final del texto, esto es, después de las conclusiones y antes de la literatura citada.

Información Adicional.

Para mayor información sobre la preparación de manuscritos se recomienda consultar el libro: Alvarado L.J. 2000. Redacción y preparación del artículo científico. Segunda edición. Publicación Especial 11. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. México y Colegio de Postgraduados - Agrociencia.

Septiembre de 2002.

TERRA

Journal of the Mexican Society of Soil Science

Instructions to Authors

SUBMISSION OF MANUSCRIPTS

Submission of manuscripts for publication should be sent in triplicate to:

Editorial Office of Terra
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
Apartado Postal 45
56230 Chapingo, Edo. de Mexico, Mexico.
Fax: +52 (595) 95 4 80 76
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

Upon receipt of a manuscript the authors will receive the file number of their paper. This number should be quoted in all correspondence. Papers already published, or under consideration elsewhere cannot be accepted.

TYPE OF MANUSCRIPT

The Journal welcomes concise papers presenting original research findings from authors throughout the world, making a significant contribution to the advancement of knowledge of existing soil science concepts. The Journal publishes papers of topics related to Soil Science, Water Management and Environmental Sciences. The contributions may be Scientific Papers, Research Notes and Critical Reviews. The Journal publishes also Letters to the Editor and Book Reviews.

Scientific Papers must be generated from original research in which the scientific method was implemented to accept or reject a given hypothesis. Work based on limited experimentation will not generally be acceptable.

Work of local interest only is not considered appropriate for this International Journal.

Research Notes are articles based on experimental work that presents new methodological aspects or important results that the author wants to publish before the research project is completed.

Critical Reviews are articles in which the author reports the State of the Art about a given topic of interest to the scientific community, based on the published literature, establishing some conclusions regarding the analysis of the published data.

MANUSCRIPT

The manuscripts should be provided with a **title page**, containing the title typed in uppercase letters, centered, in English and Spanish; author(s) name(s) and affiliation(s) and including a complete address for correspondence (e-mail). A short title not exceeding 40 characters must be provided for the running headlines. Manuscripts should be typed in double space, with at least 2.5 cm margin on both sides.

Scientific Papers and Research Notes should be divided into the following sections: 1) **Summary** in English and Spanish, not exceeding 300 words for scientific papers and 150 words for research notes; 2) **Index words**, include up to five; 3) **Introduction**, which should set the work in context, presenting the essential background and including a concise statement of the objectives; 4) **Material and Methods**, indicating relevant details of the experimental methods and design, the techniques and statistical methods used in the study, so that the results can be judged for validity and so that previous experiments may serve as a basis for the design of future experiments. It is

highly recommended to describe the soil type and characteristics in which the experiment was conducted; 5) **Results and Discussion**, indicating numerical results in tables or figures and should not be repeated in the text. All statements should be based on proof and not supposition, and should be supported with statistical analysis, i.e. Standard Error and Degrees of Freedom, Least Significant Difference, and Multiple Range Test. The level of significance should be indicated in the text and tables. Discussion should briefly relate the author's results of other works on the subject and give the author's conclusion; 6) **Acknowledgments** and 7) **References**.

STYLE

The acceptable languages are Spanish, English and Portuguese. For plants, insects and pathogens give the Latin binomial name (in Italics) at first mention and do not include them in the title, but in the summary. The International System of Units is required. Follow Chemical Abstracts and its indexes for chemical names. Give cation exchange capacity in mmol kg^{-1} . For ppm use mg kg^{-1} or mg L^{-1} . Use kg ha^{-1} or t ha^{-1} . For time units use min, h, d, month (abbreviate to three letters, i.e. Jan, Feb). A zero must always precede a decimal point e.g. 0.24. All abbreviations must be explained at first mention in the text. The use of asterisks is reserved to indicate statistical significance *($P < 0.05$), **($P < 0.01$), ***($P < 0.001$)

MANUSCRIPTS ON DISK

The original manuscript should always be sent on paper. After acceptance, the submission of the final version must be on disk, formatted for use on windows based computers. An accompanying printout should be provided. Word software is preferred.

Headings should be used in dividing and subdividing the paper e.g.

First-order headings: Centered, boldface type and uppercase letters Times New Roman 14. Reserved for the main title of the paper.

Second-order headings: Centered, boldface type and uppercase letters. Times New Roman 11. Used for the different parts of the manuscript i.e. Introduction.

Third-order headings: Against left margin, bold face type and first letter of each word in uppercase letter.

Fourth-order headings: In the paragraph. Lowercase letters except the first one, boldface type.

TABLES

These must be numbered consecutively with Arabic numerals, in the same order as they are mentioned in the text. Tables are always printed in a small letter type and should be provided with descriptive headings. All column headings should begin with a capital letter. Table notes should be referred to by superscript: †, ‡, §, ¶, #, ††, †††. When preparing the tables it should be considered that they could be printed in one column (85 mm) or two columns (180 mm). Tables must have three horizontal solid lines: one at the beginning of the table, the second at the beginning of the field and the last one at the end of the table. No vertical lines are allowed. All tables must present statistic parameters to do the appropriate comparisons.

FIGURES

These can be photographs, graphs, charts or diagrams. They must be included in the text. Figures may not reproduce the same matter as tables. Originals of figures must be provided of good quality, drawn or printed clearly in black on white. There should be no numbering or lettering on the originals but in the copies. Vertical axes should be labeled vertically. Keep in mind that the final reduced size is 9-point type for numbers on the axis scale, 10 to 11 points for the axis labels and 7 to 8 points for inside legends. A typewritten, double-spaced list of legends of all figures must be supplied. Each legend should contain sufficient explanation to be meaningful without cross-referencing, giving a key to all the symbols on it. The preferred symbols are ○● □■ ▲▲, Standard Errors of the means are strongly recommended to be included in the figures.

LITERATURE CITED

In the text the references should be quoted by the author's last name followed by the year and in date order, e.g. (Laird, 1990; Pratt and Adriano, 1993; Jensen *et al.*, 1995) or Follett (1991). The list of references should be provided at the end of the text, listing in alphabetical order, surname of first author and initials, initials and surname of

following authors, year of publication, title of the paper, name of the journal in abbreviation, volume, and first and last page, e.g.:

Flach, K.W., W.D. Nettleton, and O.A. Chadwick. 1992. The criteria of duripans in the US soil taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize silica indurated soils. *Terra* 10: 34-45.

Goijsberg, G. and A. Aguilar-Santelises. 1985. pH del suelo y necesidades de cal. pp. 17-24. *In*: A. Aguilar-Santelises, J.D. Etchevers, J.Z. Castellanos (eds.). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación Especial 1. Chapingo, México.

Ryan, T.P. 1989. Statistical methods for quality control. John Wiley & Sons, New York.

Thompson, T.L. and T.A. Doerge. 1996. Nitrogen and water interactions in subsurface trickle irrigated leaf lettuce. II. Agronomic, economic, and environmental outcomes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 168-173.

Smith, P. G., and T. Jones. Title of article (abstract). *JASH* 4(3):54-59, <http://asae.frymulti.com> Aug. 9, 2000.

The list of references should be typed in double space throughout.

PROOFS

The proofs will be sent to the authors to enable them to check correctness of the typesetting. They should be handled promptly and returned to the editorial office. No changes other than corrections should be made.

September 2002



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

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos;
km 38.5 Carr. México -Texcoco; Tel: 01 595 95 460 24; Fax 01 595 95 480 76
(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 MEJOR MOMENTO PARA APOYAR FINANCIERAMENTE 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.