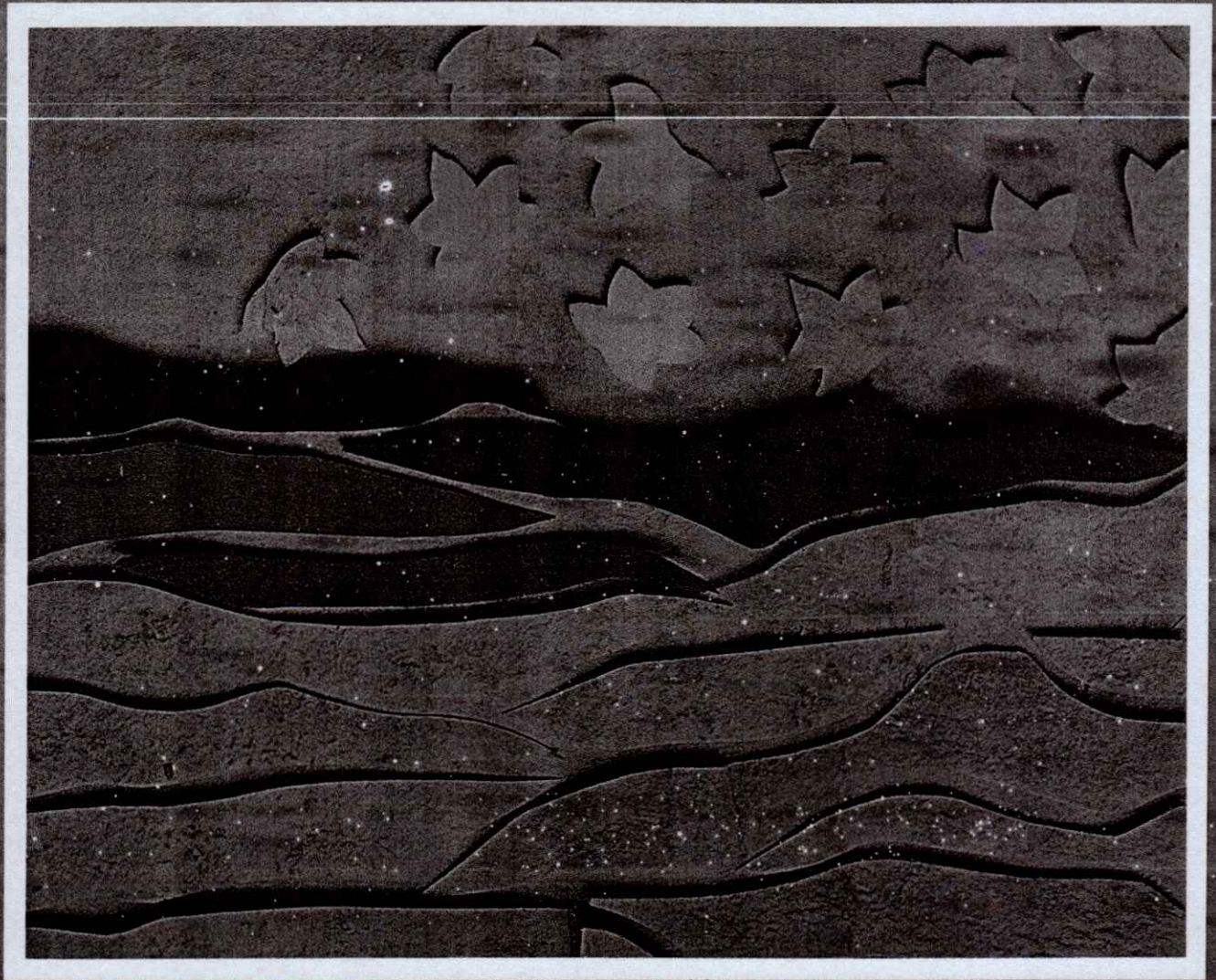


ISSN 0187-5779

TERRA

ENERO - MARZO DE 2000 • VOLUMEN 18 • NUMERO 1



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

TERRA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 1997-1999

Presidente

Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro

Vicepresidente

M.C. José Cisneros Domínguez

Secretario General

Dr. Prometeo Sánchez García

Tesorero

Dr. Fernando de León González

Secretario Técnico

Dra. Edna Álvarez Sánchez

Secretario de Relaciones Públicas

M.C. Ricardo Torres Cossío

Secretario de Eventos Nacionales

e Internacionales

Vocal

Dr. Francisco Gavi Reyes

Vocal

Biól. Rogelio Oliver Guadarrama

M.C. Gaspar Romero Hernández

DIVISIONES Y DISCIPLINAS

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

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

División II: Relación Suelo - Clima - Biota

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

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

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

División IV: Educación y Asistencia Técnica

- a) Educación
- b) Crédito y Asistencia Técnica

TERRA registro en trámite.

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Enero - Marzo de 2000 Volumen 18 Número 1

ISSN 0187 - 5779

Los artículos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta revista, citándola como fuente de información. Las contribuciones a esta revista deben enviarse, en original y dos copias, redactadas conforme a las Normas para Publicación en la Revista TERRA a:
Editor de la Revista TERRA. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Estado de México, México.

Oficinas: Edificio del Departamento de Suelos
Universidad Autónoma Chapingo
56230 Chapingo, Estado de México.

Teléfono: +01(5) 954 60 24 Fax: +01(5) 954 80 76
e-mail: smcs@taurus1.chapingo.mx

EDITOR EN JEFE

EDITOR ADJUNTO

EDITORES TÉCNICOS

Dr. Antonio Vázquez Alarcón

Dr. Javier Z. Castellanos

Dr. Gabriel Alcántar González

Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro

Dr. Juan José Peña Cabrales

Dr. Xavier X. Uvalle Bueno

Dra. Edna Álvarez Sánchez

Dr. Mateo Vargas Hernández

Dra. Carmen Gutiérrez Castorena

Dr. David Espinosa Victoria

M.C. Jorgo Alvarado López

M.C. Langen Corlay Chee

Ina Aalmer de Aguilar

Diane Fumiko Miyoshi Udo

EDITORES DE ESTILO

EDITORIA DE ESTILO

EN INGLÉS

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

Ina Aalmer 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

M.C. Margarita E. Gutiérrez Ruiz

Dr. Reggie J. Laird

Dr. Angel Martínez Garza

Dr. Roberto Núñez Escobar

Dr. José Luis Oropeza Mota

Dr. Carlos Ortiz Solorio

Dr. Alejandro Velázquez Martínez

Dr. Enrique Palacios Vélez

Dr. Oscar L. Palacios Vélez

Dr. Benjamín V. Peña Olvera

Dr. Antonio Turrent Fernández

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

Dr. Eduardo Besoain M.

Dr. Winfried E. H. Blum

Dr. Elmer Bornemisza

Dr. Luis Alfredo de León

Dr. Hari Eswaran

Dr. Anthony Fischer

Dr. Juan F. Gallardo Lancho

Dr. Renato Grez Z.

Dr. Alberto Hernández

Dr. José M. Hernández Moreno

Dr. Eric S. Jensen

Dr. Walter Luzio Leighton

Dr. John T. Moraghan

Dr. Héctor J. M. Morrás

Dr. Christian Prat

Dr. Parker F. Pratt

Dr. Paul Quantin

Dr. José Rodríguez

Dr. Karl Stahr

Dr. Bernardo Van Raij

Dr. Rafael Villegas

Dr. Eduardo Zaffaroni

Chile

Austria

Costa Rica

Colombia

E.U.A.

Australia

España

Chile

Cuba

España

Dinamarca

Chile

E.U.A.

Argentina

Francia

E.U.A.

Francia

Chile

Alemania

Brasil

Cuba

Brasil

TERRA

ENERO - MARZO DE 2000 • VOLUMEN 18 • NUMERO 1

DIVISION I

- 1 Efecto del tipo de suelo, humedad y fuente de nitrógeno en las emisiones de N_2 y N_2O .
O. A. Grageda-Cabrera, A. Vermoesen, O. van Cleemput y J. J. Peña-Cabriales
- 11 Delimitación y caracterización de las tierras con uso inadecuado para la agricultura en el Distrito de Desarrollo Rural 004, Celaya, Guanajuato.
Hilario García Nieto, Jorge López Blanco, Rafael Moreno Sánchez, Ma. de Lourdes Villers Ruiz y Rolando R. García Daguer
- 27 Sitios de ocurrencia y predicción de rendimientos de maíz a través de índices de vegetación de imágenes de satélite.
Jesús Soria Ruiz, Carlos A. Ortiz Solorio, Fabián Islas Gutiérrez y Victor Volke Haller
- 35 Suelos arcillosos de la zona oriente del Estado de México.
Miguel A. Segura Castruita, Ma. del Carmen Gutiérrez C., Carlos A. Ortiz S. y David J. Gómez D.

DIVISION II

- 45 Estimación de las necesidades hídricas del tomate.
Arnulfo González Meza y Bertha A. Hernández Leos
- 51 Eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno, y rendimiento del girasol, en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido.
Victor M. Olalde Gutiérrez, J. Alberto Escalante Estrada, Prometeo Sánchez García, Leonardo Tijerina Chávez, E. Mark Engleman Clark y Angel A. Mastache Lagunas

DIVISION III

61 Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol.

*Agustín Navarro Bravo, Benjamín Figueroa Sandoval,
Victor M. Ordaz Chaparro y Félix V. González Cossio*

71 Fertilización en papa y su efecto residual en maíz, en dos agrosistemas de la Sierra Veracruzana.

*José Luis Aguilar Acuña, Rosalío López Morgado,
Victor Volke Haller y Abdul Khalil Gardezi*

DIVISION IV

83 Caracterización de productores agrícolas de seis distritos de desarrollo rural de Zacatecas.

*Guillermo Galindo González, Wilfrido César Tabares Rodríguez
y Guillermo Gómez Aguirre*

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

President
Vicepresident
Secretary
Treasurer
Technical Adviser
Public Relations
National and International Events
Secretary
Voter
Voter

Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro
M.C. José Cisneros Domínguez
Dr. Prometeo Sánchez García
Dr. Fernando de León González
Dra. Edna Alvarez Sánchez
M.C. Ricardo Torres Cossío

Dr. Francisco Gavi Reyes
Biól. Rogelio Oliver Guadarrama
M.C. Gaspar Romero Hernández

EDITOR-IN-CHIEF
ASSOCIATE EDITOR
TECHNICAL EDITORS

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

STYLE EDITORS

ENGLISH EDITOR

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- Education
- Credit and Technical Assistance

TERRA Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
January - March, 2000 Volume 18 Num. 1

ISSN 0187 - 5779

The authors take full responsibility for the articles published. Partial or total reproduction of the content of this journal is authorized, as long as this publication is cited as the information source. When submitting articles to this journal, an original and two copies must be sent to:
Editor de la Revista TERRA, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Estado de México, México.

Office address: Edificio del Departamento de Suelos
Universidad Autónoma Chapingo
56230 Chapingo, Estado de México.

Telephone: +52 (5) 954 60 24 Fax: +52 (5) 954 80 76
e-mail: smcs@taurus1.chapingo.mx

EDITORIAL STAFF

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

Cover design

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Jesús Caballero Mellado
Dr. Lenom J. Cajuste
Dr. Ronald Ferrera Cerrato
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval
M.C. Margarita E. Gutiérrez Ruiz
Dr. Reggie J. Laird
Dr. Angel Martínez Garza
Dr. Roberto Núñez Escobar
Dr. José Luis Oropeza Mota
Dr. Carlos Ortiz Solorio
Dr. Alejandro Velázquez Martínez
Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. Oscar L. Palacios Vélez
Dr. Benjamín V. Peña Olvera
Dr. Antonio Turrent Fernández

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

TERRA

JANUARY - MARCH, 2000 • VOLUME 18 • NUMBER 1

DIVISION I

- 1 Effect of soil type, moisture and N source on the N_2 and N_2O emissions.
O. A. Grageda-Cabrera, A. Vermoesen, O. van Cleemput, and J. J. Peña-Cabriales
- 11 Delineation and characterization of land unsuitably used for agriculture in the Rural Development District 004, Celaya, Guanajuato.
Hilario García Nieto, Jorge López Blanco, Rafael Moreno Sánchez, Ma. de Lourdes Villers Ruíz, and Rolando R. García Daguer
- 27 Occurrence sites and estimation of maize yields with NDVI from satellite images.
Jesús Soria Ruíz, Carlos A. Ortiz Solorio, Fabián Islas Gutiérrez, and Víctor Volke Haller
- 35 Clay soils of the eastern zone of the State of Mexico.
Miguel A. Segura Castruita, Ma. del Carmen Gutiérrez C., Carlos A. Ortiz S., and David J. Gómez D.

DIVISION II

- 45 Estimation of water requirements of tomato.
Arnulfo González Meza and Bertha A. Hernández Leos
- 51 Water and nitrogen-use efficiency and sunflower yield as affected by nitrogen and plant density in hot climate.
Victor M. Olalde Gutiérrez, J. Alberto Escalante Estrada, Prometeo Sánchez García, Leonardo Tijerina Chávez, E. Mark Engleman Clark, and Angel A. Mastache Lagunas

DIVISION III

61 Effect of tillage on soil structure and on germination and development of corn and beans.

*Agustín Navarro Bravo, Benjamín Figueroa Sandoval,
Víctor M. Ordaz Chaparro, and Félix V. González Cossio*

71 Fertilization on potato and its residual effect on corn in two agrosystems of the Sierra Veracruzana.

*José Luis Aguilar Acuña, Rosalío López Morgado,
Víctor Volke Haller, and Abdul Khalil Gardezi*

DIVISION IV

83 Characterization of agricultural producers of six rural development districts in Zacatecas.

*Guillermo Galindo González, Wilfrido César Tabares Rodríguez,
and Guillermo Gómez Aguirre*

EFFECTO DEL TIPO DE SUELO, HUMEDAD Y FUENTE DE NITROGENO EN LAS EMISIONES DE N₂ Y N₂O

Effect of Soil Type, Moisture and N Source on the N₂ and N₂O Emissions

O. A. Grageda-Cabrera¹, A. Vermoesen², O. van Cleemput² y J. J. Peña-Cabriales³

RESUMEN

De los aproximados 90 Tg de nitrógeno consumidos anualmente en forma de fertilizantes, cerca de 3 a 4 Tg de nitrógeno se vierten a la atmósfera en forma de óxidos de nitrógeno; estos gases están involucrados en el calentamiento de la atmósfera y la destrucción de la capa de ozono estratosférica. Alrededor de 18% de las emisiones se deben a procesos microbiológicos asociados con las actividades agrícolas. Dada la importancia económica y ecológica de las pérdidas de nitrógeno, se efectuó un experimento de laboratorio para determinar el potencial de desnitrificación y nitrificación sobre las emisiones de N₂ y N₂O. Se estudió el tipo de manejo del suelo (rotación leguminosa-leguminosa y hortaliza-hortaliza), la fuente de N (urea y KNO₃) y la humedad (0.66 y 1.66 de la capacidad de campo). Se empleó la técnica de incubación con acetileno y la detección del N₂ y N₂O generado se realizó por cromatografía de gases. Los resultados obtenidos mostraron que 81.4% de las emisiones de N₂ y N₂O se debieron a desnitrificación y 18.6% a nitrificación. Respecto a la fracción molar de los productos emitidos, el principal fue el N₂O (82.7%) y en menor proporción el N₂ (17.3%). Las diferencias observadas en la producción de gases nitrogenados por el efecto del suelo, tal vez se debieron al contenido de materia orgánica, ya que la actividad microbiana, en general, tiene alta correlación con el carbono orgánico fácilmente degradable. Por otro lado, la adición de fertilizantes resultó en una mayor emisión de N₂ y N₂O que en las muestras control. La aplicación de KNO₃ favoreció la emisión en mayor proporción que

cuando se aplicó urea, debido a una mayor disponibilidad de N-NO₃⁻ en el suelo. Se observaron diferencias altamente significativas entre los tratamientos de humedad del suelo. De la producción total de gases nitrogenados, más de 80% se obtuvo al mantener la humedad del suelo a 1.33 de la capacidad de campo; a mayor humedad disminuye el nivel de oxígeno, favoreciendo al proceso de desnitrificación. El trabajo ilustra que estas pérdidas gaseosas de N en los suelos de esta región agrícola de México son de gran importancia económica y ecológica.

Palabras clave: Amonio, desnitrificación, fertilizantes nitrogenados, nitrato, nitrificación, óxido nitroso.

SUMMARY

A laboratory incubation experiment was carried out to study the effect of soil management (legume-legume and vegetable-vegetable), nitrogen source (urea and KNO₃), and soil moisture content (0.66 and 1.33 of field capacity) on the emissions of N₂ and N₂O generated by microbial processes of nitrification and denitrification. Soil samples contained in 180 mL vol. glass containers were incubated at 25 °C. The acetylene incubation technique was used and N₂ and N₂O were determined by gas chromatography. The results showed that the emissions of N₂ and N₂O were mainly due to denitrification (81.4%) and to a lesser extent to nitrification (18.6%). With regard to the molar fraction of the products, the predominant gas was N₂O (82.7%) whereas N₂ was found in lower proportion (17.3%). Higher N₂ and N₂O values were detected in the soil with a greater content of organic matter. Similarly, the addition of fertilizers, particularly KNO₃, enhanced the emission of the gases. Significant differences were observed between treatments. Thus, more than 80% of the total production of N₂ and N₂O was obtained when the soil was maintained at 1.33 field capacity. These results illustrate that these gaseous losses of N are of great economical and ecological significance in this region of Mexico.

¹ INIFAP, Apartado Postal 112, 38110 Celaya, Gto. México.

² Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, University of Ghent, Coupure Links 653, B-9000 Ghent, Belgium.

³ CINVESTAV-IPN, Laboratorio de Microbiología Ambiental, Irapuato, Gto., México.

e-mail del autor correspondiente: jpena@irapuato.ira.cinvestav.mx

Recibido: Enero de 1998.

Aceptado: Junio de 2000.

Index words: Ammonium, denitrification, N-fertilizers, nitrate, nitrification, nitrous oxide.

INTRODUCCION

El óxido nitroso (N_2O) es un gas traza cuya concentración actual, comparada con la de tiempos preindustriales se ha incrementado en más de 50%. Recientemente ha atraído gran interés, ya que tiene una capacidad de absorción infrarroja 150 veces más efectiva que el CO_2 y se considera responsable de 4 a 5% del efecto total de invernadero (Bouwman, 1990). Además, por reacciones fotoquímicas en la estratosfera se transforma en óxido nítrico (NO), el cual destruye catalíticamente el ozono estratosférico y reduce los niveles de radicales OH que intervienen en la destrucción oxidativa de otro gas contaminante, el CH_4 . Como no hay una desaparición química del N_2O , éste tiene un periodo de vida media de ca. 150 años y se incrementa a razón de 0.2% anualmente (Crutzen, 1979, 1981; Bouwman, 1990; Houghton *et al.*, 1990; Duxbury, 1994).

Las emisiones globales de N_2O se deben en 90% a procesos microbiológicos, y se estima que las actividades agrícolas contribuyen con 18% (2.1 Tg N a^{-1}) de la emisión total. Los suelos agrícolas son muy importantes en la emisión de óxidos de nitrógeno (N_{ox}) debido a la alta disponibilidad de compuestos nitrogenados inorgánicos y carbono orgánico, principalmente por la aplicación de fertilizantes nitrogenados y la mineralización de la materia orgánica (Conrad y Seiler, 1980; Duxbury, 1994; Granli y Bøckman, 1994).

La nitrificación (oxidación de NH_4^+ a NO_3^-) y desnitrificación (reducción de NO_3^- a NO, N_2O ó N_2) son los principales procesos microbianos involucrados en la producción de NO, N_2O ó N_2 . Es preciso enfatizar que el NO se genera en ambientes muy específicos, como suelos ácidos con alto contenido de materia orgánica. Otras reacciones bioquímicas de oxidación y reducción, como la fijación de N_2 , amonificación y quimiodesnitrificación, también pueden producir trazas de N_{ox} (Knowles, 1982; Van Cleemput y Baert, 1984).

La nitrificación es un proceso importante para la fertilidad del suelo. Sin embargo, algunos aspectos negativos de este proceso han sido objeto de estudio durante los últimos años, especialmente la lixiviación de NO_3^- y emisión de NO y N_2O . Para la nitrificación, que es un proceso oxidativo, se necesita un suelo aireado. La tasa de producción de N_{ox} se incrementa

con la temperatura, concentración de NH_4^+ , pH próximo a la neutralidad y disminución de la relación C/N de la materia orgánica (Haynes, 1986; Skiba *et al.*, 1993; Vermoesen *et al.*, 1996).

Por otro lado, la desnitrificación tiene un gran potencial como una de las principales vías de pérdidas de nitrógeno en los sistemas agrícolas. A partir de estudios sobre balance de nitrógeno empleando técnicas isotópicas (^{13}N y ^{15}N), se han estimado pérdidas debidas a la desnitrificación de hasta 73% del nitrógeno aplicado en el fertilizante (Knowles, 1982; Hallmark y Terry, 1985; Sahrawat y Keeney, 1986; Sanaa, 1993). La actividad desnitrificante es controlada por varias condiciones ambientales, como la humedad del suelo, concentración de oxígeno, concentración de NO_3^- , contenido de carbono, pH y temperatura (Tiedje, 1988; Vermoesen *et al.*, 1993; Nelson y Terry, 1996).

Debido a que la nitrificación y desnitrificación son procesos microbianos dependientes de las condiciones ambientales, la emisión de N_{ox} puede disminuirse y manipularse al controlar, *v. gr.*, la forma química, el tiempo, el método y la tasa de aplicación del fertilizante nitrogenado (Skiba *et al.*, 1993). Sin embargo, no existen normas generalizadas, ya que en cada localidad intervienen un amplio rango de factores de suelos, condiciones climáticas y sistemas de cultivo.

En la región de El Bajío Guanajuatense (5×10^5 ha) se aplican anualmente cerca de 150 000 Mg N y, en términos generales, se desconocen los mecanismos de pérdidas de cerca de 80 000 Mg N anuales, considerando que la eficiencia de recuperación de nitrógeno por parte de los cultivos es menor que 50%. Además, por los estudios realizados en la región sobre eficiencia de fertilizantes nitrogenados empleando la técnica isotópica ^{15}N (Vázquez *et al.*, 1994) y poblaciones bacterianas desnitrificantes (De la Fuente y Peña, 1988), se infiere que gran parte de estas pérdidas de nitrógeno son en forma de N_{ox} por los procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación antes descritos.

El objetivo del presente estudio fue determinar el potencial de producción de N_{ox} por nitrificación y desnitrificación en un suelo típico de El Bajío Guanajuatense. Asimismo, evaluar el efecto del tipo de suelo, humedad y fuente de nitrógeno sobre la emisión de N_2 y N_2O .

MATERIALES Y METODOS

Los suelos utilizados en el experimento fueron de tipo Vertisol pélico, con un pH de 6.1 (1:2, en agua) y textura arcillosa, colectados en dos sitios con manejo diferente: 1) cultivo continuo de leguminosas (Suelo A, contenido de 1.68% de materia orgánica) y 2) cultivo continuo de hortalizas (Suelo B, contenido de 1.11% de materia orgánica), ambos procedentes del municipio de Abasolo, Guanajuato, México.

Se colectaron muestras compuestas a una profundidad de 20 cm, tomando al azar varios puntos en una superficie de 2 ha. Las muestras se secaron al aire (14 días), se pasaron a través de un tamiz de 2 mm de apertura de malla y se almacenaron a 4 °C hasta su uso. Posteriormente, se determinó su capacidad de campo (CC) (Anderson e Ingram, 1993).

Las unidades experimentales consistieron de 30 g de suelo colocado en frascos de 180 mL con una área basal de 22 cm². Se adicionó agua para obtener dos niveles de humedad; uno, correspondiente a 0.66 de CC (para promover el proceso de nitrificación) y otro, de 1.33 de CC (para promover el proceso de desnitrificación). Se empleó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial de tres parámetros (suelo, humedad y fuente de nitrógeno) y tres repeticiones. La descripción de los tratamientos se presenta en el Cuadro 1.

El nitrógeno (300 µg N g⁻¹ de suelo) se adicionó en solución homogéneamente sobre la superficie del suelo y los frascos se incubaron durante 18 días a 25 °C. El peso de los frascos se revisó periódicamente y se corrigió la pérdida de humedad.

Las muestras de gas se tomaron a 0, 1, 2, 4, 7, 10, 14 y 18 días después de iniciado el experimento (ddi). Para ello, se realizó el siguiente procedimiento:

a) Se sellaron los frascos con septos de hule y se incubaron durante 1 h. Posteriormente, se tomó una muestra en un tubo Vacutainer de 5 mL empleando una aguja Vacutainer para toma múltiple.

b) El septo se retiró y los frascos se ventilaron durante 20 min.

c) Nuevamente se colocó el septo, se extrajo 10% del volumen, el cual se substituyó enseguida con acetileno, se incubó durante 1 h y se tomó la muestra.

d) Los frascos se destaparon y continuó la incubación normal.

El N₂O se determinó al inyectar 1 mL de la muestra en un cromatógrafo de gases Chromopack 437 A con un detector de captura electrónica ⁶³Ni y una columna de acero inoxidable de 4.88 m de largo y 3.175 mm de diámetro bajo las siguientes condiciones: temperatura del inyector a 90 °C, temperatura del horno a 90 °C y temperatura del detector a 300 °C. La tasa de flujo del gas acarreador fue de 28 mL min⁻¹.

La determinación de N₂ producido por desnitrificación se calculó al restar la cantidad de N₂O obtenido durante la incubación sin acetileno a la cantidad de N₂O producido durante la incubación con acetileno.

Los muestreos de nitrógeno inorgánico se efectuaron a 0, 4, 10 y 18 ddi. Se agregó KCl 1 M (g de suelo/mL de KCl = 1:2) al suelo y se agitó durante 2 h, después se filtró y determinó colorimétricamente la cantidad de amonio y nitrato al inyectar parte del sobrenadante en un sistema analizador de flujo continuo (Beernaert *et al.*, 1987).

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

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos diseñados para el experimento.

Manejo del suelo	Tratamientos de humedad (CC)	Fuente de N	Clave
Rotación L-L (A)	0.66	Urea 300 µg N g ⁻¹ de suelo	A0.66U
		KNO ₃ 300 µg N g ⁻¹ de suelo de	A0.66K
		Control	A0.66C
	1.33	Urea 300 µg N g ⁻¹ de suelo	A1.33U
		KNO ₃ 300 µg N g ⁻¹ de suelo de	A1.33K
		Control	A1.33C
Rotación H-H (B)	0.66	Urea 300 µg N g ⁻¹ de suelo	B0.66U
		KNO ₃ 300 µg N g ⁻¹ de suelo de	B0.66K
		Control	B0.66C
	1.33	Urea 300 µg N g ⁻¹ de suelo	B1.33U
		KNO ₃ 300 µg N g ⁻¹ de suelo de	B1.33K
		Control	B1.33C

L-L = Leguminosa-Leguminosa. H-H = Hortaliza-Hortaliza. CC = Capacidad de campo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Producción de Amonio y Nitrato

Los compuestos nitrogenados en el suelo dependen de los procesos de producción y consumo. En el caso del amonio, su producción es vía mineralización y su remoción por nitrificación, inmovilización, fijación y volatilización. En el caso del nitrato, la producción es vía nitrificación y su remoción por desnitrificación, inmovilización y lixiviación (Alexander, 1977; Vermoesen *et al.*, 1996). El contenido de $N-NH_4^+$ y $N-NO_3^-$ en el suelo, durante el periodo de incubación, se presenta en el Cuadro 2.

Respecto a la fuente de nitrógeno, se observó la siguiente secuencia en la acumulación de amonio: $U > KNO_3 > C$ (Cuadro 2). La adición de KNO_3 favoreció el incremento en el contenido de amonio, esto es debido a que la adición de nitrato tiene un efecto estimulante en la mineralización del nitrógeno orgánico (Sen y Chalk, 1994). Además, en condiciones anaerobias también puede ocurrir una reducción desasimilatoria de nitrato a amonio (De Catanzaro *et al.*, 1987; Simarmata *et al.*, 1993). Por otro lado, existió diferencia en cuanto a tipo de suelo sólo al final del periodo de incubación: el contenido de amonio en el Suelo A fue mayor que en el Suelo B.

Referente al contenido de humedad, existieron diferencias altamente significativas: la concentración de amonio fue mayor a 1.33 CC que a 0.66 CC. Debido a que la nitrificación es un proceso aerobio, la disponibilidad de oxígeno es un gran factor limitativo (Grundmann *et al.*, 1995). En condiciones de humedad de 0.66 CC, al inicio existió una alta concentración de amonio y después decreció, mientras que en condiciones de humedad de 1.33 CC, existió un incremento constante en su concentración.

En condiciones óptimas de humedad y aireación favorables a la nitrificación, existe un decremento en el contenido de amonio. Por el contrario, en condiciones anaerobias baja la concentración de oxígeno y existe una acumulación de amonio (Clément *et al.*, 1995; Kimmelshue *et al.*, 1995).

Durante todo el proceso de incubación se observa una baja concentración de nitrato en todos los tratamientos, presumiblemente debido a la inmovilización microbiana (Alexander, 1977; Jenkinson, 1981; Blackmer y Green, 1995). Además, bajo condiciones anaerobias un decremento en el contenido

Cuadro 2. Contenido de amonio y nitratos en las muestras de suelo durante el periodo de incubación.

Amonio

Trata- miento	N-NH ₄ ⁺			
	Tiempo (ddi)			
	0	4	10	18
	----- µg N g ⁻¹ suelo -----			
A0.66U	6.6 c	165.6 a	63.6 cd	47.0 c
A0.66K	10.9 a	96.2 b	48.2 d	33.8 cd
A0.66C	2.3 d	3.4 c	1.4 c	1.5 e
A1.33U	8.6 b	167.3 a	177.9 a	168.0 a
A1.33K	10.9 a	97.5 b	113.1 b	95.6 b
A1.33C	2.1 d	8.2 c	10.1 e	10.9 de
B0.66U	7.1 bc	165.6 a	73.2 cd	47.0 c
B0.66K	8.0 bc	97.6 b	68.5 cd	40.5 c
B0.66C	2.2 d	3.2 c	2.2 e	2.7 c
B1.33U	6.6 bc	84.8 b	167.6 a	168.0 a
B1.33K	8.6 b	76.7 b	85.9 c	87.7 b
B1.33C	2.8 d	7.2 c	9.4 e	14.2 de

Valores con la misma letra minúscula en columna son estadísticamente iguales, Tukey $\alpha = 0.01$.

ddi = Días después de iniciado el experimento.

Nitratos

Trata- miento	N-NO ₃ ⁻			
	Tiempo (ddi)			
	0	4	10	18
	----- µg N g ⁻¹ suelo -----			
A0.66U	4.0 a	4.6 a	13.6 b	16.3 b
A0.66K	4.4 a	4.5 a	20.8 a	24.3 a
A0.66C	4.1 a	4.4 a	4.7 de	7.3 d
A1.33U	3.9 a	0.1 c	0.4 f	0.1 f
A1.33K	4.2 a	0.1 c	0.2 f	0.3 f
A1.33C	4.0 a	0.1 c	0.1 f	0.2 f
B0.66U	1.3 b	2.4 b	5.5 d	10.8 c
B0.66K	1.4 b	1.7 b	8.3 c	15.4 b
B0.66C	1.3 b	1.4 b	3.0 e	4.3 e
B1.33U	1.2 b	0.1 c	0.1 f	0.1 f
B1.33K	1.2 b	0.1 c	0.1 f	0.7 f
B1.33C	1.2 b	0.1 c	0.1 f	0.1 f

Valores con la misma letra minúscula en columna son estadísticamente iguales, Tukey $\alpha = 0.01$.

ddi = Días después de iniciado el experimento.

de nitrato puede deberse, en gran parte, a la desnitrificación (McKenney *et al.*, 1995).

Procesos como la nitrificación, reducción desasimilatoria de nitrito a amonio, desnitrificación, quimiodesnitrificación y otros procesos no respiratorios son fuentes de N_2 , NO y N_2O (Vermoesen *et al.*, 1993; Mahne y Tiedje, 1995).

Emisión de Gases Nitrogenados

Los resultados indican que la emisión de N_2 y N_2O por desnitrificación fue varias veces mayor que por

nitrificación; estas diferencias quizás se deben al tamaño de las poblaciones bacterianas presentes en el suelo. Estudios realizados en la región señalan que la población nitrificante es mucho menor (10^4) que la desnitrificante ($10^5 - 10^6$) (De la Fuente y Peña, 1988). Asimismo, se muestra que las máximas tasas de emisión de N₂O fueron mayores que las máximas tasas de emisión de N₂ al comparar los tratamientos de humedad, tipo de suelo y fuente de nitrógeno. Dichas tasas se observaron predominantemente durante los primeros cuatro días de incubación (Cuadros 3 y 4).

Se establecieron diferencias altamente significativas entre las tasas de emisión de N₂ y N₂O entre los diferentes suelos. Esta producción fue mayor en el Suelo A que en el Suelo B y pudo deberse al mayor contenido de materia orgánica en el Suelo A.

En general, la disponibilidad de electrones en compuestos orgánicos es un factor que controla la actividad de los microorganismos heterótrofos en general, la mayoría de los cuales son desnitrificantes.

También, como se observa en el Cuadro 4 y la Figura 1, las emisiones de N₂ y N₂O fueron mayores durante los primeros cuatro días de incubación. Se ha determinado que la actividad microbiana es altamente correlacionada con el carbono orgánico fácilmente degradable en azúcares, ácidos orgánicos y carbohidratos poliméricos solubles en agua (Tiedje, 1988; Van Cleemput *et al.*, 1990; McCarty y Bremner, 1993; Mummey *et al.*, 1994).

La producción de N₂O por bacterias nitrificantes ocurre a través de la vía oxidativa del NH₄⁺ a NO₂⁻ (Firestone y Davidson, 1989). En algunos estudios se ha identificado a la nitrificación como la principal fuente de N₂O en suelos fertilizados con amonio (Davidson *et al.*, 1986; De Groot *et al.*, 1993; Skiba *et*

Cuadro 3. Comparación de la producción total de N₂ y N₂O entre suelos, humedades y fuentes de nitrógeno.

Factor	N ₂	N ₂ O
	μg N g ⁻¹ suelo h ⁻¹	
Suelo		
A	5.76 a	18.80 a
B	1.21 b	14.50 b
Humedad		
0.66 CC	1.96 b	5.53 b
1.33 CC	5.01 a	27.77 a
Fuente de N		
Urea	5.60 a	19.44 b
KNO ₃	3.65 b	24.23 a
Control	1.21 c	6.28 c

Valores con la misma letra minúscula en columna son estadísticamente iguales, Tukey $\alpha = 0.01$.

CC = Capacidad de campo.

Cuadro 4. Producción máxima de N₂ y N₂O durante el periodo de incubación.

Tratamiento	N ₂	N ₂ O	Relación N ₂ O / N ₂	Total	Tiempo (ddi)
	μg N g ⁻¹ suelo h ⁻¹			μg N g ⁻¹ suelo h ⁻¹	
A0.66U	6.0	4.3	0.7	10.3	0-18
A0.66K	3.0	3.2	1.01	6.2	0-18
A0.66C	0.1	3.5	35.0	3.6	0-18
A1.33U	14.0	139.0	9.9	153.0	2
A1.33K	5.0	173.0	34.6	178.0	2
A1.33C	0.1	37.8	377.8	37.9	2
B0.66U	2.0	5.4	2.7	7.4	0-18
B0.66K	0.1	2.5	25.6	2.7	0-18
B0.66C	0.1	6.2	62.5	6.4	0-18
B1.33U	0.1	73.8	738.4	73.9	2
B1.33K	0.1	101.0	1010.0	101.1	1
B1.33C	0.1	23.0	230.0	23.1	1

ddi = Días después de iniciado el experimento.

et al., 1993; Vermoesen *et al.*, 1996). Sin embargo, en el presente experimento al igual que lo reportado por varios autores (Bremner y Blackmer, 1978; Duxbury *et al.*, 1982; Murakami *et al.*, 1987; De Klein y Van Logtestijn, 1994; Duxbury, 1994; Speir *et al.*, 1995), bajo las condiciones que favorecieron la nitrificación, i.e. fertilización con urea y bajo contenido de

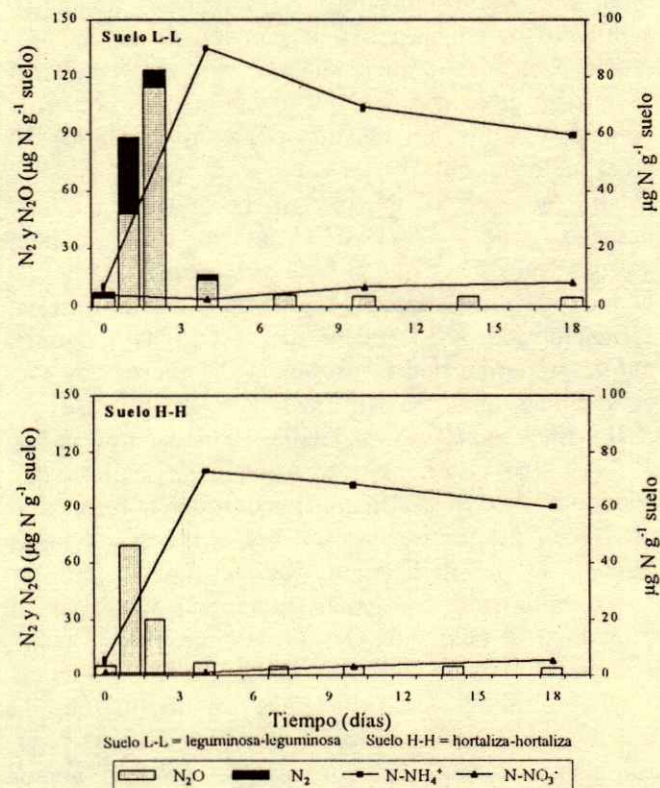


Figura 1. Efecto del tipo de suelo sobre la cinética de producción de amonio, nitrato, N₂ y N₂O.

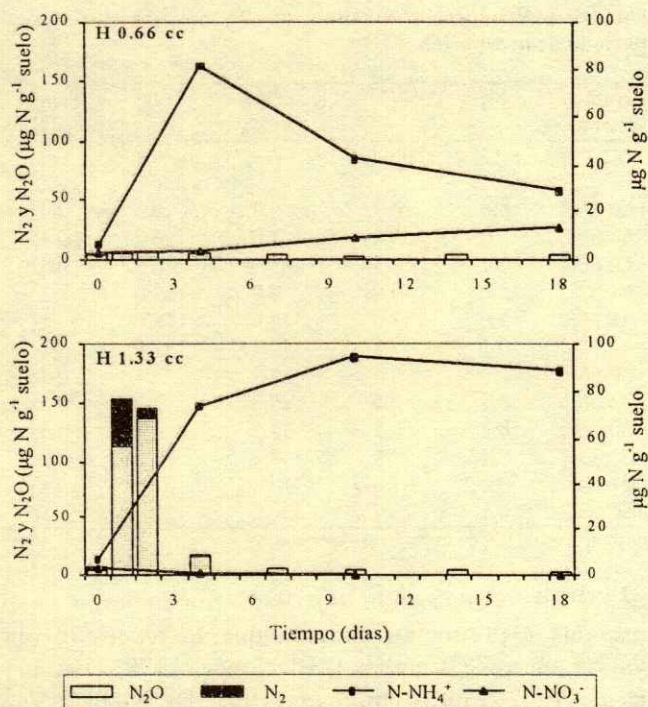


Figura 2. Efecto del contenido de humedad sobre la cinética de producción de amonio, nitrato, N₂ y N₂O.

humedad, se establecieron diferencias altamente significativas en las tasas de emisión de N₂ y N₂O, mucho menores que cuando se favoreció la desnitrificación, como la fertilización con nitrato de potasio (Cuadro 3) y elevado contenido de humedad en el suelo (Figura 2).

La producción de N₂ en las condiciones de humedad de 0.66 CC indica que existió desnitrificación, ya que el N₂O es el producto final de la nitrificación y como consecuencia no se observa formación de N₂ (Aulakh *et al.*, 1984). Algunos autores reportan que la presencia de micrositios con condiciones anaerobias, favorecen el proceso de desnitrificación (Parkin y Tiedje, 1984; Sextone *et al.*, 1988; Skiba *et al.*, 1993). Aunque se sugiere que cuando el NH₄⁺ es oxidado, puede ocurrir formación de N₂ en proporciones similares a las establecidas durante la desnitrificación, lo cual indica que las bacterias nitrificantes tienen, en general, la capacidad de reducir el NO₂⁻ a N₂O y N₂ (Poth y Focht, 1985; Nägele y Conrad, 1990; Speir *et al.*, 1995).

La desnitrificación fue más importante que la nitrificación en la producción de N₂ y N₂O. Asimismo, durante este proceso se produjo mayor cantidad de N₂O que N₂. Se ha demostrado que cuando existen altas concentraciones de nitrato

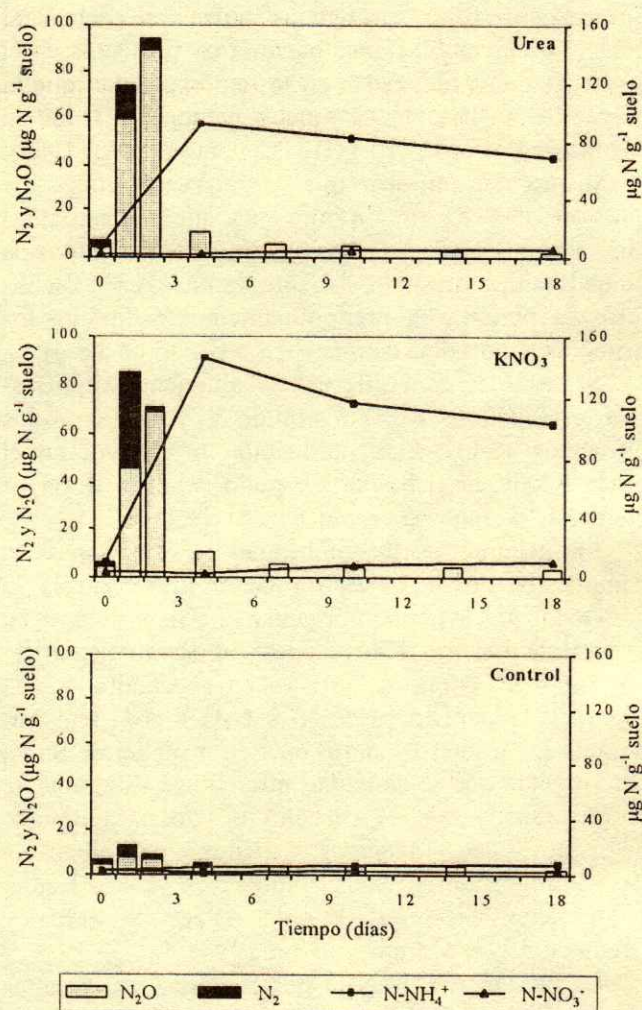


Figura 3. Efecto de la fuente de nitrógeno sobre la cinética de producción de amonio, nitrato, N₂ y N₂O.

se inhibe la reducción anaerobia de N₂O a N₂ por los microorganismos del suelo y así causan una gran fracción molar de N₂O en los productos (Bremner y Blackmer, 1978; Rolston, 1981; Saad y Conrad, 1993; Mahne y Tiedje, 1995). Por otro lado, Krämer y Conrad (1991) establecieron que durante la incubación de suelo en botellas cerradas, se produce una gran fracción molar de N₂O. Otros factores involucrados en la fracción molar N₂O/N₂ por desnitrificación son: pH; presión parcial de oxígeno, la cual está en función de la humedad; concentración de nitrato y disponibilidad de carbono (Knowles, 1982; Firestone y Davidson, 1989; Robertson, 1989).

La adición de fertilizantes resultó en una emisión considerablemente alta de N₂ y N₂O. Comparado con el control, se establecieron diferencias significativas entre las tasas de emisión de N₂ y N₂O. La aplicación

Cuadro 5. Promedio de producción de N₂ y N₂O durante el periodo de incubación.

Trata- miento	N ₂		N ₂ O		Relación N ₂ O / N ₂	Total	
	ng N g ⁻¹ suelo h ⁻¹		ng N g ⁻¹ suelo h ⁻¹			ng N g ⁻¹ suelo h ⁻¹	
A0.66U	1.53 c	4.76 de	3.11 c	6.29 efg		6.29 efg	
A0.66K	1.26 c	4.72 de	3.74 c	5.98 efg		5.98 efg	
A0.66C	1.54 c	3.27 e	2.16 c	4.58 g		4.58 g	
A1.33U	15.17 a	38.95 b	2.52 c	53.65 b		53.65 b	
A1.33K	10.74 b	51.05 a	4.71 c	61.03 a		61.03 a	
A1.33C	1.32 c	10.03 d	7.85 c	11.38 e		11.38 e	
B0.66U	1.26 c	7.65 de	6.07 c	8.91 efg		8.91 efg	
B0.66K	0.87 c	5.32 de	5.18 c	6.25 efg		6.25 efg	
B0.66C	1.33 c	7.45 de	6.97 c	8.54 efg		8.54 efg	
B1.33U	1.46 c	26.40 c	19.82 b	28.16 d		28.16 d	
B1.33K	0.72 c	35.83 b	77.38 a	34.98 c		34.98 c	
B1.33C	0.64 c	4.36 de	6.54 c	4.67 fg		4.67 fg	

Valores con la misma letra minúscula en columna son estadísticamente iguales, Tukey $\alpha = 0.01$.

de KNO₃ favoreció las emisiones en mayor proporción que cuando se aplicó urea (Cuadro 3, Figura 3).

Por último, una compilación del promedio de emisiones de N₂ y N₂O a lo largo del período de incubación se presenta en el Cuadro 5. Es importante destacar que en todos los tratamientos existió mayor producción de N₂O que de N₂. El tipo de suelo y fertilizante nitrogenado influyeron en la proporción de la relación N₂O/N₂.

CONCLUSIONES

Aunque los estudios de laboratorio no simulan completamente la situación en el campo y, teniendo en consideración que las condiciones locales de El Bajío Guanajuatense, como suelos predominantemente arcillosos, altas dosis de fertilización nitrogenada con base en urea y KNO₃, condiciones que favorecen anoxia (riego y lluvia), rotación hortaliza-hortaliza y cereal-cereal, y aunque los suelos tienen bajo contenido de materia orgánica, el efecto rizosférico de los cultivos incrementa las poblaciones desnitrificantes en un factor de 10 (De la Fuente y Peña, 1988), ya que liberan a su entorno productos carbonados equivalentes a tres veces su peso (Haider *et al.*, 1985); a corto plazo, los resultados de esta incubación de suelo sugieren varias conclusiones que pueden ser de útil implicación agronómica.

Se estableció que la adición de fertilizantes nitrogenados incrementó la emisión de N₂ y N₂O del suelo, en mayor proporción cuando se aplicó KNO₃ que urea. Independientemente de la fuente de

nitrógeno adicionada (N-NH₄⁺ ó N-NO₃⁻), en condiciones anaerobias se acumulan altas concentraciones de amonio que, en condiciones favorables, pueden fugarse del sistema vía volatilización. Las tasas promedio de pérdidas de N₂ y N₂O se debieron en 81.4% a desnitrificación y en 19.6% a nitrificación. Se mostró que el principal producto emitido fue el N₂O (82.7%), en comparación con el N₂ (17.3%). Las diferencias observadas en la emisión de gases nitrogenados por el efecto del suelo estuvieron relacionadas con el contenido de materia orgánica, a mayor materia orgánica mayor emisión de N₂ y N₂O. Por último, el contenido de agua, el cual regula la difusión de oxígeno en el suelo y, por ende, los procesos de nitrificación y desnitrificación, influyó notablemente y fue el principal factor que reguló las emisiones de N₂ y N₂O en los suelos.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Agricultura y Ciencias Biológicas Aplicadas de la Universidad de Gante, Bélgica, por todas las facilidades otorgadas para realizar este trabajo en sus laboratorios. Al Sr. Eric Gillis, por su asesoría técnica y al CONACYT (proyecto 3540-N9311).

LITERATURA CITADA

- Alexander, M. 1977. Introduction to soil microbiology. 2nd ed. John Wiley, New York.
- Anderson, J.M. y J.S.I. Ingram. 1993. Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. 2nd ed. CAB-International, Oxford.
- Aulakh, M.S., D.A. Rennie y E.A. Paul. 1984. Acetylene and N-source effects upon N₂O emissions from NH₄⁺ and NO₃⁻ treated soils under aerobic and anaerobic conditions. Soil Biol. Biochem. 16: 351-356.
- Beernaert, H., C. De Backer, K. Vlassak y J. Vermeulen. 1987. Bemonstering, verwerking en vergelijking van methoden voor de bepaling van nitraten in groenten. pp. 7-29. In: IWONL. Nitraten en groenten. Instituut Wetenschappelijk Onderzoek in Nijverheid en Landbouw, Brussel.
- Blackmer, A.M. y C.J. Green. 1995. Nitrogen turnover by sequential immobilization and mineralization during residue decomposition in soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 59: 1052-1058.
- Bouwman, A.F. 1990. Soil and the greenhouse effect. John Wiley, New York.
- Bremner, J.M. y A.M. Blackmer. 1978. Nitrous oxide: Emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen. Science 199: 295-296.
- Clément, A., J.K. Ladha y F.P. Chalifour. 1995. Crop residue effects on nitrogen mineralization, microbial biomass and rice yield in submerged soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 59: 1595-1603.

- Conrad, R. y W. Seiler. 1980. Field measurement of the loss of fertilizer nitrogen into the atmosphere as nitrous oxide. *Atmos. Environ.* 14: 555-558.
- Crutzen, P.J. 1979. The role of NO and N₂O in the chemistry of the troposphere and the stratosphere. *Ann. Rev. Earth Planet Sci.* 7: 443-472.
- Crutzen, P.J. 1981. Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen, including nitrous oxide. pp. 14-44. *In: C.C. Delwiche (ed.). Denitrification, nitrification and atmospheric N₂O.* John Wiley, Chichester, UK.
- Davidson, E.A., W.T. Swank y T.O. Perry. 1986. Distinguishing between nitrification and denitrification as sources of gaseous nitrogen production in soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 52: 1280-1286.
- De Catanzaro, J.B., E.G. Beauchamp y C.F. Drury. 1987. Denitrification vs. Dissimilatory nitrate reduction in soil with alfalfa, straw, glucose and sulfide treatments. *Soil Biol. Biochem.* 19: 583-587.
- De Groot, C.J., A. Vermoesen y O. van Cleemput. 1993. Emission of N₂O and CH₄ out of calcareous soil. *Eutrac/Biotex/03.* Belgium.
- De Klein, C.A.M. y R.S.P. van Logtestijn. 1994. Denitrification and N₂O emission from urea-affected grassland soil. *Plant Soil* 163: 235-242.
- De La Fuente M., J.M. y J.J. Peña-Cabriales. 1988. Dinámica poblacional desnitrificante en el Bajío Guanajuatense. *Rev. Lat-amer. Microbiol.* 30: 335-340.
- Duxbury, J.M. 1994. The significance of agricultural sources of greenhouse gases. *Fert. Res.* 38: 151-163.
- Duxbury, J.M., D.R. Bouldin, R.E. Terry y R.L. Tate III. 1982. Emission of nitrous oxide from soils. *Nature* 298: 462-464.
- Firestone, M.K. y E.A. Davidson. 1989. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. pp. 1-7. *In: M.O. Andreae y D.S. Schimel (eds.). Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere.* Wiley, Chichester, UK.
- Granli, T. y O. Bøckman. 1994. Nitrous oxide from agriculture. *Norw. Agric. Sci. Suppl.* 12.
- Grundmann, G.L., D. Renault, L. Rosso y R. Bardin. 1995. Differential effects of soil water content and temperature on nitrification and aeration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1342-1349.
- Haider, K., A. Mosier y O. Heinemeyer. 1985. Phytotron experiments to evaluate the effect of growing plants on denitrification. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 639-641.
- Hallmark, S.L. y R.E. Terry. 1985. Field measurement of denitrification in irrigated soil. *Soil Sci.* 140: 35-44.
- Haynes, R.J. 1986. Nitrification. pp. 127-165. *In: R.J. Haynes (ed.). Mineral nitrogen in the plant-soil system.* Academic Press, Orlando.
- Houghton, J.T., G.J. Jenjins y J.J. Ephraum. 1990. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Changes) Climate Changes. pp. 36-37. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Jenkinson, D.S. 1981. The fate of plant and animal residues in soil. pp. 505-561. *In: D.J. Greenland y M.H.B. Hayes (eds.). The chemistry of soil processes.* John Wiley, New York.
- Kimmelshue, J.E., J.D. William y R.J. Volk. 1995. Water management effects on mineralization of soil organic matter and corn residue. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1156-1162.
- Knowles, R. 1982. Denitrification. *Microbiol. Rev.* 46: 43-70.
- Krämer, M. y R. Conrad. 1991. Influence of oxygen on production and consumption of nitric oxide in soil. *Biol. Fert. Soils* 11: 38-42.
- Mahne, I. y J.M. Tiedje. 1995. Criteria and methodology for identifying respiratory denitrifiers. *Appl. Environ. Microbiol.* 61: 1110-1115.
- McCarty, G.W. y J.M. Bremner. 1993. Factors affecting the availability of organic carbon for denitrification of nitrate in subsoils. *Biol. Fertil. Soils* 15: 132-136.
- McKenney, D.J., S.W. Wang, C.F. Drury y W.I. Findlay. 1995. Denitrification, immobilization, and mineralization in nitrate limited and nonlimited residue-amended soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 118-124.
- Mummey, D.L., J.L. Smith y J.R.H. Boltron. 1994. Nitrous oxide flux from oxide a shrub-steppe ecosystem: source and regulation. *Soil Biol. Biochem.* 26: 279-286.
- Murakami, T., N. Owa y K. Kumazawa. 1987. The effects of soil conditions and nitrogen form on N₂O evolution by denitrification. *Soil Sci. Plant Nutr.* 33: 35-42.
- Nägele, W. y R. Conrad. 1990. Influence of pH on the release of NO and N₂O for fertilized and unfertilized soil. *Biol. Fert. Soils* 10: 139-144.
- Nelson, S.D. y R.E. Terry. 1996. The effects of soil physical properties and irrigation method on denitrification. *Soil Sci.* 161: 242-249.
- Parkin, T.B. y J.M. Tiedje. 1984. Application of a soil core method to investigate the effect of oxygen concentration on denitrification. *Soil Biol. Biochem.* 16: 331-334.
- Poth, M. y D.D. Focht. 1985. ¹⁵N kinetic analysis of N₂O production by *Nitrosomonas europaea*: an examination of nitrifier denitrification. *Appl. Environ. Microbiol.* 49: 1134-1141.
- Robertson, G.P. 1989. Nitrification and denitrification in humid tropical ecosystems: Potential controls on nitrogen retention. pp. 55-69. *In: J. Procter (ed.). Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecosystems.* Blackwell Sci. Publ., Oxford.
- Rolston, D.E. 1981. Nitrous oxide and nitrogen gas production in fertilizer loss. pp. 127-150. *In: C.C. Delwiche (ed.). Denitrification, nitrification and atmospheric nitrous oxide.* John Wiley, New York.
- Saad, O. y R. Conrad. 1993. Temperature dependence of nitrification, and turnover of nitric oxide in different soils. *Biol. Fertil. Soils* 15: 21-27.
- Sahrawat, K.L. y D.R. Keeney. 1986. Nitrous oxide emission from soils. *Adv. Soil Sci.* 4: 103-148.
- Sanaa, M. 1993. Dynamique et bilan de l'azote mineral dans quelques sols calcaires in Tunisie. Thèse Docteur en Sciences Agronomiques. Gent, Belgique.
- SAS Institute. 1988. SAS/ATAT user's guide. Release 6.03 ed. SAS Inst. Cary, NC.
- Sen, S. y P.M. Chalk. 1994. Solubilization of soil organic N by alkaline-hydrolyzing N fertilizers. *Fertil. Res.* 38: 131-139.
- Sextone, A.J., T.B. Parkin y J.M. Tiedje. 1988. Denitrification response to soil wetting in aggregated and unaggregated soil. *Soil Biol. Biochem.* 20: 767-769.
- Simarmata, T., G. Benckiser y J.C.G. Ottow. 1993. Effect of increasing carbon: nitrate-N ratio on the reliability of acetylene in blocking the N₂O-reductase activity of denitrifying bacteria in soil. *Biol. Fert. Soils* 15: 107-112.
- Skiba, U., K.A. Smith y D. Fowler. 1993. Nitrification and denitrification as sources of nitric oxide and nitrous oxide in a loam soil. *Soil Biol. Biochem.* 25: 1527-1556.

- Speir, T.W., H.A. Kattles y R.D. More. 1995. Aerobic emissions of N₂O and N₂ from soil cores: factors influencing production from ¹⁵N-labelled NO₃⁻ and NH₄⁺. *Soil Biol. Biochem.* 27: 1299-1306.
- Tiedje, J.M. 1988. Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium. pp. 179-244. *In*: J.B. Zehnder (ed.). *Biology of anaerobic microorganisms*. Wiley, New York.
- Van Cleemput, O. y L. Baert. 1984. Nitrite: A key compound in N loss processes under acid conditions? *Plant Soil* 76: 233-241.
- Van Cleemput, O., R.M. Malkanti, Y. D'Ydewalle y L. Baert. 1990. Influence of some types of harvest residues on the evolution of soil mineral nitrogen. pp. 275-280. *In*: R. Merckx., H. Vereencken y K. Vlassak (eds.). *Fertilization and the environment*. Leuven University Press. Leuven, Belgium.
- Vázquez-Navarro, G., J.M. de la Fuente-Martínez y J.J. Peña-Cabriales. 1994. Eficiencia y pérdidas via desnitrificación de fertilizantes nitrogenados aplicados a sorgo en un suelo vertisol. *Terra* 12: 345-353.
- Vermoesen, A., O. van Cleemput y G. Hofman. 1993. Nitrogen loss processes: Mechanisms and importance. *Pedologie* XLIII-3: 417-433. Ghent, Belgium..
- Vermoesen, A., O. van Cleemput y G. Hofman. 1996. Long term measurements of N₂O emissions. *Energy Convers.* 37: 1279-1284.

DELIMITACION Y CARACTERIZACION DE LAS TIERRAS CON USO INADECUADO PARA LA AGRICULTURA EN EL DISTRITO DE DESARROLLO RURAL 004, CELAYA, GUANAJUATO

Delineation and Characterization of Land Unsuitably Used for Agriculture in the Rural Development District 004, Celaya, Guanajuato

Hilario García Nieto¹, Jorge López Blanco², Rafael Moreno Sánchez³,
Ma. de Lourdes Villers Ruíz² y Rolando R. García Dagher¹

RESUMEN

A partir de la clasificación del potencial agrícola del Distrito de Desarrollo Rural 004 Celaya, Guanajuato, mediante el enfoque de "límites de transición gradual" ("fuzzy"), se delimitan y caracterizan, desde el punto de vista físico y socioeconómico, las tierras con uso inadecuado para la agricultura. Se utilizó el sistema ARC/INFO para digitizar la información vectorial, el sistema IDRISI para realizar el proceso de sobreposición de mapas (modelación) y la caracterización física, y el ArcView para realizar la caracterización socioeconómica. Se calculó un crecimiento del área agrícola de 31 763 ha en 20 años. Se estimó una superficie inadecuada para agricultura de temporal de 95 870 ha (37%), la cual disminuye a 73 181 ha (29%) si se considera el potencial para la agricultura de riego. Las principales diferencias físicas y socioeconómicas de las áreas con uso inadecuado para la agricultura, con respecto a las áreas con aptitud para esta actividad son: mayores altitudes, pendientes pronunciadas, suelos poco profundos, escasas vías de comunicación, baja densidad de población, mayor grado de analfabetismo, altos índices de pobreza y de migración de sus pobladores. Se considera que esta información es de gran utilidad para apoyar con más elementos de juicio la propuesta de acciones de reordenamiento del uso del suelo para las actividades agropecuarias y forestales.

Palabras clave: Uso adecuado del suelo, SIG, caracterización física, caracterización socio-económica, ordenamiento del uso del suelo.

SUMMARY

Based on the classification of agricultural potential for the Rural Development District 004, Celaya, using the "fuzzy" approach, areas were mapped and characterized which are physically and socioeconomically unsuitable for agriculture. The GIS software ARC/INFO was used to digitize the vector data, IDRISI for the process of map overlaying (modeling) and physical characterization, and ArcView to define the socioeconomic status of the population in the area of study. The total area for agricultural purposes increased 31 763 ha in 20 years. It was estimated that an area of 95 870 ha (37%) was unsuitable for rainfed agriculture, but if potential for irrigation is considered this figure is reduced to 73 181 ha (29%). The main physical and socioeconomic characteristics of unsuitable areas compared with those areas suitable for agriculture are higher altitudes, steep slopes, shallow soils, few means of communication, low population density, high rate of illiteracy, and high indices of poverty and migration. It is believed that this information is highly useful to support proposals of reordering of land use for agriculture and forestry.

Index words: Suitable land use, GIS, physical characterization, socioeconomic characterization, land use planning.

INTRODUCCION

Los principales factores que hacen dinámicos los procesos de ocupación de los espacios productivos en América Latina son: a) la modernización

¹ SAGAR-INIFAP-Campo Experimental Bajío, Celaya, Gto., México.

² Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

³ Metropolitan State College of Denver, Denver, CO., USA.

Recibido: Diciembre de 1998.

Aceptado: Enero de 2000.

agropecuaria; b) los planes gubernamentales de urbanización e infraestructura (principalmente carreteras); y c) las demandas internacionales y nacionales de recursos naturales como petróleo, minerales y madera (CEPAL-PNUMA, 1983). En estos países, los procesos de expansión de la frontera agrícola son parte importante de las estrategias de desarrollo agrícola de sus gobiernos, enmarcadas a su vez dentro del proceso de desarrollo global. Dichas estrategias, además de una serie de efectos económico-sociales en el medio rural, están provocando notorias modificaciones ambientales como son: deforestación, erosión, agotamiento de los suelos, sedimentación y pérdida de la flora y fauna. Sin embargo, generalmente estos problemas quedan relegados a un segundo plano debido a la importancia que se le atribuye al crecimiento del producto agrícola y al empleo (CEPAL-PNUMA, 1983).

En México, ocurren dos hechos importantes en la evolución de la superficie cultivada: el incremento de la misma por la apertura de la frontera agrícola y el cambio en la distribución espacial de los cultivos (Soto y Soto, 1992). De acuerdo con Fuentes (1992), el espacio agrícola nacional libra una lucha desigual contra las presiones urbanas, la "ganaderización" de la agricultura, el uso industrial en áreas agrícolas óptimas, y el cambio introducido por las compañías transnacionales en el patrón de cultivos que demanda la población del país.

La agricultura es una de las actividades más importantes de explotación del sistema natural; explotación que debe ajustarse a las áreas aptas para esta actividad. En este sentido, los estudios de clasificación de tierras denominados "Provincias Agronómicas" (Turrent, 1986; González *et al.*, 1990) y "Potencial Productivo" (Ortiz *et al.*, 1992), realizados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se han enfocado a realizar un inventario del medio ambiente físico y a determinar la aptitud de dicho medio para acoger las actividades agropecuarias y forestales. Sin embargo, una de las deficiencias de tales estudios es el considerar la factibilidad de las especies únicamente con criterios biológicos y de productividad, lo que no permite soportar adecuadamente las propuestas de reordenamiento del uso del suelo para cumplir con el objetivo más ambicioso de los estudios previos: proponer acciones para el reordenamiento del uso del suelo (Ortiz *et al.*, 1992; García *et al.*, 1996). Es

necesario tener en cuenta el carácter "transversal" que trasciende al enfoque sectorial tradicional, de tal manera que las actividades adoptadas y llevadas a la práctica en sectores específicos, tienen repercusiones ambientales que, indirectamente, pueden afectar el funcionamiento de otros sectores (Bifani, 1982).

Los datos censales del uso del suelo para el estado de Guanajuato muestran que las tierras de labor se incrementaron de 1 050 900 ha en el año de 1950 a 1 247 301 ha en 1980. Durante este período, la superficie ocupada por pastos y por bosques disminuyó considerablemente, por lo que se infiere que las tierras de cultivo se ampliaron en 196 401 ha a expensas de éstos (Soto y Soto, 1990). Además de la ampliación de la frontera agrícola, en este subsector se han dado cambios en los patrones de cultivos debido al desplazamiento de los cultivos básicos (maíz y frijol) por especies hortícolas para exportación y otros de importancia forrajera e industrial (Soto y Soto, 1992).

En el Distrito de Desarrollo Rural 004 Celaya (DDR 004), la agricultura ha rebasado las áreas con aptitud para esta actividad, donde se observan zonas con baja productividad, marcada degradación de los recursos y bajo nivel de vida de sus pobladores. Como una forma de aportar más elementos de juicio para apoyar las propuestas de reordenamiento de uso del suelo, el objetivo general de este trabajo es delimitar y caracterizar las tierras con uso inadecuado para la agricultura, mediante el logro de los siguientes objetivos particulares:

1. Delimitar y cuantificar las diferencias entre el uso anterior (CETENAL, 1973-1974b), reciente (INEGI, 1993b) y potencial para la agricultura.
2. Caracterizar y contrastar, desde el punto de vista físico y socioeconómico, las áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura.

Con el propósito de superar las deficiencias de los estudios previos de clasificación de tierras para la producción de especies vegetales realizados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), se realizó un estudio (García, 1999; García *et al.*, 1999) para el DDR 004 con los siguientes logros: a) se generó y verificó una base de datos digital del medio físico, de alta resolución (100 x 100 m), la cual fue enriquecida con información de poblaciones y vías de comunicación; y b) se aplicó el enfoque de "límites de transición gradual entre clases" (fuzzy) como una alternativa para superar las limitaciones derivadas de la aplicación

del método "Booleano" convencional (Burrough, 1989; Berry, 1993).

Con respecto a la base de datos, la escala de la información de suelos se incrementó de 1:500 000 a 1:50 000. La resolución de la información topográfica (altitud y pendiente) se mejoró de 900 por 900 m (81 ha) a 100 x 100 m (1 ha). El número de estaciones para realizar las interpolaciones climáticas (precipitación, evaporación, y temperaturas máxima y mínima) se incrementó de 149 a 331, además, se generaron mapas de periodos climáticos decenales en lugar de mensuales. Se incluyó información sobre vías de comunicación (SCT, 1993) y poblaciones de más de tres viviendas con sus respectivos datos de población y vivienda del Censo de 1995 (INEGI, 1996b). Los resultados de la verificación de campo y gabinete fueron de utilidad en la fase de modelación para descartar información obsoleta, afinar criterios de estratificación y señalar la información de baja confiabilidad.

Con la nueva base de datos, se determinó el uso potencial del suelo por cultivo mediante el enfoque fuzzy, asimismo, se determinaron áreas potenciales para agricultura de riego y temporal (García *et al.*, 1999). Previo a la aplicación del enfoque fuzzy fue necesario definir los cultivos representativos del área de estudio, para lo cual se utilizaron los datos de superficie sembrada como el principal criterio de selección. Los pasos para la aplicación del enfoque fuzzy se pueden resumir de la forma siguiente (Tang *et al.*, 1991; Tang y Ruan, 1992; Tang y Van Ranst, 1992; Davidson *et al.*, 1994; y Van Ranst *et al.*, 1996): a) definición de los factores de estratificación; b) determinación de las funciones de "membresía" entre el cultivo a estratificar y los factores de estratificación; c) ponderación de las funciones de membresía; d) normalización de las funciones de membresía; y e) determinación de la aptitud total por cultivo.

La aplicación de los tres primeros pasos puede realizarse de dos maneras: a) con base en la experiencia de especialistas; y b) aplicando métodos estadísticos cuando se dispone de información de productividad de los cultivos. Para el caso de las especies de importancia agrícola del área de estudio, se aplicaron métodos estadísticos, ya que para el estado de Guanajuato se cuenta con el rendimiento medio de los cultivos ponderados para el área agrícola de cada municipio y, por otra parte, es posible ponderar para la

misma área, los factores relevantes de la producción de cultivos.

Los factores de estratificación para cada cultivo se definieron con base en un análisis de regresión múltiple entre el rendimiento del cultivo (variable dependiente) y factores incontrolables de la producción de cultivos (clima y suelo) como variables independientes, utilizando la técnica de "Stepwise" del "Statistical Analysis System" (SAS). Las funciones de membresía se determinaron mediante ecuaciones de regresión simple entre el rendimiento del cultivo en cuestión y cada uno de los factores relevantes definidos en la regresión múltiple. La ponderación de la importancia de los factores de estratificación se definió con base en los coeficientes de determinación (R^2) de las ecuaciones de regresión simple. En el sistema IDRISI, en donde se manejó la base de datos del medio físico del estado de Guanajuato, las ecuaciones de regresión (funciones de membresía) se convirtieron en mapas con valores continuos y reales de rendimiento expresado en kg ha^{-1} . Los valores reales se normalizaron a valores entre 0 a 1.0 y se les asignó el factor de ponderación, de tal manera que, al sumar todos los mapas (los factores de la producción más importantes de un cultivo particular), se obtiene un mapa de aptitud total con un valor máximo posible de 1.0 correspondiente a las áreas con la máxima aptitud.

Es importante aclarar que el grado de aptitud en la computadora se presenta con valores continuos entre 1.0 y 0, sin embargo, con fines de presentación, se reclasificaron en orden descendente de aptitud en 10 clases posibles (10 a 1) con intervalos de 0.1. A partir de estos mapas, en este trabajo, se delimita el uso potencial para la agricultura.

METODOLOGIA

Area de Estudio

El DDR 004 cuenta con una superficie de 387 220.3 ha (INEGI, 1993a). Se localiza al sureste del estado de Guanajuato, entre los 19° 59' y los 20° 49' de latitud norte y entre los 100° 19' y los 101° 08' de longitud oeste. Está integrado por los municipios de Santa Cruz de Juventino Rosas, Comonfort, Celaya, Apaseo el Grande, Apaseo el Alto, Tarimoro, Jerécuaro y Coroneo (Figura 1).

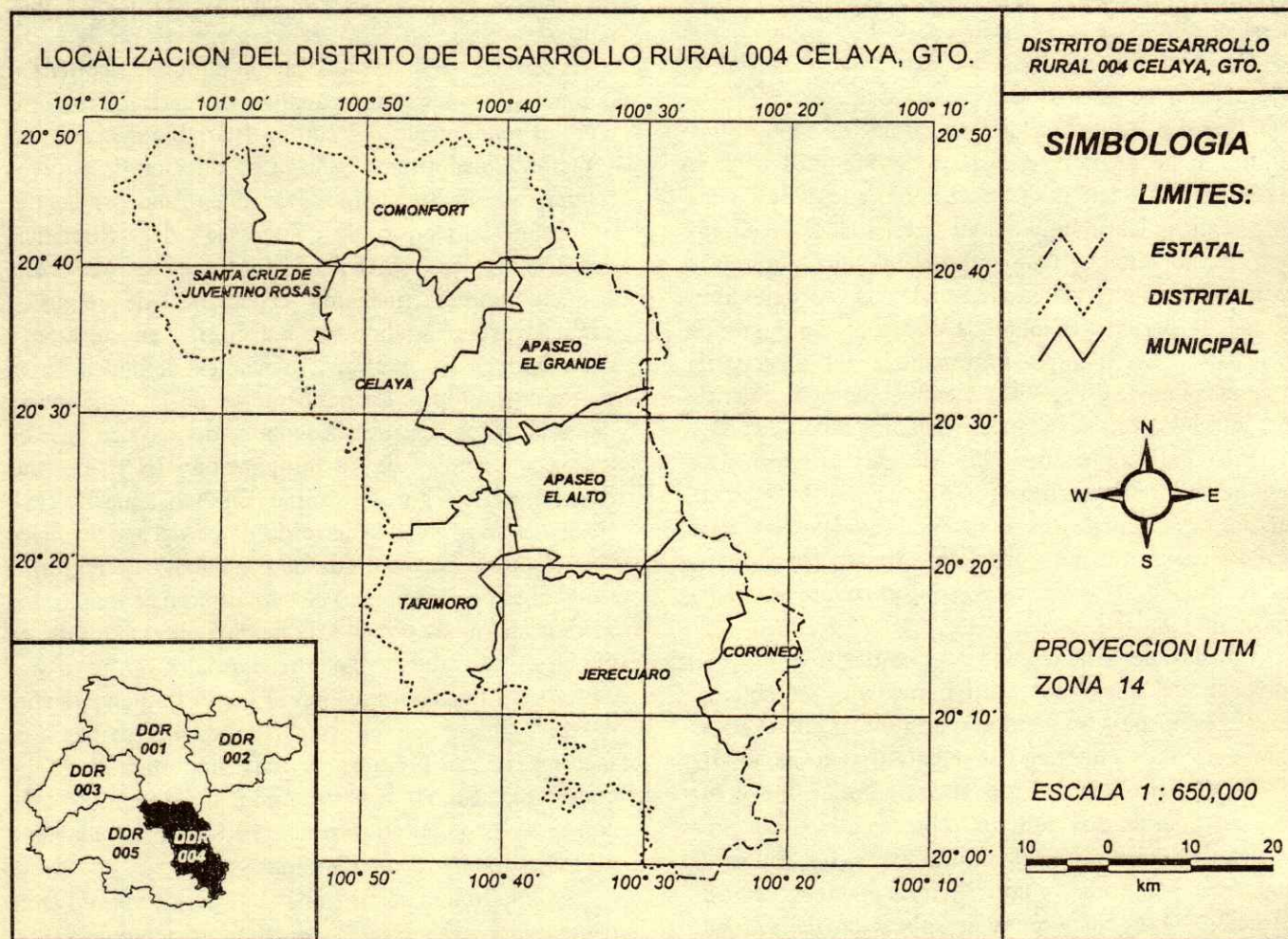


Figura 1. Localización del Distrito de Desarrollo Rural 004 Celaya, Guanajuato.

! El DDR 004 presenta las cuatro zonas características del estado de Guanajuato como son: la región de El Bajío, la zona de transición entre El Bajío y Valles Altos, Valles Altos y zonas montañosas. Las altitudes varían entre 1600 y 1800 m en El Bajío, hasta más de 3000 m en algunos valles altos y cúspides de las montañas. En el área del Bajío se presentan pendientes menores que 4%, mientras que en el resto del Distrito solamente pequeñas áreas aisladas presentan pendientes de ese orden. De acuerdo con la clasificación de suelos FAO/UNESCO, modificada por CETENAL (CETENAL, 1973-1974a), las unidades de suelo dominantes son los Vertisoles, Feozems y en menor proporción los Litosoles en las elevaciones más pronunciadas. A excepción de El Bajío, son muy escasas las áreas sin fases físicas (suelos con profundidad mayor que 1.0 m). Los Vertisoles

presentan fases químicas en aproximadamente 10 000 ha clasificadas como "salino-sódicos", "sódicos" y "moderadamente salino-sódicos".

Además de la altitud entre 1600 y 1800 m. "El Bajío Guanajuatense" presenta suelos profundos con unidades de suelo dominantes Vertisoles y Feozems, y pendientes menores que 4%. El Bajío Guanajuatense comprende en este Distrito 50 396 ha (15.7%), repartidas principalmente entre los municipios de Celaya, Apaseo el Grande, Tarimoro y Santa Cruz de Juventino Rosas. En general, esta región se considera un área de alta productividad, en el país, para la agricultura de riego.

Las precipitaciones anuales acumuladas varían de menos de 600 mm en el noroeste, hasta más de 800 mm en el extremo sureste. La temperatura media anual en El Bajío alcanza valores superiores a 19 °C.

en el centro predominan las temperaturas entre 17 y 18 °C, y en las máximas elevaciones se presentan temperaturas menores que 15 °C.

El DDR 004 cuenta con una población total de 695 379 habitantes distribuidos en 1150 localidades, de las cuales solamente 11 rebasan 5000 habitantes (INEGI, 1996a). Resalta la ciudad de Celaya con 36% de la población del área de estudio (251 724 habitantes) y tercer lugar en el estado después de León e Irapuato.

La longitud de la red carretera es de 943 km, de los cuales 192 km corresponden a la carretera troncal federal, 218 km a carreteras alimentadoras estatales pavimentadas, y 533 km entre caminos rurales revestidos, carreteras revestidas y brechas mejoradas (INEGI, 1997). Las vías de comunicación, así como las actividades industriales y comerciales, se concentran en el área de El Bajío (INEGI, 1977).

En la Figura 2 se presenta la metodología general de este trabajo. Se utilizó el sistema ARC/INFO (ESRI, 1994; 1996a) para: a) digitizar la cartografía de uso del suelo de CETENAL (1973-1974b); b) digitizar las fotografías aéreas después de haber sido interpretadas; y c) generar un mapa con los puntos que representan las poblaciones de más de tres viviendas con sus respectivos datos de Población y Vivienda del Censo de 1995 (INEGI, 1996b). El sistema IDRISI (Eastman, 1992a,b, 1997) se utilizó para realizar la delimitación y caracterización ambiental de las áreas con uso adecuado e inadecuado. El sistema ArcView (ESRI, 1995, 1996b) se utilizó para determinar la longitud de las vías de comunicación, realizar la caracterización socio-económica de las áreas con uso adecuado e inadecuado, desplegar, editar y enviar a impresión los mapas de presentación.

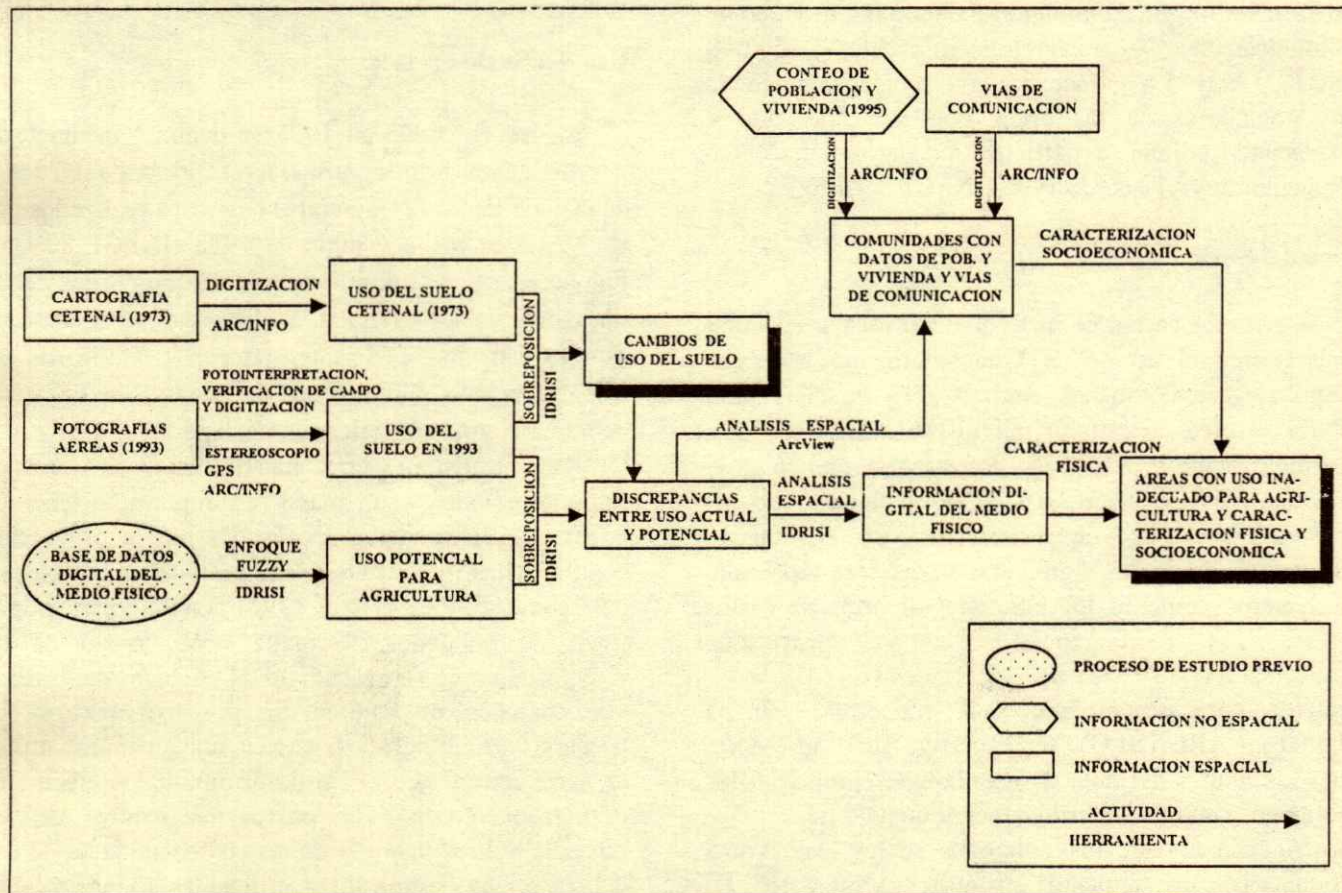


Figura 2. Diagrama metodológico general para delimitar las áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura y su caracterización física y socioeconómica.

El uso anterior del suelo se obtuvo a partir de la digitización de la cartografía de uso del suelo en 1973-1974, el uso del suelo en 1993 se delimitó a partir de fotografía aérea, escala 1:75 000, y el uso potencial se delimitó a partir de la clasificación de la aptitud por cultivo de un trabajo previo, mediante la metodología fuzzy (García *et al.*, 1999). La sobreposición de mapas del uso anterior con el uso en 1993, dio como resultado los cambios más importantes en un período aproximado de 20 años. Las diferencias al sobreponer el área agrícola en 1993 y la potencial para agricultura de temporal y riego permitió la ubicación de las áreas con uso inadecuado para la agricultura en las dos condiciones de humedad. Las áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura de temporal y riego se caracterizaron, desde el punto de vista ambiental, de acuerdo con las bases de datos digitales de suelo, topografía y clima. La longitud de las diferentes tipos de vías de comunicación en tales áreas se obtuvo a partir de la información digital de un mapa turístico de comunicaciones y transportes a escala 1:250 000 (SCT, 1993). La caracterización socioeconómica de los pobladores de las áreas con uso adecuado e inadecuado se hizo a partir de los datos del Censo Población y Vivienda de 1995 (INEGI, 1996b).

Uso del Suelo en 1973

De las 51 cartas de uso del suelo escala 1:50 000 que cubren el estado de Guanajuato fue necesario digitalizar, cuando menos en parte, 13 de ellas para cubrir el área de estudio (CETENAL, 1973-1974b). La digitización y despliegue de cartas se realizó en el módulo ARCEDIT del ARC/INFO, el resto de los procesos se realizó en el módulo ARC del mismo sistema. A las cartas digitalizadas se les creó topología, se hicieron coincidir los polígonos abiertos de cartas vecinas, se georeferenciaron con la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), y se unieron para generar una sola "cobertura" (mapa digital en ARC/INFO). La cobertura total se recortó con los límites del área de estudio. Se eliminaron los polígonos con una superficie menor que 2.5 ha.

A cada uno de los polígonos se les asignó una etiqueta con los siguientes atributos: a) Subsector. En este campo se clasificó el uso del suelo de manera general en agrícola A, pecuario P y forestal F, cuerpos de agua CA, erosión E y principales áreas urbanas CD; b) Tipo 1. En el segundo campo se registraron los

tipos de uso dominante de manera más específica, como pastizal natural Pn; c) Tipo 2. En caso de existir, en este campo se registró el segundo tipo de uso en importancia, por ejemplo, Pn-Me, esto indica que el tipo de uso dominante es pastizal pero asociado con mezquital en segundo lugar de importancia; y d) Tipo 3. En algunos casos (principalmente en el subsector forestal) se presenta un tercer tipo de uso que se registró en este campo, por ejemplo, pastizal natural asociado con mezquital y nopalera en tercer grado de importancia Pn-Me-No.

En general, se utilizaron las mismas claves de las cartas de CETENAL para codificar las clases. La base de datos se capturó en el paquete Lotus, se exportó a Dbase III para después adherirla a la cobertura de polígonos en ARC/INFO. Se reselectionaron las capas de información más importantes, las cuales se convirtieron a formato "raster" para exportarlas a IDRISI.

Uso del Suelo en 1993

El uso del suelo en 1993 se delimitó mediante la interpretación de fotografías aéreas a escala 1:75 000 de la zona F14-10 (Querétaro) de vuelos realizados por el INEGI en mayo y junio de 1993 (INEGI, 1993a). Fue necesaria la interpretación de 36 fotografías de las líneas de vuelo 147 a 152 para cubrir el área de estudio. Únicamente se interpretaron y digitalizaron las fotografías con número par de cada línea de vuelo debido a la gran superficie de traslape.

Para transferir con menor error los rasgos fotointerpretados a un mapa, es importante tener en cuenta las deformaciones causadas por la proyección central de las fotografías y las ocasionadas por efectos del relieve (López *et al.*, 1996). La interpretación y trazo de polígonos se realizó con apoyo de un estereoscopio en forma individual en cada fotografía y verificaciones de campo. Se descartó el área de traslape entre fotografías, esto es, únicamente se utilizó la parte central con el fin de disminuir los efectos de desplazamiento por la proyección central de las mismas. Sólo se delimitaron las cuatro unidades de uso del suelo más claramente identificables: a) agrícola; b) no agrícola; c) áreas urbanas; y d) cuerpos de agua. Dado que el objetivo principal de esta actividad es delimitar el área agrícola del DDR 004, la cual se encuentra ubicada en áreas con pendientes bajas

(menores que 8%), se consideran mínimas las deformaciones por efecto del relieve en esta área.

Se digitizaron los puntos de control y los trazos de las fotografías en el módulo ARCEDIT del sistema ARC/INFO. En el módulo ARC del mismo sistema, las coberturas (fotografías digitizadas) se proyectaron a UTM a partir de las coordenadas geográficas de los puntos de control tomadas de la cartografía de CETENAL y mediante un geoposicionador (GPS). Se eliminaron los puntos de control con un error medio cuadrático (RMS) parcial mayor que 75 m, equivalentes a 1.0 mm de mapa en la escala 1:75 000. Se dejó un mínimo de cuatro puntos de control de acuerdo con lo permitido por el sistema utilizado. Para todas las coberturas, el RMS promedio de los puntos de control considerados fue menor que 30 m, equivalentes a 0.4 mm en el mapa.

Una vez proyectadas, las coberturas se unieron en una sola, haciendo coincidir los trazos entre coberturas vecinas, luego se recortaron con el límite del área en estudio, se eliminaron las áreas menores que 2.5 ha y se asignó una etiqueta a cada polígono, de acuerdo con el uso del suelo correspondiente. Finalmente, esta cobertura se "rasterizó" y exportó a IDRISI para poder manipularla, junto con otras capas de información, en la fase de modelación.

Uso Potencial para la Agricultura

Haciendo uso de los mapas con 10 clases de aptitud, producto de la aplicación del enfoque fuzzy para cada cultivo en un trabajo previo (García *et al.*, 1999), se delimitaron las áreas con uso potencial para agricultura de riego y temporal. El propósito de delimitar el uso potencial para agricultura de riego y temporal fue compararlo con los mapas de uso del suelo en 1993 para delimitar las zonas agrícolas ubicadas en áreas clasificadas sin potencial para esta actividad. Sin embargo, al analizar los mapas fuzzy por cultivo, surgió la interrogante de cuántas clases se deberían considerar para sugerir el uso potencial para la agricultura (de riego y temporal) y compararlo posteriormente con el uso en 1993.

Por lo anterior, se realizó un análisis económico que permitió conocer la distribución espacial de la relación costo-beneficio ha^{-1} por cultivo, y el valor promedio de ellos se utilizó para definir las clases que deben considerarse. Los datos requeridos por cultivo fueron: rendimientos máximos, precio internacional del

producto y costos de producción. Los rendimientos máximos se obtuvieron de las estadísticas de productividad de cultivos, los precios internacionales y los costos de producción fueron obtenidos del Programa de Aseguramiento Agrícola de AGROASEMEX "Seguro a la Inversión" para los ciclos de primavera-verano 1997 y otoño-invierno 1997-1998.

Primeramente, se dividieron entre 10 los mapas de maíz, frijol y sorgo de temporal; y maíz, sorgo y trigo de riego. Esto con el fin de cambiar los valores de la escala de clasificación de 10 a 1 a 1.0 a 0.1. Estos mapas se multiplicaron por el rendimiento máximo de cada cultivo con el propósito de mantenerlo igual en la mejor clase (al multiplicarlo por 1) y degradarlo conforme disminuye la aptitud. Por ejemplo, si el rendimiento máximo de un determinado cultivo es 5000 kg ha^{-1} , al multiplicarlo por la mejor clase (1.0) se mantiene igual, al multiplicarlo por la segunda clase de aptitud (0.9) el rendimiento disminuye en 10% quedando en 4500 kg ha^{-1} , y así sucesivamente hasta que el rendimiento se degrada hasta 0 al multiplicarlo por la clase de menor aptitud (1).

Los mapas de rendimiento degradados de acuerdo con la clase de aptitud descritos en el párrafo anterior, se multiplicaron por el precio internacional del producto para determinar el valor de la cosecha y, finalmente, se dividieron entre los costos de producción para obtener la relación costo-beneficio por cultivo. Después se calculó el valor promedio de la relación costo-beneficio por clase de aptitud de todos los cultivos. En los datos promedio se observó que sólo las tres clases de mayor aptitud tuvieron una relación costo-beneficio superior a 1.0. Un valor de 1.0 en la relación costo-beneficio indica que el valor de la cosecha es igual a los costos de producción y, por lo tanto, no existen utilidades; los valores de la relación costo-beneficio mayores que 1.0 indican que por cada peso invertido se recupera la inversión y se gana la diferencia con la unidad; los valores inferiores a 1.0 indican pérdidas. Por lo tanto, los resultados de este análisis sugieren que, cuando sólo se hace uso de un criterio económico pueden considerarse las tres clases de mayor aptitud (10, 9 y 8) de los mapas por cultivo clasificados con enfoque fuzzy.

De acuerdo con lo anterior, para cada cultivo se seleccionaron las tres clases de mayor aptitud (10, 9, y 8), las cuales se agruparon por condición de humedad (temporal y riego). De esta manera se

delimitaron las áreas con uso potencial para la agricultura de riego y temporal para utilizarse en la delimitación y caracterización de las áreas con uso inadecuado para la agricultura. Estas áreas pueden considerarse con aptitud biológica y económica, cuando menos para uno de los cultivos en estudio. Es importante tener en cuenta que para los propósitos de este trabajo se ha generalizado a nivel de subsector (agrícola). Sin embargo, a partir de este análisis es posible delimitar las áreas con potencial biológico y económico para cada cultivo.

Estimación del Crecimiento del Area Agrícola

La ampliación de la frontera agrícola se estimó mediante la sobreposición en el sistema IDRISI del área agrícola en 1973, con el área agrícola obtenida de fotografías aéreas de 1993. Al área agrícola de 1973 se le asignó un valor de 1 y al área agrícola de 1993 se le asignó un valor de 2, en ambos casos se asignó un valor de 0 al área no agrícola, posteriormente se sumaron y se obtuvo un mapa con cuatro valores: 0, 1, 2 y 3. El número 3 representó la coincidencia de las áreas agrícolas de 1973 y 1993, el 2 el crecimiento del área agrícola, el 1 las áreas agrícolas en 1973 con un uso diferente al actual y el 0 la coincidencia de las áreas con otros usos (pecuario-forestal, urbano y cuerpos de agua) de 1973 y 1993. Los crecimientos agrícolas se relacionaron con la aptitud para la agricultura sobreponiéndolos sobre las áreas con y sin potencial para la agricultura.

Delimitación y Caracterización de las Areas con Uso Adecuado e Inadecuado para la Agricultura

Las áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura de temporal se obtuvieron mediante la diferencia entre las áreas de uso potencial para agricultura de temporal con el uso del suelo en 1993. De esta manera, se delimitaron las siguientes áreas: agrícolas, no agrícolas, urbanas, y cuerpos de agua, ubicadas en zonas con potencial y sin potencial para agricultura de temporal (ocho clases). Se siguió el mismo procedimiento para agricultura de riego.

La caracterización de las áreas con uso inadecuado para la agricultura, desde el punto de vista ambiental, se realizó recortando los mapas de condicionantes

físicas (topográficas, edáficas y climáticas), con los límites de las áreas con uso inadecuado para agricultura de temporal y riego. Se procedió de la misma manera con las áreas con uso adecuado con fines comparativos.

Las vías de comunicación tienen un papel importante en la comercialización de los productos agropecuarios; por lo anterior, se consideró de interés cuantificar las diferencias en cuanto a sus diferentes modalidades y densidad en las áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura. La longitud total de las diferentes modalidades de vías de comunicación en áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura se obtuvo de la siguiente manera. Primero se exportaron tales áreas del sistema IDRISI al ARC/INFO (formato raster a vectorial), en ARC/INFO se recortó el mapa de vías de comunicación con los límites de ambas áreas y, finalmente, en ArcView se calcularon las longitudes de cada tipo de vía, aprovechando su capacidad para calcular longitudes directamente.

Otro tipo de información disponible y ubicable geográficamente para caracterizar las áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura son los resultados del Censo de Población y Vivienda de 1995, realizado por el INEGI (1996b). A partir de las coordenadas de las poblaciones de más de tres viviendas del DDR 004, disponibles en dicho Censo en disco compacto, se generó en ARC/INFO un mapa de puntos. Del mismo disco compacto, se extrajo la base de datos en formato .dbf, en la que se descartaron las poblaciones de menos de tres viviendas para las cuales no se presentan datos en forma individual. Esta base de datos se anexó al mapa de puntos.

La caracterización de acuerdo con los datos censales de las áreas con uso inadecuado se realizó desplegando dichas áreas en ArcView, en donde se sobrepusieron las poblaciones. En este sistema se seleccionaron las poblaciones ubicadas claramente sobre las áreas con uso inadecuado para agricultura tanto de temporal como de riego. Se generó un archivo ASCII con la base de datos de las poblaciones seleccionadas, dicho archivo se exportó a una hoja de cálculo. Lo mismo se hizo con las comunidades ubicadas sobre las áreas con uso adecuado. En la hoja de cálculo ambos archivos ASCII se compararon con el fin de cuantificar sus diferencias.

Cuadro 1. Uso del suelo por municipio del DDR 004 de acuerdo con CETENAL (1973).

Municipios	Agrícola	Pecuario	Forestal	Urbano	Cuerpos de agua	Otras clases [†]
	----- ha (%) -----					
Juventino Rosas	24 339 (11)	2 706 (11)	13 590 (13)	174 (8)	34 (9)	387 (11)
Comonfort	21 188 (9)	5 385 (23)	20 467 (19)	198 (10)	0 (0)	552 (16)
Celaya	41 259 (18)	905 (4)	9 678 (9)	1 123 (56)	0 (0)	107 (3)
Apaseo el Grande	30 801 (14)	273 (1)	12 100 (12)	143 (7)	8 (2)	0 (0)
Apaseo el Alto	27 910 (13)	1 162 (5)	9 050 (9)	158 (8)	81 (22)	327 (10)
Tarimoro	17 963 (8)	993 (4)	12 092 (11)	122 (6)	0 (0)	0 (0)
Jerécuaro	51 362 (23)	9 143 (38)	26 167 (25)	82 (4)	237 (66)	1 922 (55)
Coroneo	9 468 (4)	3 431 (14)	1 834 (2)	16 (1)	0 (0)	194 (5)
Total	224 690 (100)	23 998 (100)	104 978 (100)	2 016 (100)	360 (100)	3 489 (100)

[†] Erosión, áreas en proceso de desmonte y una pequeña parte sin clasificar correspondiente a una carta no editada (E-14-A-15).

RESULTADOS Y DISCUSION

Las estadísticas de uso del suelo de los municipios en 1973 y 1993 se muestran en los Cuadros 1 y 2, respectivamente; en éstos, se observa una diferencia total para los ocho municipios de 31 763 ha de incremento de la superficie agrícola en un periodo de 20 años. La superficie total clasificada como no agrícola en las fotografías aéreas (94 766 ha), la cual corresponde prácticamente a la superficie total de uso pecuario y forestal (23 998 + 104 978 ha = 128 976 ha) de acuerdo con CETENAL, disminuyó en 34 210 ha. Por lo anterior, se deduce que el área agrícola del DDR 004 se incrementó alrededor de 30 000 ha en un periodo de 20 años, a expensas de la superficie de uso pecuario y forestal. En el mismo periodo, el área ocupada por las principales áreas urbanas se incrementó en más de 300% (de 2016 a 6730 ha), ocupando básicamente áreas con potencial agrícola. En 1993 se detectó un gran número de cuerpos de agua "temporales", debido a las altas

precipitaciones en los dos años anteriores, por el fenómeno del "Niño"; mientras que los cuerpos de agua de la cartografía CETENAL corresponden únicamente a los "permanentes".

Los cambios en el área agrícola durante el periodo de 1973 a 1993 se describen en las siguientes clases:

A) La coincidencia de las áreas agrícolas. Esta clase lógicamente es la más extensa y varía en gran medida, de acuerdo con la superficie total agrícola de cada municipio.

B) El crecimiento del área agrícola. Básicamente, los crecimientos del área agrícola se localizan en las laderas de las montañas y 75% se ubica dentro de las áreas clasificadas con uso inadecuado para la agricultura. Los municipios con menor ampliación del área agrícola son Celaya y Coroneo, mientras que la mayor ampliación se presenta en Jerécuaro y Comonfort.

C) Áreas agrícolas en 1973 con un uso diferente en 1993. Principalmente, estas áreas corresponden a los crecimientos urbanos, también pueden ser áreas

Cuadro 2. Uso del suelo con base en fotografías aéreas escala 1:75 000 (INEGI, 1993), por municipio del DDR 004.

Municipios	Agrícola	Pecuario y forestal	Urbano	Cuerpos de agua
	----- ha (%) -----			
Juventino Rosas	27 533 (11)	13 798 (15)	356 (5)	0 (0)
Comonfort	26 270 (10)	21 004 (22)	533 (8)	44 (2)
Celaya	39 947 (15)	9 346 (10)	3 793 (56)	0 (0)
Apaseo el Grande	33 759 (13)	8 951 (9)	607 (9)	21 (1)
Apaseo el Alto	32 614 (13)	5 568 (6)	427 (6)	108 (6)
Tarimoro	22 700 (9)	7 867 (8)	591 (9)	23 (1)
Jerécuaro	61 699 (24)	25 378 (27)	392 (6)	1 544 (83)
Coroneo	11 931 (5)	2 854 (3)	31 (1)	145 (7)
Total	256 453 (100)	94 766 (100)	6 730 (100)	1 885 (100)

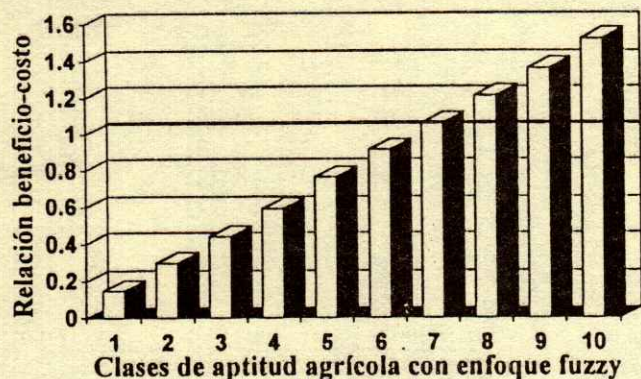


Figura 3. Relación beneficio-costo promedio, por clase de aptitud fuzzy, para los cultivos de importancia en el Distrito de Desarrollo Rural 004 Celaya, Guanajuato.

agrícolas en el pasado hoy abandonadas, o el resultado de la falta de exactitud en la clasificación del uso actual del suelo, lo que provoca la no coincidencia de los límites de los polígonos entre las dos fechas. Sin embargo, en el municipio de Celaya es muy evidente que esta clase representa el crecimiento del área urbana, predominantemente hacia el oeste. Los municipios de Jerécuaro y Celaya presentan las mayores superficies con esta clase.

D) La coincidencia de áreas de otros usos. Esta clase corresponde a la coincidencia del uso pecuario-forestal principalmente y, en menor medida, de áreas urbanas y cuerpos de agua.

En la Figura 3 se presenta la relación beneficio-costo promedio por clase de aptitud agrícola. Se aprecia que existen ganancias en las tres primeras clases (10, 9 y 8), mientras que la cuarta clase (7) está cerca del punto de equilibrio con utilidades marginales, y de la clase 1 a 6 se registran pérdidas. Por lo anterior, se determinó utilizar la superficie de las tres primeras clases de las clasificaciones fuzzy por cultivo para definir el área con uso potencial para agricultura de riego y temporal, y así poder compararlo con el uso del suelo en 1993.

En los Cuadros 3 y 4 se muestran, para cada municipio del DDR 004, las cuatro clases de uso del suelo (agrícola, no agrícola, urbano y cuerpos agua) y se señala para cada clase, la superficie con y sin potencial para agricultura de temporal y riego, respectivamente. La información más relevante de estos cuadros corresponde a la superficie agrícola

actual ubicada en áreas sin potencial. En el Cuadro 3 se observa un total de 95 870 ha utilizadas inadecuadamente en la agricultura de temporal, la cual disminuye a 73 181 en la agricultura de riego (Cuadro 4). La superficie con uso inadecuado para agricultura de riego es menor debido a la mayor superficie con potencial para la agricultura bajo esta condición. Al comparar las áreas inadecuadas para

Cuadro 3. Areas con (Si) y sin (No) potencial para la agricultura de temporal para cada una de las clases de uso actual del suelo en los municipios del DDR 004.

Municipios	Potencial	Agrícola			
		No agrícola	Urbano	Agua	ha
Juventino Rosas	No	9 033	13 163	3	0
	Si	18 500	635	353	0
Comonfort	No	18 176	20 304	62	13
	Si	8 094	700	471	31
Celaya	No	6 291	8 256	127	0
	Si	33 656	1 090	3 666	0
Apaseo el Grande	No	6 142	6 129	57	0
	Si	27 617	2 822	550	21
Apaseo el Alto	No	10 208	4 468	73	0
	Si	22 406	1 100	354	108
Tarimoro	No	8 770	7 487	29	3
	Si	13 930	380	562	20
Jerécuaro	No	31 202	20 932	61	116
	Si	30 497	4 446	331	1 428
Coroneo	No	6 043	2 451	8	0
	Si	5 888	403	23	145
Total	No	95 870	83 190	420	132
	Si	160 588	11 576	6 310	1 753

Cuadro 4. Areas con (Si) y sin (No) potencial para la agricultura de riego para cada una de las clases de uso actual del suelo en los municipios del DDR 004.

Municipios	Potencial	Agrícola			
		No agrícola	Urbano	Agua	ha
Juventino Rosas	No	5 568	11 101	1	0
	Si	21 965	2 697	355	0
Comonfort	No	8 360	16 552	12	6
	Si	17 910	4 452	521	38
Celaya	No	2 682	6 261	19	0
	Si	37 265	3 085	3 774	0
Apaseo el Grande	No	5 746	3 784	5	0
	Si	26 868	1 784	422	108
Apaseo el Alto	No	2 179	4 245	33	0
	Si	31 580	4 706	574	21
Tarimoro	No	7 440	7 323	20	0
	Si	15 260	544	571	23
Jerécuaro	No	32 206	21 149	72	85
	Si	29 493	4 229	320	1 459
Coroneo	No	8 995	2 708	28	14
	Si	2 936	146	3	131
Total	No	73 181	73 123	190	105
	Si	183 277	21 643	6 540	1 780

agricultura de temporal y riego, se observó que la superficie con uso inadecuado para agricultura de riego está contenida casi en su totalidad (68 063 ha) en las áreas con uso inadecuado para agricultura de temporal, a excepción de pequeñas superficies (5118 ha) ubicadas principalmente en los municipios de Jerécuaro y Coroneo aptas para agricultura de temporal y no aptas para riego. En los municipios de Comonfort y Juventino Rosas se presentan 27 807 ha adecuadas para riego e inadecuadas para temporal.

Alrededor de 94% de la superficie total de las principales zonas urbanas (6310 ha) está ubicado en el área con potencial para agricultura de temporal y 97% en el área de riego. Se presentan algunas áreas clasificadas con potencial para la agricultura, tanto de temporal (11 578 ha) como de riego (21 643 ha), que actualmente no se destinan a estas actividades. En recorridos de campo se observó que algunas de ellas corresponden a terrenos en proceso de urbanización.

Las principales características físicas ponderadas para las áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura se presentan en el Cuadro 5. Se observa que las diferencias entre las dos condiciones de humedad (riego y temporal) son mínimas debido a que, en gran medida, corresponden a las mismas áreas. La altitud, pendiente y profundidad del suelo presentan una marcada diferencia entre las áreas con uso adecuado e inadecuado, mientras que las variables climáticas presentan menores diferencias. Esto se debe, por una parte, a que los parámetros de clima tienen una mayor amplitud espacial, y, por otra, al efecto más específico del clima sobre los diferentes cultivos (por ejemplo, los diferentes requerimientos de humedad y temperatura entre cultivos).

En el Cuadro 6 se aprecia la longitud en km y porcentaje de los diferentes tipos de vías de comunicación en áreas con uso adecuado e inadecuado

(temporal y riego) para la agricultura, así como en áreas de uso pecuario y forestal. Aun considerando la mayor superficie de las áreas con uso adecuado para la agricultura, se observa mayor densidad de vías de comunicación en estas áreas.

En la Figura 4 se presenta la distribución de las poblaciones en las áreas con uso adecuado e inadecuado para agricultura (temporal y riego). Se ubicaron un total de 54 poblaciones en las áreas con uso inadecuado para la agricultura, de las cuales cinco de ellas corresponden al municipio de Apaseo el Alto, dos a Apaseo el Grande, tres a Celaya, tres a Comonfort, cuatro a Coroneo, 30 a Jerécuaro, tres a Juventino Rosas y cuatro a Tarimoro. De lo anterior se deduce que el municipio de Jerécuaro presenta la mayor superficie (Cuadros 3 y 4) y la mayor cantidad de población en áreas con uso inadecuado (Figura 4).

El Cuadro 7 muestra las diferencias promedio de las características socioeconómicas de los pobladores de 54 poblaciones ubicadas en las áreas con uso inadecuado, con relación a una muestra de 33 poblaciones ubicadas en las áreas con uso adecuado. Se observa que el promedio de habitantes de las poblaciones en las áreas con uso adecuado (3161) para la agricultura es mayor que en las poblaciones de las áreas con uso inadecuado para la misma actividad (338).

En el estado de Guanajuato, el número de hombres por cada 100 mujeres se mantiene en valores muy cercanos a 100 hasta los 15 años de edad, a partir de esta edad ningún grupo quinquenal de edad alcanza este valor (INEGI, 1996a), esto se atribuye, entre otras causas, a la migración masculina. De acuerdo con los valores del Cuadro 7, el promedio de la migración masculina (número de hombres por cada 100 mujeres) es ligeramente superior en las poblaciones de las áreas con uso adecuado. Sin embargo, otros indicadores de

Cuadro 5. Valores ponderados de los factores ambientales para las áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura de temporal y riego en el DDR 004.

Factores ambientales	Uso adecuado			Uso inadecuado		
	Temporal	Riego	Promedio	Temporal	Riego	Promedio
Altitud (m)	1 839	1 843	1 841	2 092	2 159	2 125
Pendiente (%)	2.3	2.6	2.4	9.9	11.4	10.6
Profundidad de suelo (cm)	92	88	90	46	42	44
Precipitación (mm)	679	672	675	691	712	701
Temperatura (°C)	17.9	18.0	18.0	17.4	17.0	17.2
Evaporación (mm)	1 998	2 009	2 003	1 969	1 932	1 950

Cuadro 6. Longitud de las vías de comunicación en áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura, y áreas pecuarias y forestales en el DDR 004.

Vías de comunicación	Total	Áreas adecuadas para agricultura	Áreas inadecuadas para agricultura	Áreas pecuarias y forestales
		km	km (%)	km (%)
Federales:	203	177 (87)	26 (13)	0 (0)
De Cuota Dividida	62	57 (92)	5 (8)	0 (0)
Libre Dividida	21	21 (100)	0 (0)	0 (0)
Libre no Dividida	120	99 (83)	21 (17)	0 (0)
Estatales:	240	196 (82)	15 (6)	29 (12)
Libre no Dividida	168	149 (89)	15 (9)	4 (2)
Revestida	72	47 (65)	0 (0)	25 (35)
Otros Caminos:	609	489 (64)	96 (16)	14 (20)
Pavimentados	12	12 (100)	0 (0)	0 (0)
Revestidos	365	228 (63)	129 (35)	8 (2)
Terracerías	42	41 (98)	1 (2)	0 (0)
Brechas	190	108 (57)	76 (40)	6 (3)
Vía de tren:	136	131 (96)	5 (4)	0 (0)

la migración en general (mixta), como el porcentaje de la población mayor que 15 años (migración de población en edad de trabajar) así como el crecimiento de las poblaciones en un período de cinco años, muestran una mayor migración de la población de las áreas con uso inadecuado. Las poblaciones ubicadas en las áreas inadecuadas para la agricultura presentan un mayor porcentaje de población analfabeta y un menor porcentaje de viviendas con los servicios de electricidad, agua potable y drenaje.

CONCLUSIONES

Al comparar el área agrícola del DDR 004 en 1973 (224 690 ha) y 1993 (256 453 ha) se encontró que ésta

se incrementó a expensas del área pecuaria y forestal, en 31 763 ha, en un período aproximado de 20 años. Del crecimiento del área agrícola entre 1973 y 1993, 75% se ubica dentro de las áreas clasificadas como inadecuadas para la agricultura de temporal y riego.

El desarrollo urbano provocó un decremento en el área agrícola del orden de 4714 ha. Se considera importante estimar el decremento en dicha área debido al crecimiento de la red carretera.

La relación costo-beneficio puede ser un criterio para definir las clases de uso potencial por cultivo con enfoque fuzzy para comparar con el uso actual del suelo.

Se estimó una superficie bruta de 180, 227 y 213, 240 ha con potencial para agricultura de temporal y riego, respectivamente. Al sobreponer el área agrícola en 1993 con la superficie potencial para la agricultura, se cuantificaron 160 588 ha (63%) con uso adecuado y 95 870 ha (37%) con uso inadecuado para la agricultura de temporal. Para la agricultura de riego se cuantificaron 183 277 ha (71%) y 73 181 ha (29%) con uso adecuado e inadecuado, respectivamente.

La menor superficie con uso inadecuado para la agricultura (temporal y riego) se localiza en el municipio de Celaya, mientras que en Comonfort, Jerécuaro y Coroneo más de la mitad de su superficie agrícola se clasifica como inadecuada.

Las mayores altitudes y pendientes, y la menor profundidad de suelo, son las principales características físicas de las áreas con uso inadecuado para la agricultura cuando se comparan con las áreas con uso adecuado para la misma actividad.

Cuadro 7. Características socioeconómicas promedio de las poblaciones de las áreas con uso adecuado e inadecuado para la agricultura en el DDR 004.

Características	Poblaciones en áreas adecuadas para agricultura	Poblaciones en áreas inadecuadas para agricultura
Promedio de habitantes	3 161	338
Número de hombres por cada 100 mujeres	91	94
Población mayor que 15 años (%)	60	55
Crecimiento de las poblaciones de 1990 a 1995 (%)	2.5	-0.3
Analfabetas de 6 a 14 años (%)	19	29
Analfabetas de 15 años en adelante (%)	22	31
Viviendas con electricidad (%)	81	73
Viviendas con agua potable (%)	74	40
Viviendas con drenaje (%)	37	8

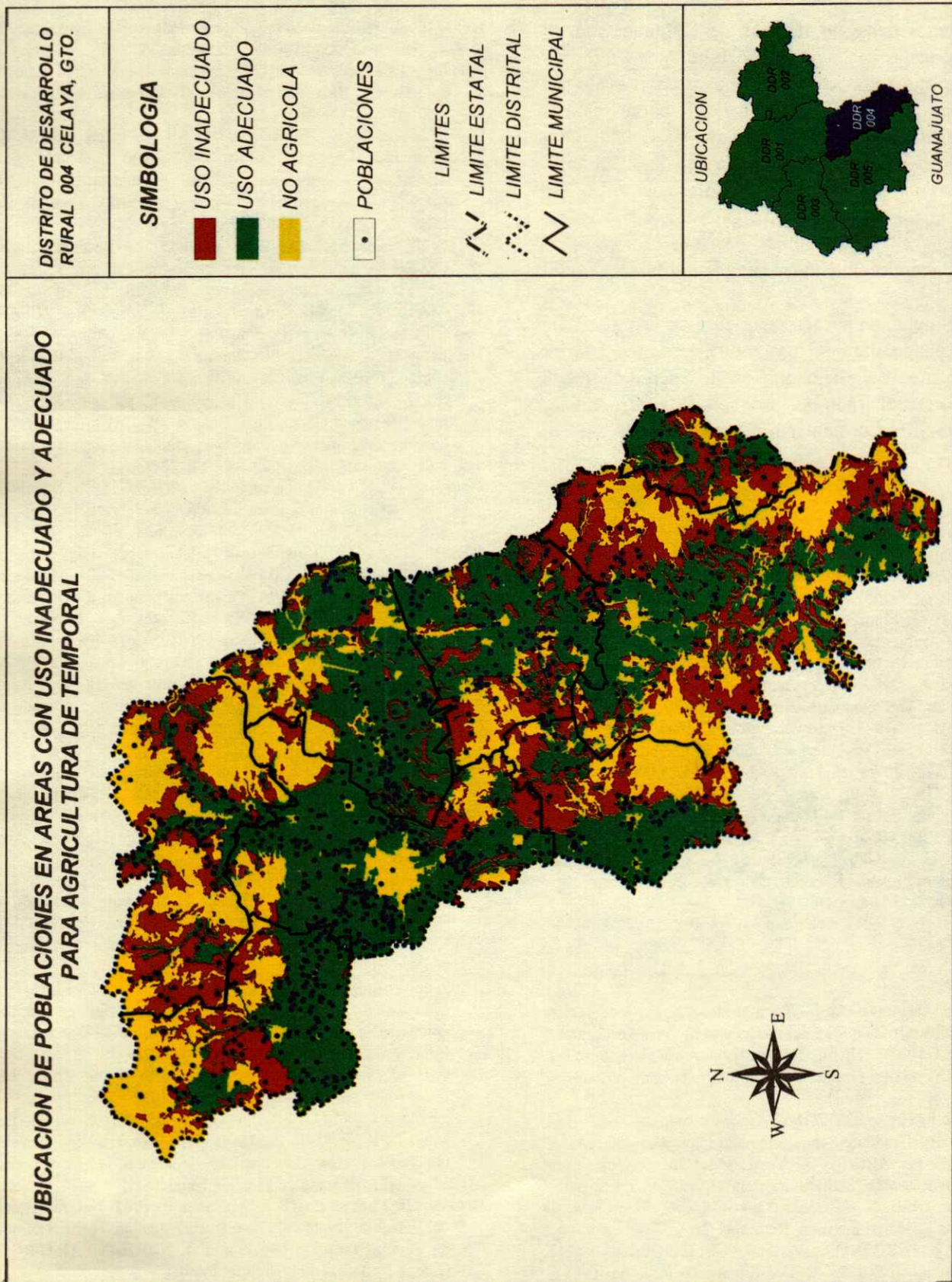


Figura 4. Ubicación de las poblaciones en áreas con uso adecuado e inadecuado para agricultura de temporal y riego.

La menor densidad de vías de comunicación, el menor promedio de la población total, y los mayores índices de migración, analfabetismo y pobreza de sus pobladores son las principales características socioeconómicas de las áreas con uso inadecuado para la agricultura cuando se comparan con los habitantes de las áreas con uso adecuado para dicha actividad.

El municipio de Jerécuaro presenta las mayores superficies y el mayor número de habitantes en áreas agrícolas actuales clasificadas sin aptitud para esta actividad.

La delimitación y caracterización de las áreas con uso inadecuado para la agricultura permiten aportar más elementos de juicio que pueden ser de utilidad para soportar alternativas productivas dentro de las propuestas de reordenamiento de uso del suelo.

LITERATURA CITADA

- Berry, J.K. 1993. Overlaying maps and characterizing error propagation. *In: Beyond mapping. Concepts, algorithms, and issues in GIS.* GIS World Books. GIS World. Fort Collins, CO, USA.
- Bifani, P. 1982. Planificación y medio ambiente. Desarrollo y Medio Ambiente. Vol. III. Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias Administrativas, Madrid.
- Burrough, P.A. 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Soil Sci.* 40: 477-492.
- CEPAL-PNUMA. 1983. Expansión de la frontera agropecuaria y medio ambiente en América Latina. Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias Administrativas. Madrid.
- CETENAL. 1973-1974a. Cartas de edafología del estado de Guanajuato. Escala 1:50 000. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, DF.
- CETENAL. 1973-1974b. Cartas de uso del suelo del estado de Guanajuato. Escala 1:50 000. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, DF.
- Davidson, D.A., S.P. Theocharopoulos y R.J. Bloksma. 1994. A land evaluation project in Greece using GIS and based on Boolean and fuzzy methodologies. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 8: 369-384.
- Eastman, R.J. 1992a. IDRISI. User's guide. Version 4.0.1. Clark University. Graduate School of Geography. Worcester, MA.
- Eastman, R.J. 1992b. IDRISI. Technical reference. Version 4.0.1. Clark University. Graduate School of Geography. Worcester, MA.
- Eastman, R.J. 1997. IDRISI for Windows Version 2.0. Clark University. Graduate School of Geography. Worcester, MA.
- ESRI. 1994. PC ARC/INFO. Version 3.4.2b. Environmental Systems Research Institute. Redlands CA.
- ESRI. 1995. ArcView. Version 1.0 for Windows. Environmental Systems Research Institute. Redlands CA.
- ESRI. 1996a. ARC/INFO. Version 7.1 for Windows NT. Environmental Systems Research Institute. Redlands CA.
- ESRI. 1996b. ArcView. Version 3.0 for Windows. Environmental Systems Research Institute. Redlands CA.
- Fuentes A., L. (Coor.) 1992. Cambios en el uso del suelo agrícola en México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía, México, DF.
- García N., H. 1999. Aptitud de uso del suelo del Distrito de Desarrollo Rural 004 Celaya, Guanajuato. Una aplicación del enfoque de límites de transición gradual utilizando SIG. Tesis de Doctorado en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM, México, DF.
- García N., H., C. Mejía A., R.R. García D., A. González R. y R. Chacón M. 1996. Zonas potenciales para la producción de las principales especies vegetales en el estado de Guanajuato. Publicación Técnica 1. SAGAR, INIFAP, CIRCE-Campo Experimental Bajío, Celaya, Gto.
- García N., H., J. López B., R. Moreno S., M.L. Villers R. y R.R. García D. 1999. Potencial agrícola del Distrito de Desarrollo Rural 004 Celaya, Guanajuato. pp. 69-83. *In: Investigaciones Geográficas Boletín* 38. Una aplicación del enfoque de límites de transición gradual (fuzzy) utilizando SIG Instituto de Geografía, UNAM, México.
- González A., I.J., A. Turrent F. y R. Aveldaño S. 1990. Provincias agronómicas de las tierras de labor bajo temporal en México. SARH, INIFAP. México, DF.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1993a. Anuario estadístico del estado de Guanajuato. Edición 1993. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1993a. Fotografías aéreas a escala 1:75 000 de la zona F14-10 (Querétaro), líneas de vuelo 147 a 152 con fecha de mayo y junio de 1993. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, Ags. México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1996a. Guanajuato. Censo de Población y Vivienda de 1995. Resultados definitivos. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1996b. Guanajuato. Censo de Población y Vivienda de 1995. Resultados definitivos [CD-ROM]. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1997. Anuario estadístico del estado de Guanajuato. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. Aguascalientes, Ags., México.
- López B., J., I. Valdez M. y J. Ugalde R. 1996. Corrección fotogramétrica de segmentos digitizados de fotografías aéreas aplicando un SIG, para la determinación del uso del suelo en la sierra de Quetzaltepec. México. Investigaciones Geográficas num. 33. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.
- Ortiz V., R. Moreno S. y R.A. Martínez P. 1992. Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el estado de Puebla. Publicación Técnica 1. SARH-INIFAP-CIRCE-Campo Experimental Cholula, Puebla.

- SCT. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. 1993. Guanajuato. Mapa turístico de comunicaciones y transportes. Escala 1:250 000. Secretaria de Comunicaciones y Transportes-Coordinación General de Planeación. Planeta Mexicana. México, DF.
- Soto M., C. y A. Soto M. 1990. Cambios recientes en el uso del suelo agrícola en la región de El Bajío, Gto. *Geografía y Desarrollo* 2-5: 3-11.
- Soto M., C. y A. Soto M. 1992. Cambios recientes en el uso del suelo agrícola en México. pp. 12-25. *In*: L. Fuentes A. (Coor.). Cambios en el uso del suelo agrícola en México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía, México, D.F.
- Tang, H. y E. van Ranst. 1992. Testing of fuzzy set theory in land suitability assessment for rainfed grain maize production. *Pedologie* XLII-2: 129-147.
- Tang, H. y D. Ruan. 1992. Land use suitability assessment for irrigated maize based on fuzzy set theory. pp. 597-606. *In*: Proceedings International Conference on Advances in Planning, Design and Management of Irrigation Systems as Related to sustainable Land Use. Catholic University. Leuven, Belgium.
- Tang, H., J. Debayeye, D. Ruan y E. van Ranst. 1991. Land suitability classification based on fuzzy set theory. *Pedologie* XLI-3: 277-290.
- Turrent F., A. 1986. Estimación del potencial productivo actual de maíz y frijol en la República Mexicana. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Van Ranst, E., H. Tang, R. Groenemans y S. Sinthurahat. 1996. Application of fuzzy logic to land suitability for rubber production in peninsular Thailand. *Geoderma* 70: 1-19.

SITIOS DE OCURRENCIA Y PREDICCIÓN DE RENDIMIENTOS DE MAÍZ A TRAVÉS DE INDICES DE VEGETACIÓN DE IMÁGENES DE SATELITE

Occurrence Sites and Estimation of Maize Yields with NDVI from Satellite Images

Jesús Soria Ruíz¹, Carlos A. Ortiz Solorio², Fabián Islas Gutiérrez³ y Víctor Volke Haller²

RESUMEN

El estudio se realizó en el estado de Guanajuato, México, en una superficie de 15 840 hectáreas durante el ciclo agrícola primavera-verano de 1997. El objetivo fue determinar y cuantificar los sitios de ocurrencia de maíz (*Zea mays* L.) bajo riego, a través del análisis temporal de Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), obtenidos de imágenes Landsat-TM, y con ello realizar estimaciones de rendimiento. En seis parcelas piloto de maíz previamente caracterizadas y con el apoyo del Sistema de Información Geográfica (SIG) Idrisi®, se obtuvieron los NDVI mediante el procesamiento de dos escenas correspondientes con las etapas de floración y madurez fisiológica del cultivo. Para la determinación de los sitios de ocurrencia, el genotipo, la densidad de población y la predicción del rendimiento de maíz, se utilizaron los Índices de Vegetación (NDVI) de cada parcela previamente caracterizadas. Los resultados de las imágenes clasificadas, al compararlas con la verificación de campo, indican que la predicción de cobertura de maíz tuvo una efectividad de 75%. Con respecto al genotipo, la predicción fue efectiva en 41.6%; por su parte, en la densidad de población la predicción subestimó en 1.9% con respecto al valor real obtenido en campo. Referente al rendimiento de grano, la predicción registró una sobrestimación de 9.4%. El análisis discriminante indicó que es posible anticipar la predicción de sitios de ocurrencia de maíz y, en consecuencia, su rendimiento desde la floración con una probabilidad de 61.1%.

Palabras clave: Sensores remotos, Landsat-TM, pixel, Índice de Vegetación, *Zea mays* L., rendimientos.

¹ Campo Experimental Valle Toluca, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP).
e-mail: jsoria@latinmail.com

² Programa de Edafología, IRENAT, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México.

³ Campo Experimental Valle de México. INIFAP.

Recibido: Marzo de 1999.
Aceptado: Octubre de 1999.

SUMMARY

This study was done in the state of Guanajuato, Mexico, on 15 840 ha during the spring-summer season 1997. Occurrence sites of maize (*Zea mays* L.) under irrigation were determined and quantified using the temporary analysis of Normalized Difference Vegetation Indices (NDVI) obtained from Landsat-TM images and yield predictions were made. NDVI were obtained using the process of two scenes corresponding to the crops' stages of flowering and physiological maturity in six previously characterized pilot maize fields with the aid of the Geographical Information System Idrisi®. To determine occurrence sites, NDVI mean values with the standard deviation of every pilot field were used. When compared with the field observations, the results of the classified images indicated that the prediction of maize cover was 75% effective. For genotype, the prediction was 41.6% effective. Estimation of population density was 1.9% lower than the real figure obtained in the field. The grain yield prediction was overestimated by 9.4%. The discriminating analysis indicated that it is possible to anticipate occurrence sites of maize and, therefore, its yield from the flowering stage with a probability of 61.1%.

Index words: Remote sensing, Landsat-TM, pixel, Vegetation Indices, corn, *Zea mays* L., yield.

INTRODUCCION

La observación remota desde satélites cuenta con numerosas aplicaciones, gracias a las ventajas que ofrece frente a otros medios de observación más convencionales como la fotografía aérea o los trabajos de campo, aunque más que sustituirlos los complementa adecuadamente. Entre las ventajas de la observación espacial por satélites destacan la cobertura global y periódica de la superficie terrestre, amplia visión de los fenómenos geográficos que se producen en la tierra, y facilitan imágenes sobre áreas no accesibles así como información sobre regiones no visibles del espectro para el ojo humano.

Para extraer información de la vegetación a partir de imágenes de satélite, es necesario tomar en cuenta un parámetro conocido como Índice de Vegetación. Este índice se define como "una función de la relación de reflectancias entre las bandas visible e infrarrojo cercano"; un cociente o Índice de Vegetación implica efectuar una división pixel (el menor elemento en que puede descomponerse una imagen en una pantalla de ordenador) a pixel entre los niveles digitales almacenados en dos a más bandas de la misma imagen. Soria *et al.* (1998) indican que su empleo se justifica en dos situaciones: a) para mejorar la discriminación entre suelo y vegetación, y b) para disminuir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas coberturas. La reflectancia y transmitancia espectral de las plantas dependen del ángulo de incidencia de la radiación solar y de la longitud de onda; por ello, existe una marcada absorción en el espectro visible y una reflexión en el infrarrojo cercano. Tucker *et al.* (1985) mencionan que a partir de la década pasada, los Índices de Vegetación derivados de las bandas visible (rojo) e infrarrojo cercano han constituido una herramienta muy valiosa para determinar la variación espacial y los cambios fenológicos en la vegetación. Se han definido índices diferentes (Jackson y Huete, 1991), pero el más usado es el denominado Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés).

El empleo del NDVI ha tenido un gran impulso para abordar los cambios en la vegetación, pues permite conocer el estado de vigor vegetal, así como dar seguimiento a superficies cultivadas (Granados *et al.*, 1996), hacer el inventario de cosechas (Teng, 1990), y corregir deficiencias de nutrimentos en praderas establecidas (Taylor *et al.*, 1998). Wiegand y Richardson (1984) concluyen que el NDVI caracteriza la canopia en términos de intercepción de luz y de rendimiento, ya que se utiliza como una herramienta importante para cuantificar el efecto del estrés sobre el desarrollo del dosel y el rendimiento de grano.

La predicción de rendimientos a través de imágenes de satélite está muy relacionada con la capacidad para identificar las especies de cultivos, así como ciertas variables agronómicas como madurez, densidad de población, vigor y enfermedades, las cuales pueden usarse como indicadores de rendimiento (National Academy of Sciences, 1977). La identificación de cultivos y la medición de la superficie sólo son una etapa en el proceso, la otra etapa es la predicción y la estimación del rendimiento.

Al respecto, Cipra *et al.* (1980) estimaron la producción de forraje en praderas irrigadas mediante el análisis de datos digitales del satélite Landsat. Concluyen que el uso de datos obtenidos de satélites para estimar la producción parece ser factible, no obstante, la producción estimada será más confiable si los datos de campo se colectan cada año.

En México se han realizado estudios desarrollados por varias instituciones, utilizando como herramienta principal a la percepción remota. En su gran mayoría, dichos estudios están enfocados a las aplicaciones geológicas, meteorológicas, marítimas, estudios forestales y de erosión del suelo, de salinidad, de calidad del agua y de identificación de cultivos (Soria *et al.*, 1998). Sin embargo, los escasos trabajos enfocados a la predicción de rendimientos a través de sensores remotos se realizaron en condiciones distintas a las de este país. Por ello, existe la necesidad y el interés de los organismos y dependencias de gobierno relacionados con el sector agrícola, de contar con una metodología que permita estimar el rendimiento de los cultivos de importancia económica. Por ello, el objetivo del presente estudio fue determinar el comportamiento espectral de los sistemas de producción de maíz en condiciones de riego en dos etapas fenológicas, a través de los Índices de Vegetación obtenidos de imágenes de satélite Landsat-TM e identificar y cuantificar los sitios de ocurrencia y realizar estimaciones de rendimiento con previa anticipación a la cosecha.

MATERIALES Y METODOS

Area de Estudio

El área de estudio se ubica en el Distrito de Desarrollo Rural (DDR) 05 de Cortázar, Guanajuato, México, entre los paralelos 20°23' y 20°30' de latitud norte y los meridianos 100°58' y 101°06' de longitud oeste. Parcialmente, abarca los municipios de Jaral del Progreso, Valle de Santiago, Salamanca y Cortázar, con una superficie total de 15 840 hectáreas. Se seleccionó el cultivo del maíz (*Zea mays* L.) debido a la importancia económica y social que representa en la dieta del pueblo mexicano. Los trabajos de campo se desarrollaron durante el ciclo agrícola primavera-verano de 1997.

Imágenes de Satélite

Se adquirieron dos escenas del satélite Landsat-TM con tamaño real de pixel de 25 m en presentación CD-ROM y formato digital BSQ (Band sequential) orientada a mapa, con corrección de sistema y proyección UTM correspondiente a la zona 14. Esta adquisición se realizó a través del proveedor mundial EOSAT^{TM/SM} Customer Services Department. Las escenas coinciden con las etapas fenológicas de floración y madurez fisiológica del maíz (Cuadro 1).

Elaboración de Máscara Digital

Se procedió a la elaboración de una máscara digital en formato vectorial, para delimitar la zona de estudio y además georreferenciar algunos rasgos sobresalientes. Este procedimiento se realizó con el apoyo del Sistema de Información Geográfica (SIG) Idrisi[®].

Recopilación y Análisis de Información

El análisis de la información recopilada cubrió los siguientes aspectos: a) sistema de producción de maíz de riego que incluyó nombre de la semilla utilizada, densidad de siembra, arreglo topológico, insumos utilizados y rendimientos obtenidos. Esta información fue proporcionada por los agricultores cooperantes involucrados en el área de estudio; b) caracterización climática diaria y c) modelo de elevación digital para cada 90 m de longitud.

Selección de Parcelas Piloto

Una vez delimitada y caracterizada el área de estudio, producto del análisis previo de la información de diferentes fuentes, así como de recorridos de campo, se determinaron seis sistemas de producción de maíz de riego. En cada uno de estos sistemas de producción, se escogió al azar una parcela piloto que, en conjunto, se utilizaron como campos de entrenamiento (Cuadro 2).

Cuadro 1. Imágenes de satélite Landsat-TM utilizadas. Ciclo agrícola primavera-verano de 1997.

Clave de la imagen (Columna/Renglón)	Fecha de toma de la escena	Sensor
027/046	3 de agosto de 1997	L5 TM
028/046	27 de septiembre de 1997	L5 TM

Nota: El área de estudio se ubicó en la zona de traslape 027/046 y 028/46.

Para determinar la ubicación espacial de las parcelas piloto, se utilizó el Sistema de Geoposicionamiento Global [Global Position System (GPS)] en coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator).

Determinación de Índices de Vegetación (NDVI)

Con el apoyo del SIG Idrisi, y como paso previo para el análisis, las escenas originales de Landsat-TM se corrigieron geoméricamente basadas en puntos de control; procedimiento habitual para imágenes de alta resolución y áreas con relieve plano (Chuvienco, 1996). Para obtener la ventana del área de estudio, se realizaron recortes de las bandas roja e infrarroja cercana del espectro de las escenas descritas en el Cuadro 1. Se determinaron los NDVI de las parcelas piloto como una definición previa de cada categoría (campos de entrenamiento); este procedimiento se aplicó en las escenas del 3 de agosto y del 27 de septiembre, las cuales corresponden a las etapas fenológicas de floración y de madurez fisiológica, respectivamente. Para ello, se aplicó la siguiente ecuación:

$$NDVI = (IRc - R) / (IRc + R)$$

Donde: IRc = Infrarrojo cercano (banda 4 del sensor Landsat-TM), R = Rojo (banda 3 del sensor Landsat-TM).

Los valores de NDVI, obtenidos en cada una de las parcelas piloto, corresponden al rango promedio de reflectancias \pm la desviación estándar; así como a los límites de reflectancia superior e inferior del conjunto de observaciones (píxeles) involucrados en cada una de las parcelas.

Sitios de Ocurrencia y Estimación de Rendimientos

A partir de la caracterización previa en campo de cada una de las parcelas piloto, como se indica en el Cuadro 2, y con los valores de NDVI obtenidos de las imágenes de satélite para cada parcela; con el apoyo del SIG Idrisi y mediante una reclasificación digital a partir del rango de valores de NDVI de las parcelas piloto, fue posible determinar la superficie de ocurrencia de cada una de las clases o categorías, asignando así los atributos de la parcela piloto en cuestión a la categoría correspondiente, como

Cuadro 2. Características de las parcelas piloto representativas de los sistemas de producción de maíz de riego del área de estudio.

Parcela	Semilla utilizada	Fecha de siembra	Densidad de población plantas ha ⁻¹	Ciclo vegetativo	Días a cosecha	Rendimiento t ha ⁻¹
1	Híbrido ceres	28/04/97	95 000	Intermedio	150	14.82
2	Híbrido asgrow	17/04/97	51 000	Tardío	160	14.37
3	Híbrido ceres	06/06/97	70 000	Intermedio	140	7.63
4	Híbrido asgrow	23/04/97	62 000	Intermedio	145	12.98
5	Híbrido asgrow	20/04/97	71 700	Tardío	158	15.41
6	Híbrido asgrow	18/04/97	114 000	Tardío	160	18.10

genotipo, densidad de población y rendimiento de grano.

El procedimiento anterior se realizó por separado en las escenas del 3 de agosto y del 27 de septiembre, cuyas áreas de ocurrencia de maíz obtenidas en las imágenes clasificadas mostraban diferencias tanto en superficies como en la distribución del maíz. Para amortiguar esta variación, se realizó una sobreposición de las dos imágenes clasificadas correspondientes a las etapas de floración y de madurez fisiológica, respectivamente; las áreas de intersección se consideraron sitios de ocurrencia definitivas, generando así un mapa final.

Comprobación de Resultados

La predicción de sitios de ocurrencia de maíz, genotipo, densidad de población y rendimiento, realizada en gabinete, se verificó en campo a través de entrevistas a los agricultores propietarios de las parcelas ubicadas en los píxeles muestreados (cuatro píxeles muestreados por categoría), para obtener información sobre el tipo de cobertura, genotipo utilizado, densidad de población (plantas ha⁻¹) y rendimiento de maíz obtenido. Finalmente, al contrastar los valores predichos en gabinete con los obtenidos en campo, se obtuvo el porcentaje de subestimación o sobrestimación de la predicción.

Anticipación de las Predicciones

Mediante un análisis discriminante, se determinó el nivel de probabilidad de la primera fecha de anticipación (escena del 3 de agosto) para la predicción de tipo de cobertura (maíz y no-maíz), obteniendo así la expresión matemática y su correlación canónica.

RESULTADOS Y DISCUSION

Caracterización de Parcelas Piloto por Índices de Vegetación

En cada uno de los píxeles involucrados en las parcelas piloto se obtuvieron los Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), cuyo rango de valores se indica en el Cuadro 3. Como puede apreciarse, este parámetro manifiesta su valor máximo en la etapa de floración (escena del 3 de agosto), el cual disminuye a medida que el cultivo alcanza su madurez fisiológica (escena del 27 de septiembre). Soria *et al.* (1998) indican que el NDVI está acotado entre ± 1 , con un umbral crítico para cubiertas vegetales en torno a 0.2, y cuando se obtienen valores menores que 0, implica que la reflectancia del rojo es mayor que la del infrarrojo cercano; generalmente, esto ocurre en presencia de

Cuadro 3. Rango de valores de Índices de Vegetación de parcelas piloto de maíz bajo riego.

Parcela	Píxeles	Índice de Vegetación (NDVI)			
		Escena del 97/08/03		Escena del 97/09/27	
		LC	$\bar{x} \pm \sigma$	LC	$\bar{x} \pm \sigma$
1	11	0.6788-0.7718	0.7207-0.7707 p	0.5517-0.5902	0.5590-0.5844 mf
2	15	0.6290-0.7015	0.6526-0.6948 f	0.4921-0.5447	0.4934-0.5314 mf
3	14	0.6119-0.7619	0.6950-0.7712 p	0.4958-0.5556	0.5133-0.5437 mf
4	10	0.4958-0.6641	0.5249-0.6337 f	0.4918-0.5410	0.5020-0.5314 mf
5	36	0.6690-0.7625	0.7104-0.7602 p	0.5966-0.6320	0.6041-0.6239 mf
6	28	0.5504-0.6974	0.6044-0.6864 p	0.4955-0.5398	0.6044-0.6864 mf

LC = Límites superior e inferior de NDVI.

$\bar{x} \pm \sigma$ = Valor promedio de NDVI \pm desviación estándar.

p = Prefloración; f = Floración; mf = Madurez fisiológica.

Cuadro 4. Superficies de los sitios de ocurrencia de maíz de riego obtenidas por Índices de Vegetación de imágenes Landsat-TM.

Similares a parcela piloto	Superficie			
	Escena del 97/08/03		Escena del 97/09/27	
	LC	$x \pm \sigma$	LC	$x \pm \sigma$
	----- ha -----			
1	6631.5	3779.1	1910.3	1256.2
2	3530.5	2194.5	3326.1	2478.3
3	8866.4	5673.4	3842.2	1989.7
4	5014.3	3141.8	3204.4	1934.4
5	6680.5	4056.9	830.9	415.7
6	5594.8	3373.2	2925.2	1693.6
Intersección de clases	12411.0	11745.3	6551.7	4941.7

LC = Límites superior e inferior de NDVI de la clase.

$x \pm \sigma$ = Valor medio \pm desviación estándar.

corpos de agua o de nubosidad. En el Cuadro 3 se muestran los límites superior e inferior (LC) y valor promedio \pm desviación estándar ($x \pm \sigma$) de cada parcela piloto.

Determinación de Sitios de Ocurrencia

Los rangos de valores de NDVI por límites superior e inferior (LC) y valor promedio \pm desviación estándar ($x \pm \sigma$) de las parcelas piloto, indicados en el Cuadro 3, se utilizaron para realizar las determinaciones de áreas de ocurrencia. En el

Cuadro 4 se muestran las superficies sembradas de maíz similares a las parcelas piloto correspondientes, para las dos escenas analizadas.

Es conveniente destacar que en los resultados obtenidos en la primera escena, en la mayoría de los casos, la superficie obtenida con los dos criterios (LC y $x \pm \sigma$) es mayor con respecto a los resultados de la escena del 27 de septiembre. También se observa que en la superficie de intersección de clases (producto de la sobreposición de superficies de las seis clases similares a las parcelas piloto), la superficie de ocurrencia es mayor en la primera escena (LC=12 411 ha; $x \pm \sigma$ =11 745.3 ha).

Al realizar la sobreposición de superficies de ocurrencia de las imágenes clasificadas del 3 de agosto y del 27 de septiembre, las áreas de intersección se consideraron superficies de ocurrencia definitivas, cuyos resultados se indican en el Cuadro 5. Como puede apreciarse con el criterio de $x \pm \sigma$, las coberturas similares a la Parcela 3 reportan mayor superficie de ocurrencia en el área de estudio con 1023 hectáreas; por su parte, coberturas similares a la Parcela 5 obtuvieron el valor más bajo con 132.7 ha.

Como se observa en el Cuadro 5, en general, la superficie de maíz para toda el área de estudio con el criterio de $x \pm \sigma$ fue de 4052.7 ha, este valor es la intersección producto de la sobreposición de 11 745.3

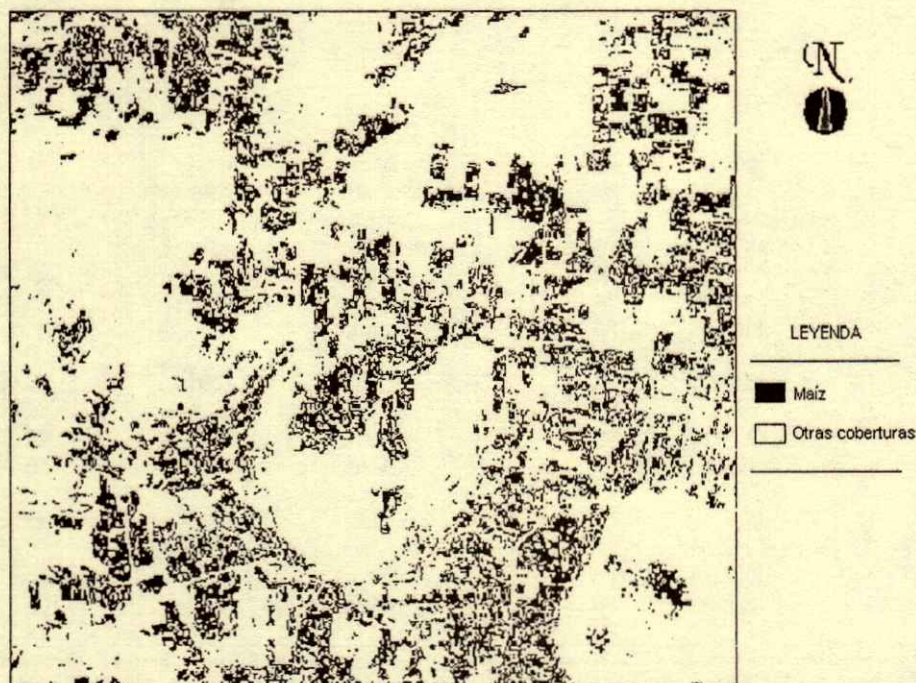


Figura 1. Zonas de ocurrencia de maíz determinadas por Índices de Vegetación.

Cuadro 5. Superficie de los sitios de ocurrencia de maíz bajo riego, sobreposición de dos fechas obtenida por Índice de Vegetación.

Similares a parcela piloto	Superficie	
	Sobreposición de las escenas 03/08/97 y 27/09/97	
	LC	$\bar{x} \pm \sigma$
	----- ha -----	
1	1113.7	468.3
2	829.8	391.9
3	2704.0	1023.3
4	757.6	260.4
5	399.9	132.7
6	971.6	364.9
Intersección de clases	5467.0	4052.7

Area de estudio: 15 840 ha.

LC = Límites superior e inferior de NDVI de la clase.

$\bar{x} \pm \sigma$ = Valor medio con desviación estándar.

y 4941.7 ha de las escenas del 3 de agosto y del 27 de septiembre, respectivamente. Las zonas de ocurrencia de maíz con el criterio antes señalado, se muestran en la Figura 1.

Comprobación de Resultados

En cada una de las imágenes clasificadas (DE1,...,DE6) donde se mostraban las áreas de ocurrencia de maíz similares a las parcelas piloto, se seleccionaron al azar cuatro píxeles (repeticiones) para comprobar, mediante verificación de campo, su correspondencia con las parcelas piloto similares a las clasificadas en la imagen. En el Cuadro 6 se muestran los resultados obtenidos en campo *versus* predicción realizada por NDVI.

Cuadro 6. Predicción de ocurrencia de maíz a través del análisis temporal de Índices de Vegetación obtenidos de imágenes Landsat-TM.

Predicción a partir de Índice de Vegetación (NDVI)				Versus	Información de campo			
Imagen Clasificación	Repetición	Pixel C/R	$\bar{x} \pm \sigma$		Cultivo	Híbrido	Densidad de población plantas ha ⁻¹	Rendimiento t ha ⁻¹
DE1	1	370/112	P1	Maíz	Asgrow	90 000	10.0	
	2	437/306	P1	Maíz	Ceres	88 000	14.0	
	3	193/425	P1	Maíz	Asgrow	95 000	9.0	
	4	35/330	P1	Maíz	Asgrow	60 000	11.0	
DE2	1	428/61	P2	Maíz	Ceres	70 000	13.0	
	2	365/236	P2	Maíz	Asgrow	65 000	12.0	
	3	291/379	P2	Sorgo	Pionner			
	4	110/33	P2	Sorgo	Pionner			
DE3	1	343/54	P3	Maíz	Correa	75 000	10.0	
	2	272/288	P3	Vna				
	3	300/520	P3	Maíz	Ceres	70 000	12.0	
	4	17/376	P3	Maíz	Asgrow	75 000	10.0	
DE4	1	447/63	P4	Maíz	Asgrow	70 000	14.0	
	2	420/63	P4	Maíz	Asgrow	65 000	12.0	
	3	142/399	P4	Sorgo	Pionner			
	4	118/51	P4	Sorgo	Dekalb			
DE5	1	458/17	P5	Maíz	Ceres	70 000	14.0	
	2	458/29	P5	Maíz	Asgrow	75 000	13.0	
	3	132/421	P5	Maíz	Asgrow	80 000	15.0	
	4	41/28	P5	Maíz	Correa	60 000	8.0	
DE6	1	488/119	P6	Maíz	Asgrow	95 000	10.0	
	2	421/254	P6	Maíz	Asgrow	110 000	14.0	
	3	462/374	P6	Vna				
	4	62/19	P6	<u>Maíz</u>	<u>Ceres</u>	<u>105 000</u>	<u>13.0</u>	
				75%	41.6%	78 700	11.8	

$\bar{x} \pm \sigma$ = Valor medio de NDVI con desviación estándar de las clases. C = Columna. R = Renglón. Vna = Vegetación natural arbustiva.

Parcelas piloto: P1 = Maíz Ceres 95 000 plantas ha⁻¹ (14.8 t ha⁻¹); P2 = Maíz Asgrow 51 000 plantas ha⁻¹ (14.3 t ha⁻¹); P3 = Maíz Ceres 70 000 plantas ha⁻¹ (7.6 t ha⁻¹); P4 = Maíz Asgrow 62 000 plantas ha⁻¹ (12.9 t ha⁻¹); P5 = Maíz Asgrow 71 700 plantas ha⁻¹ (15.4 t ha⁻¹); P6 = Maíz Asgrow 114 000 plantas ha⁻¹ (18.1 t ha⁻¹); Promedio 77 283 plantas ha⁻¹ (13.8 t ha⁻¹).

Como se indica en el Cuadro 6, el promedio general, producto de los valores medios de cada clase, es el siguiente:

1. A nivel de tipo de cobertura, en las zonas predichas con maíz en todos los píxeles muestreados al verificar en campo, la predicción fue efectiva en 75%.
2. La predicción a nivel de genotipo (Asgrow o Ceres) mostró una efectividad de 41.6%.
3. Al comparar el promedio de las seis parcelas piloto cuyo valor fue de 77 283 plantas ha⁻¹ contra el valor de 78 700 plantas ha⁻¹, obtenido al realizar la verificación en campo, la predicción reportó una subestimación de 1.9% con respecto a la densidad de población media.
4. Con lo referente al rendimiento de grano, la predicción registró una sobrestimación de 9.4% (13.8 t ha⁻¹) con respecto al valor obtenido en campo (11.8 t ha⁻¹).

Anticipación de las Predicciones

Se determinó el nivel de probabilidad de la primera fecha de anticipación, lo cual coincide con la etapa de floración del maíz (escena del 3 de agosto) para la predicción de sitios de ocurrencia de maíz. El análisis discriminante se realizó a partir de la información obtenida en campo del Cuadro 6. A los píxeles que resultaron ser maíz en la verificación de campo, se les asignó el número 1 y a los que no correspondían a maíz, el número 2. Los NDVI analizados corresponden a los píxeles muestreados de las escenas del 3 de agosto y del 27 de septiembre.

En el Cuadro 7 se muestran los resultados del análisis discriminante. Así, de 24 píxeles que conforman el tamaño de la muestra, 18 píxeles corresponden a coberturas de maíz y seis píxeles a no-maíz.

Con la clasificación preestablecida de 18 píxeles correspondientes a coberturas de maíz, para la primera

Cuadro 7. Clasificación de resultados del análisis discriminante para la anticipación de la predicción de coberturas de maíz por NDVI.

Fecha de anticipación	1a y 2a fecha		1a fecha	
3 de agosto	----->		----->	
27 de septiembre	----->		----->	
De 24 píxeles:				
18 = 1 (maíz)	11	61.1%	11	61.1%
6 = 2 (no-maíz)	5	83.3%	4	66.6%
Correlación canónica		0.49		0.31

Cuadro 8. Clasificación de resultados del análisis discriminante para la primera fecha de anticipación.

Grupo actual	Grupo predicho		Total			
	Grupo 1	Grupo 2				
1 (maíz)	11	61.1%	7	38.8%	18	100%
2 (no-maíz)	2	33.3%	4	66.6%	6	100%
FD = 15.46 (NDVI ¹) - 10.72.						

FD = Función discriminante. ¹ NDVI del 3 de agosto
Correlación canónica = 31%.

fecha de anticipación, el análisis discriminante determinó que 11 de ellos coinciden con maíz, es decir, cumplen con la predicción en 61.1%. Por su parte, de seis píxeles correspondientes a no-maíz, cuatro de ellos cumplieron con la predicción (66.6%).

La clasificación de resultados para la primera fecha de anticipación (3 de agosto) y el modelo matemático que explica la función discriminante (FD), se indican en el Cuadro 8.

CONCLUSIONES

1. Como consecuencia de los valores de reflectancia de las bandas visibles e infrarroja, los Índices de Vegetación de maíz presentan variaciones que dependen de las características fisiológicas y morfológicas de las plantas, y del manejo de cada parcela, así como de la etapa fenológica de que se trate. Los máximos valores de NDVI se obtuvieron en la etapa de prefloración, en algunas parcelas, y en floración, en otras.

2. En la predicción realizada, al verificarla en campo, se obtuvo: a) con respecto al tipo de cobertura (maíz) la predicción realizada promedio de las seis parcelas fue efectiva en 75%; b) a nivel de genotipo (Asgrow o Ceres), se reportó una efectividad de 41.6%; c) en la densidad de población, la predicción subestimó en 1.9%, con respecto al valor real; y d) con lo referente al rendimiento de grano, la predicción registró una sobrestimación de 9.4% (13.8 t ha⁻¹), con respecto al valor obtenido en campo (11.8 t ha⁻¹).

3. El análisis discriminante indicó que es posible anticipar el tipo de cobertura (maíz) y, en consecuencia, su rendimiento por NDVI desde la primera fecha de anticipación (escena del 3 de agosto), con una probabilidad de 61.1%.

AGRADECIMIENTOS

A los agricultores cooperantes de las parcelas piloto de maíz, así como a los propietarios de las

parcelas involucradas en los pixeles donde se realizaron los muestreos. A todos ellos nuestro agradecimiento. Al CONACYT por financiar el proyecto de investigación, del cual este artículo forma parte.

LITERATURA CITADA

- Chuvieco, S.E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. 3a ed. revisada. Ediciones Rialp. Madrid.
- Cipra, J., N.E. Noguerapeña, M.C. Bryson y M.A. Lueking. 1980. Forage production estimates for irrigated meadows from Landsat data. *Agron. J.* 72: 793-796.
- Granados, R., T. Reyna y G. Gómez. 1996. La teledetección en el seguimiento de las superficies cultivadas de la Mesa del Centro de Guanajuato. pp. 27. *In: Resúmenes de la VII Reunión Nacional Selper*. Colima, México.
- Jackson, R.D. y A.R. Huete. 1991. Interpreting vegetation index. *Preventive Veterinary Medicine* 11: 185-200.
- National Academy of Sciences. 1977. Resource sensing from space: prospects for developing countries. Washington, DC, USA.
- Soria, R.J., C.A. Ortiz S., F. Islas G. y V. Volke H. 1998. Sensores remotos: Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales. Experiencias en México. Primera edición. Publicación Especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Taylor, S.L., W.R. Raun, J.B. Solie, G.V. Johnson, M.L. Stone y R.W. Whitney. 1998. Use of spectral radiance for correcting nitrogen deficiencies and estimating soil test variability in and established bermudagrass pasture. *J. Plant Nutr.* 24: 2287-2302.
- Teng, W.L. 1990. AVHRR monitoring of US crops during the 1988 drought. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56: 1143-1146
- Tucker, C.J., J.R. Townshend y T.E. Goff. 1985. African land-cover classification using satellite data. *Science* 227: 369-375.
- Wiegand, C.L. y A.J. Richardson. 1984. Leaf area, light interception and yield estimates from spectral components analysis. *Agron. J.* 76: 543-548.

SUELOS ARCILLOSOS DE LA ZONA ORIENTE DEL ESTADO DE MEXICO

Clay Soils of the Eastern Zone of the State of Mexico

Miguel A. Segura Castruita¹, Ma. del Carmen Gutiérrez C.¹, Carlos A. Ortiz S.¹ y David J. Gómez D.²

RESUMEN

Los suelos arcillosos de la zona oriente del estado de México son denominados por los campesinos como "Tierras de Barro" y "Tierras Cacahuatudas"; las primeras comúnmente son productivas, y las segundas presentan problemas de manejo. Las investigaciones realizadas en el área de estudio no se han enfocado a explicar la variación de los suelos arcillosos ni a la solución de su problemática. Los objetivos del presente estudio fueron establecer la génesis de los suelos arcillosos, determinar los factores que influyen en su productividad y conocer los cambios estructurales de éstos cuando están bajo diferentes sistemas de manejo. Se tomaron muestras de seis perfiles de suelos, tres en cada clase de tierra, en los municipios de Atenco, Chiconcuac y Texcoco, estado de México, y un sitio más, considerado el sitio de referencia (a una altitud mayor que la de los anteriores), en el ejido La Purificación, Texcoco. Se realizaron análisis químicos y físicos específicos para su clasificación, así como análisis micromorfológico, mineralógicos y disoluciones selectivas de Si, Fe y Al para determinar el tipo de material amorfo en el suelo. Las tierras cacahuatudas tienen un origen lacustre, altos contenidos de materiales amorfos silíceos, pH alcalinos, algunos son salinos y con sodio en los sitios de intercambio, drenaje deficiente, pueden o no presentar costras y han sido incorporadas a la agricultura recientemente (10 años), factores que afectan su productividad. Las tierras de barro son de origen aluvial con aluviones activos e intermitentes, pH neutros a ligeramente ácidos, calcio en los sitios de intercambio, con buen drenaje y con 70 años de manejo. El riego, la aplicación de materia orgánica y el tiempo de incorporación a la agricultura han

influido en la estructura del suelo; es decir, de costras y bloques angulares a subangulares en las tierras cacahuatudas y de bloques subangulares a granulares en las tierras de barro.

Palabras clave: Arcilla, lacustre, aluvial y génesis.

SUMMARY

Local peasants call the clay soils of eastern State of Mexico "tierras de barro" and "tierras cacahuatudas". The former are commonly productive, but the latter have problems of management. Studies carried out in the area have not focused on explaining the variation found in the clay soils nor on the solution of the problems. The objectives of this study were to establish the genesis of the clay soils, determine factors that affect their productivity and identify structural changes when they are subject to different management systems. Samples of six soil profiles, three in each land class, were taken from Atenco, Chiconcuac and Texcoco, state of Mexico. Another site was sampled as a reference (at a higher altitude) in La Purificación, Texcoco. Specific chemical and physical analyses, as well as micromorphological and mineralogical analyses, were conducted to classify the profiles. Also, selective dilutions of Si, Fe and Al were done to determine the type of amorphous material existing in those soils. The "cacahuatuda" lands are of lake-bottom origin, have a high content of siliceous amorphous material, and are alkaline; some are saline with sodium at exchange sites. They have poor drainage and may or may not have crust. They have recently (10 years) been turned into farmland. The "tierras de barro" (mudlands) are alluvial with active and intermittent silt, neutral to slightly acid pH, calcium at exchange sites and well-drained. They have been cultivated for 70 years. Irrigation, application, and time as farmland have influenced soil structure: from crusty, angular blocky peds to subangular blocky peds, and from subangular blocky peds to granules.

Index words: Clay, lacustrine, alluvial, genesis.

¹ Especialidad de Edafología, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México.

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

Recibido: Agosto de 1999.

Aceptado: Abril de 2000.

INTRODUCCION

Tierras de barro y tierras cacahuatudas son términos que los campesinos utilizan para identificar a los suelos arcillosos de la zona oriente del estado de México (Luna, 1982).

Las tierras de barro se ubican a las orillas del ex lago de Texcoco, forman grietas y presentan agregados de consistencia firme, son pegajosas y chiclosas (Luna, 1982). Estos suelos son apreciados por los campesinos por su alta productividad cuando están bajo riego, alcanzando rendimientos de maíz en grano de aproximadamente $6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Gutiérrez, 1997).

Las tierras cacahuatudas se encuentran en la parte central del ex lago de Texcoco, cuando secas forman agregados con una consistencia dura, se agrietan y no guardan humedad; en campo se reconocen por el ruido que se produce al caminar sobre los agregados secos, el cual se asemeja al crujir de cacahuates (Luna, 1980, 1982). La presencia de agregados fuertemente desarrollados, fuerte resistencia a la destrucción, además de la formación de costras gruesas que evitan la emergencia de las plántulas, son problemas que influyen para que estos suelos sean abandonados por los productores debido al trabajo que implica labrarlos y a la baja productividad que tienen como resultado de la pobre germinación (Gutiérrez y Ortiz-Solorio, 1999).

Se han realizado estudios en el ex lago de Texcoco (Luna, 1980, 1982; López, 1991; Zelaya, 1992; Licona *et al.*, 1993; Nieves, 1995); sin embargo, no proporcionan información sobre los factores que influyeron en la génesis de los suelos arcillosos y, sobre todo, aquéllos que determinan que las tierras cacahuatudas presenten características poco favorables para la producción, problema que resulta relevante debido a la extensión que ocupan (580 ha).

Gutiérrez y Ortiz-Solorio (1999) reportan que las tierras cacahuatudas son de origen lacustre y las de barro de origen aluvial; aunque no mencionan las razones por las cuales se comportan de diferente manera a pesar de que ambas clases de tierras están compuestas por sedimentos finos. Por otro lado, Gutiérrez y Ortiz-Solorio (1992) establecen que los agregados en tierras cacahuatudas están cementados por arcillas esmectíticas y sílice amorfa. Además, Gutiérrez (1997) plantea hipotéticamente que el origen del material amorfo está directamente relacionado con la influencia lacustre.

Los suelos de textura fina fueron desalinizados por el hombre, a través de aplicaciones de materia orgánica combinada con riego y drenaje a cielo abierto (Rodríguez, 1990). Aparentemente, han tenido el mismo proceso de recuperación. Sin embargo, no se conoce con precisión si estas prácticas de manejo han influido en la estructura o en otras propiedades del suelo.

El objetivo de este trabajo fue establecer la génesis de los suelos arcillosos, determinar los factores que influyen en su productividad y conocer los cambios estructurales de estos suelos cuando se encuentran bajo diferentes sistemas de manejo.

MATERIALES Y METODOS

El área de estudio se ubica en los municipios de Chiconcuac, Atenco y Texcoco, en la zona oriente del estado de México, entre los paralelos $19^{\circ}29'$ y $19^{\circ}32'$ norte y los meridianos $98^{\circ}49'$ y $98^{\circ}55'$ oeste; a una altitud promedio de 2289 m (Figura 1).

Las formaciones que limitan a la cuenca de México están constituidas por rocas ígneas extrusivas compuestas por tobas, brechas, andesitas, basaltos y riolitas, correspondientes a depósitos del Cuaternario (Mooser, 1961; 1963). La región se considera como una planicie que se formó de sedimentos producto de la alteración de las rocas ígneas presentes en las partes más altas (Del Valle, 1983). La vegetación de la zona está compuesta por pirúl (*Schinus mollis* L.), jarilla (*Jarilla heterophylla* R.), pasto estrella (*Eragrostis obtusiflora* L.), pasto salado (*Distichlis spicata* L.), romerito (*Suaeda nigra* L.), eucalipto (*Eucalyptus* spp.), sauces (*Salix* spp.), carrizo (*Arundo donax* L.) y ahuehuete (*Taxodium macronatum* L.) (Rzedouski *et al.*, 1985). Los suelos son Entisols (tierras cacahuatudas) y Vertisols o Entisols (tierras de barro) (Gutiérrez, 1997), con un régimen de humedad ústico y un régimen de temperatura isotérmico (Van Wambeke, 1987); tienen un uso agrícola; los cultivos que se siembran son maíz y alfalfa, el primero es el de mayor importancia. También existen áreas destinadas a actividades pecuarias, principalmente al pastoreo de vacas y borregos (Luna, 1982).

Trabajo de Campo

Los sitios de muestreo se seleccionaron a partir de seis suelos representativos, tomando como base a

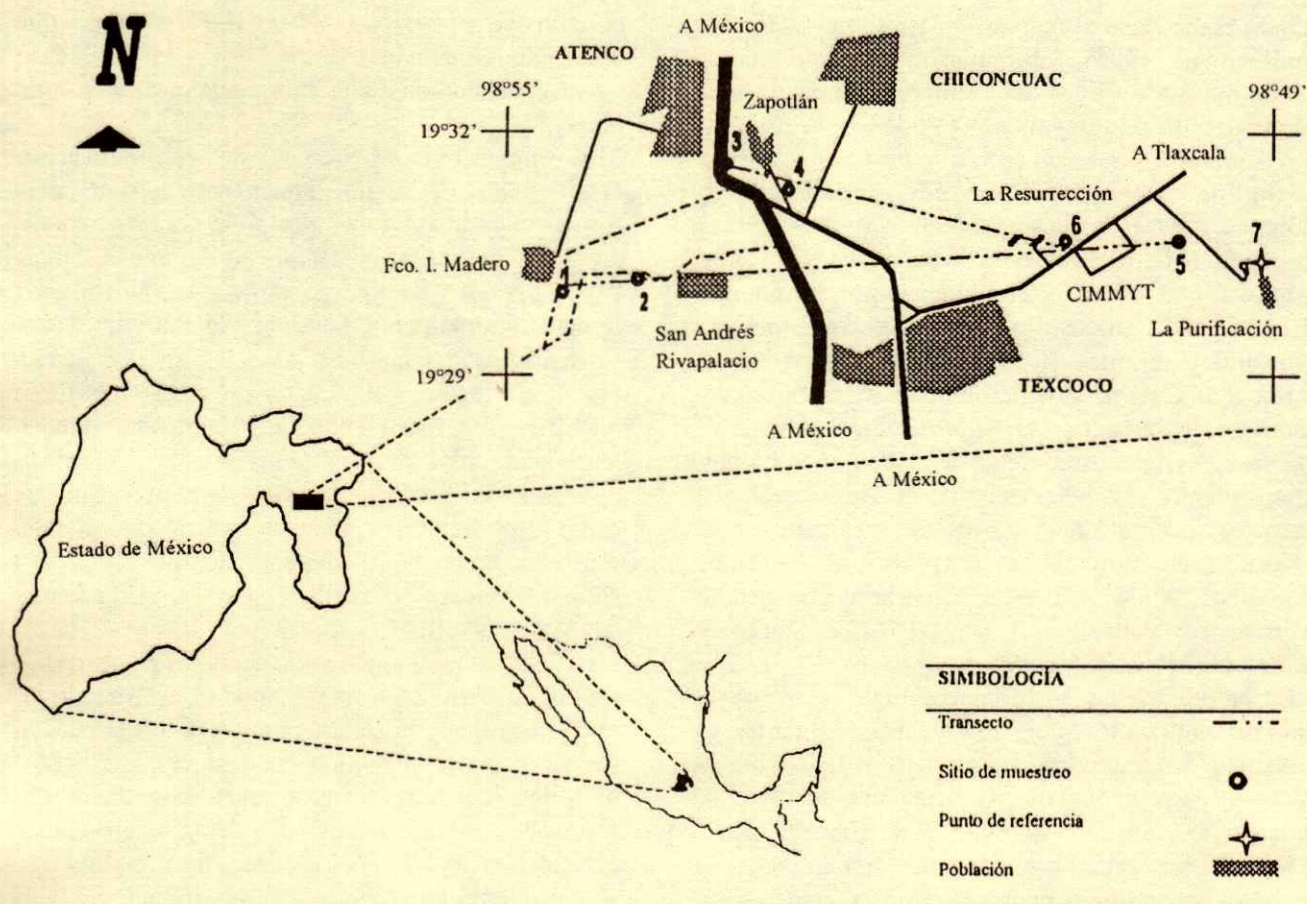


Figura 1. Localización del área de estudio.

los mapas de clases de tierras elaborados por Pájaro y Ortiz (1987) y Licona *et al.* (1993), en el oriente del estado de México. Se tomaron muestras de dos suelos en las orillas y cuatro hacia el centro del ex lago de Texcoco, con el fin de determinar la naturaleza aluvial o lacustre de los sedimentos arcillosos. Además, se tomó una muestra de otro suelo localizado en la zona de lomeríos del poblado de La Purificación, Texcoco. Este sitio se escogió por estar a 25 km del centro del ex lago y con mayor elevación que los otros sitios (2392 m en comparación con 2230 m del sitio más bajo estudiado) y, por lo tanto, sin ninguna influencia lacustre.

La descripción del paisaje y del perfil se realizó de acuerdo con Cuanalo (1990), se registraron características morfológicas como formación y tamaño de costras y agregados. En cada uno de los horizontes del suelo se colectaron muestras alteradas de suelo (2 kg), para el análisis de laboratorio y muestras inalteradas de suelo (dos por cada horizonte) utilizando cajas de latón de 10 x 4 x 4 cm, para el análisis micro-morfológico.

Se entrevistó a los productores de cada sitio de muestreo y se hizo énfasis en el tiempo de incorporación a la agricultura que tienen estos suelos y al tipo de cultivos a los que han estado sometidos; más aún, si aplican materia orgánica o no (y su frecuencia), así como si son de riego o de temporal. Después de la entrevista, nuevamente se colectaron muestras alteradas e inalteradas sólo en la capa superficial de las tierras de barro y cacahuatudas, con el fin de conocer los cambios estructurales y los rasgos pedológicos relacionados con una agricultura de temporal, de riego y con o sin la aplicación de estiércol vacuno.

Trabajo de Laboratorio

Las muestras alteradas se secaron a temperatura ambiente y se sometieron a determinaciones físicas (densidad aparente y análisis textural) y químicas [pH, carbono orgánico (CO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), cationes intercambiables y solubles, carbonatos totales, conductividad eléctrica y P_2O_5],

tomando como base al manual que propone el ISRIC (Van Reeuwijk, 1995). A las muestras colectadas en el segundo muestreo, se les determinaron el tamaño y la estabilidad de agregados (Yoder, 1936), y extracciones selectivas de Si, Al y Fe en una misma muestra de suelo; primero, con oxalato ácido (Blakmore, 1983) y después con ditionito citrato bicarbonato (Mehra y Jackson, 1960) y una extracción aparte, con NaOH 0.5 N a ebullición por 5 minutos. Los extractos se analizaron con el espectrofotómetro de absorción atómica. Las muestras inalteradas se secaron al aire y se impregnaron con resina poliéster y monómero de estireno, en una relación 7:3, y se fabricaron secciones delgadas de 6 x 7.5 cm, posteriormente. La descripción de las secciones delgadas y la abundancia de los microconstituyentes se basaron en Bullock *et al.* (1985). Los rasgos pedológicos hidromórficos se registraron con detalle con base en Veneman *et al.* (1976) y Stoops y Eswaran (1985).

La naturaleza del material parental, así como la arcilla presente en los suelos, se determinaron a través del análisis mineralógico de la fracción fina, para lo cual se utilizó un aparato de difracción de rayos X Shimadzu 5X y un tubo de rayos X de cobre ($\text{CuK}\alpha$). La fracción se sometió a diferentes tratamientos de saturación con cationes magnesio (Mg) y potasio (K), y con acetilglicol. Los minerales arcillosos se identificaron con los índices de Fink.

RESULTADOS Y DISCUSION

Génesis de los Suelos Arcillosos

Características generales. Las tierras de barro están integradas por suelos que muestran colores oscuros (chromas de 4 a 3 en seco y de 3 a 2 en húmedo), texturas finas (arcillosas, arcillo-limosas y franco arcillosas), estructura granular en las capas superficiales, propiedades vérticas y grietas en la superficie; mientras que las tierras cacahuatudas presentan agregados de una consistencia muy dura, algunas desarrollan costras y tienen texturas predominantemente limosas. En general, estas diferencias morfológicas son características superficiales con las cuales los campesinos reconocen a las clases de tierras de barro y cacahuatudas. Gutiérrez (1997) señala que los suelos de ambas clases de tierras se caracterizan por presentar porcentajes de arcilla superiores a 30%; lo cual no concuerda con el alto porcentaje de partículas limosas (> 48) en las tierras cacahuatudas

(Cuadro 1). Gutiérrez y Ortiz (1999) explican que se presentan transiciones entre tierras; en este caso la tierra cacahuatuda tiene influencia de una tierra de lama.

Micromorfología, procesos de sedimentación y clasificación de suelos. Las tierras cacahuatudas se formaron en la zona más profunda del lago, donde las arcillas se depositaron lentamente en aguas tranquilas y por periodos de tiempo largos, lo que originó su orientación totalmente paralela a la superficie, además se depositaron materiales amorfos silíceos y hierro. Por esta razón, el suelo presenta una fábrica birrefringente indiferenciada y punteada, donde los materiales amorfos enmascaran las propiedades ópticas de las arcillas. Los materiales arcillosos en las capas superficiales son un indicio de que el lago se secó abruptamente, lo cual ocurrió a principios de este siglo; todavía conservan sus características de depósito por el deficiente drenaje y, por lo tanto, se clasifican como Typic ustifluents. Por otra parte, las tierras de barro se formaron por el arrastre de aguas pluviales, donde la sedimentación de las partículas es rápida y no permite la orientación paralela, sino más bien desordenada, de las arcillas. Los suelos de los Sitios 5 y 6 todavía están sujetos a anegamientos estacionales, por lo cual los aluviones que los forman se consideran como activos e intermitentes y, aunque tienen un alto contenido de arcilla, exhiben macroscópicamente los diferentes depósitos, de ahí que se clasifiquen como Typic ustifluent o Mollic ustifluent, si los sedimentos contienen materia orgánica. El Sitio 4 es originado por un aluvión inactivo y estable, donde los procesos de expansión y contracción han provocado que los sedimentos arcillosos formen Vertisols; se clasifica como Typic haplustert.

Fracción fina y extracciones selectivas. En las tres tierras cacahuatudas y en la tierra de barro con aluvión estable (Sitio 4) se presentan esmectitas, metahalositas y kaolinitas (Cuadro 2). Estas arcillas son heredadas del material parental y reafirman el carácter depositario de estos suelos, ya que, a excepción de las esmectitas, el ambiente actual no corresponde al reportado para su formación. Según De Conink y Van Ranst (1992), las esmectitas se forman en ambientes confinados ricos en bases y drenaje pobre, condición que se presenta en el ex lago de Texcoco; las kaolinitas, que se forman en condiciones de humedad moderada y buen drenaje; y la metahalosita se desarrolla por la alteración de los feldespatos en materiales volcánicos. Los

Cuadro 1. Resultados de los análisis químicos de los sitios de muestreo.

CT	P	Hte	Prof.	Textura			MO	pH	Da	Cationes Intercambiables				CIC	CE	RAS	PSB	P ₂ O ₅
				A	L	R				Ca	Mg	Na	K					
			cm	%			%	1:1	g cm ⁻³	cmol kg ⁻¹				cmol kg ⁻¹	dS m ⁻¹	%		mg kg ⁻¹
C	1	Ap	0-11	11.2	64.46	24.39	0.21	8.1	1.33	16.3	4.8	25.4	6.1	50.1	1.78	6.74	100	202.1
		A	11-31	7.3	64.31	28.39	1.33	8.2	1.37	18.4	5.3	10.7	8.7	41.1	0.71	8.21	100	202.0
		C	31-66	20.9	59.51	19.59	0.07	8.7	1.33	8.5	3.4	10.1	2.8	23.3	0.89	6.63	100	164.5
		2C	>66	12.0	74.8	13.2	0.63	8.8	1.27	7.5	5.5	13.8	4.3	36.0	1.18	5.81	86.7	197.3
C	2	Ap	0-20	8.9	72.76	18.39	0.91	7.8	1.41	14.5	7.9	9.1	0.7	37.2	11.8	0.25	86.7	202.1
		A	20-44	10.4	69.66	19.99	1.61	8.0	1.34	10.0	6.0	6.1	1.9	24.9	11.8	0.25	96.7	173.9
		C	44-60	70.8	14.4	14.8	0.07	8.5	1.56	11.5	9.7	4.7	1.9	22.0	2.41	0.59	100	365.6
		2Ck	>60	73.0	17.0	10.0	0.21	8.7	1.55	4.7	6.7	2.8	3.2	22.1	1.78	0.72	100	295.5
C	3	Ap	0-21	38.61	48.2	13.19	0.98	8.1	1.49	26.5	3.0	0.5	1.3	26.5	0.71	0.10	100	370.3
		A	21-41	40.71	46.5	14.79	1.26	8.1	1.54	17.5	10.0	1.1	0.6	30.4	0.89	0.19	96.8	353.3
		Ck	41-59	60.85	25.16	13.99	0.03	8.5	1.33	16.0	3.2	2.5	0.9	21.8	0.77	0.26	100	324.1
		2Ck	>59	53.0	29.81	17.19	0.06	8.4	1.37	20.0	5.5	2.8	2.4	30.7	0.71	0.24	100	438.7
B	4	Ap	0-27	8.3	49.31	42.39	1.12	7.1	1.59	21.6	10.1	1.5	0.7	33.4	0.53	0.10	100	157.2
		A	27-51	11.1	40.91	47.99	2.17	7.3	1.59	22.5	12.5	1.4	0.7	41.1	0.41	0.23	90.6	123.2
		C	51-61	19.9	46.56	33.59	0.49	7.3	1.54	22.5	6.5	1.6	0.6	29.3	4.15	0.13	100	113.5
		2C	>61	27.9	45.5	26.7	0.50	7.8	1.47	17.0	8.9	2.1	0.4	29.7	0.53	0.60	95.8	132.9
B	5	Ap	0-10	15.4	53.81	30.79	1.54	6.3	1.42	15.0	8.3	0.9	1.4	26.7	1.18	0.52	96.4	141.7
		A	10-35	14.4	51.61	33.99	1.54	6.4	1.46	32.0	4.3	1.4	0.8	34.5	0.36	0.46	100	142.6
		C	35-61	12.2	48.66	39.19	1.68	6.6	1.55	21.7	9.5	1.5	0.6	33.0	0.47	0.88	100	108.7
		2C	>61	15.2	45.66	39.19	0.63	6.7	1.59	26.1	7.6	1.25	0.8	36.0	0.36	0.88	99.3	118.4
B	6	Ap	0-15	14.1	51.91	33.99	2.03	6.3	1.44	15.5	9.5	1.1	1.3	28.7	0.71	0.12	95.5	145.6
		C	15-28	16.5	47.91	35.59	1.61	6.4	1.44	22.5	4.5	0.6	1.1	28.9	0.47	0.12	98.9	140.9
		2C	28-43	23.5	40.91	35.59	1.12	6.4	1.53	24.5	2.5	0.9	0.7	30.2	0.36	0.11	94.5	126.5
		3C	>43	24.1	48.71	27.19	1.26	7.0	1.41	15.6	6.8	1.0	0.7	24.5	0.41	0.14	98.5	88.1
B	7	A	0-15	10.2	27.01	62.79	1.62	6.7	1.67	25.7	8.2	0.92	2.5	41.5	0.29	0.10	90.1	63.7

CT = Clase de tierra; B= Barro; C= Cacahuatuda; P= Perfil; Hte= Horizonte; Prof.= Profundidad; A= Arena; L= Limo; R= Arcilla; MO= Materia orgánica; Da= Densidad aparente; CIC= Capacidad de intercambio catiónico; CE= Conductividad eléctrica; RAS= Relación de adsorción de sodio; PSB= Saturación de bases.

aluviones activos intermitentes (Sitios 5 y 6) sólo presentan materiales amorfos y esmectitas, naturaleza mineralógica igual a la del Sitio 7, sólo que éste tiene mayor contenido de arcilla (62.7% en comparación con 31 y 34%, respectivamente). Rodríguez (1999) encontró que el intemperismo de las tobas volcánicas, localmente denominadas como tepetates, produce grandes cantidades de esmectitas, si el ambiente es seco, o bien kaolinitas y metahalosita, si es húmedo.

Cuadro 2. Tipo de arcillas silicatadas identificadas con tratamiento natural, ditionito citrato bicarbonato-oxalato ácido y saturaciones con potasio, en los suelos estudiados.

Clase de tierra	Perfil	Esmectita	Metahaloisita	Kaolinita	Materiales amorfos
Cacahuatuda	1	X	X	X	X
Cacahuatuda	2	X	X	X	X
Cacahuatuda	3	X	X	X	X
Barro	4	X	X	X	X
Barro	5	X			X
Barro	6	X			X
Barro	7	X			X

Esto significa que las arcillas transportadas y depositadas, en los primeros cuatro sitios (sedimentos relativamente más viejos), corresponden a materiales que se presentaban en condiciones más húmedas, probablemente cuando el bosque estaba más cercano al lago. El desnudamiento de la cobertura vegetal, la exposición y el secamiento de los materiales de las laderas están cristalizando a las arcillas (Rodríguez, 1999) y los sedimentos actuales sólo contienen esmectitas.

Las tierras de barro y cacahuatudas presentan óxidos de sílice, aluminio y hierro (Cuadro 3), en forma cristalina o amorfa, aunque la primera se encuentra en mayor concentración. Según Barberis *et al.* (1991), la cristalinidad de los óxidos de Fe en los sedimentos indica que son viejos, lo cual resulta contradictorio en los suelos estudiados pues se presentan minerales como el olivino, por lo que no se puede concluir con certeza que en todos los ambientes el grado de cristalinidad sea el reflejo de su madurez e incluso de su envejecimiento.

Cuadro 3. Disoluciones selectivas de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.

Clase de tierra		SiO ₂			Al ₂ O ₃			Fe ₂ O ₃		SiO ₂ ox /	SiO ₂ NaOH /
		ox	dbc	NaOH	ox	dbc	NaOH	ox	dbc	Al ₂ O ₃ ox	Al ₂ O ₃ NaOH
		%			%			%			
C	Perfil 1										
	Ap	0.08	1.04	1.02	0.11	0.408	0.273	0.05	10.31	1.21	6.31
	A	0.07	0.99	1.52	0.10	0.342	0.379	0.05	9.54	1.18	6.80
C	Perfil 2										
	Ap	0.10	0.87	1.69	0.17	0.41	0.468	0.06	12.52	1.00	6.53
	A	0.10	1.10	1.55	0.18	0.49	0.495	0.15	16.26	0.94	5.33
C	Perfil 3										
	Ap	0.04	0.863	1.44	0.04	0.152	0.504	0.01	2.62	1.69	4.83
	A	0.04	0.741	1.00	0.05	0.146	0.559	0.01	2.48	1.35	3.01
B	Perfil 4										
	Ap	0.05	0.717	1.14	0.07	0.217	0.494	0.03	7.26	1.69	3.90
	A	0.04	0.641	0.95	0.05	0.207	0.384	0.02	8.10	1.35	4.19
B	Perfil 5										
	Ap	0.04	0.685	1.17	0.04	0.166	0.494	0.02	6.42	1.69	4.11
	A	0.04	0.661	1.16	0.04	0.149	0.384	0.02	5.82	1.69	3.99
B	Perfil 6										
	Ap	0.04	0.72	1.14	0.04	0.18	0.561	0.02	6.69	1.69	3.43
	A	0.04	0.80	1.12	0.04	0.20	0.584	0.02	6.92	1.69	3.24

C= Cacahuatudas; B= Barro; ox= Oxalato ácido; dbc= Ditionito citrato bicarbonato; NaOH= Hidróxido de sodio.

La goethita solamente se detectó en las tierras cacahuatudas (Figura 2), y está ausente en las de barro. FitzPatrick (1984) señala que este mineral se forma por una cristalización lenta del óxido férrico dentro de la matriz del suelo, a partir de las aguas de infiltración que contienen compuestos de hierro disueltos, aunque también puede estar relacionada con la naturaleza mineralógica de los sedimentos al igual que ocurrió con las arcillas silicatadas.

Los materiales amorfos silíceos están presentes en las tierras de barro y en las cacahuatudas, la diferencia entre ambas es que en las últimas la sílice opalina es parte de la masa basal, mientras que en los barros forma pequeños revestimientos en poros canal y fisuras. De acuerdo con Gutiérrez (1997), la sílice no se originó *in situ* sino que fue transportada por escurrimientos superficiales de agua provenientes de las montañas que rodean a la cuenca. Dicho autor señala que una vez en el lago, las condiciones fuertemente alcalinas aumentaron la solubilidad de la sílice, de tal manera que su concentración se incrementó y se precipitó masivamente en los sedimentos lacustres. De esta forma, la sílice amorfa se encuentra distribuida homogéneamente en las tierras cacahuatudas, que tienen un origen lacustre; en cambio, en las tierras de barro, aunque hay material amorfo, éste se ha depositado por el agua circulante en el espacio poroso, por procesos pedogenéticos más que lacustres.

Después de analizar la relación SiO₂/Al₂O₃ con oxalato, en las tierras de barro y las cacahuatudas se obtuvo que los materiales amorfos son del tipo alofánico (Wada, 1989); es decir, con una relación 1:1. Cuando se hace la relación SiO₂/Al₂O₃ con NaOH 0.5 N, es superior a 2.0 (Cuadro 3), lo cual indica que el material que constituye a las fábricas indiferenciadas de las tierras cacahuatudas es de tipo opalino. Estos resultados pueden ser incongruentes: por un lado se tiene alófano y por otro ópalo. El mismo Wada (1989) señala que el ditionito citrato bicarbonato y el oxalato ácido son específicos para disolver el hierro y aluminio, pero no así para la sílice, por lo que los resultados obtenidos deben estar subestimándola. Por otro lado, el NaOH 0.5 N es específico para las extracciones de sílice y aluminio, pero no es tan bueno para el hierro, por lo tanto, no hay problema con la relación Si/Al, y se obtienen valores que indican la existencia de ópalo. Cabe señalar que el NaOH 0.5 N extrae tanto formas cristalinas como amorfas, las cuales se observaron en los difractogramas de rayos X; el ópalo se manifestó formando una banda ancha centrada a 0.41 nm y la cristobalita con reflexiones en 0.404 nm (Figura 2).

Factores que Influyen en la Productividad de las Tierras Arcillosas

Drenaje. Los rasgos hidromórficos presentes en el suelo pueden ser estudiados a través del grado de

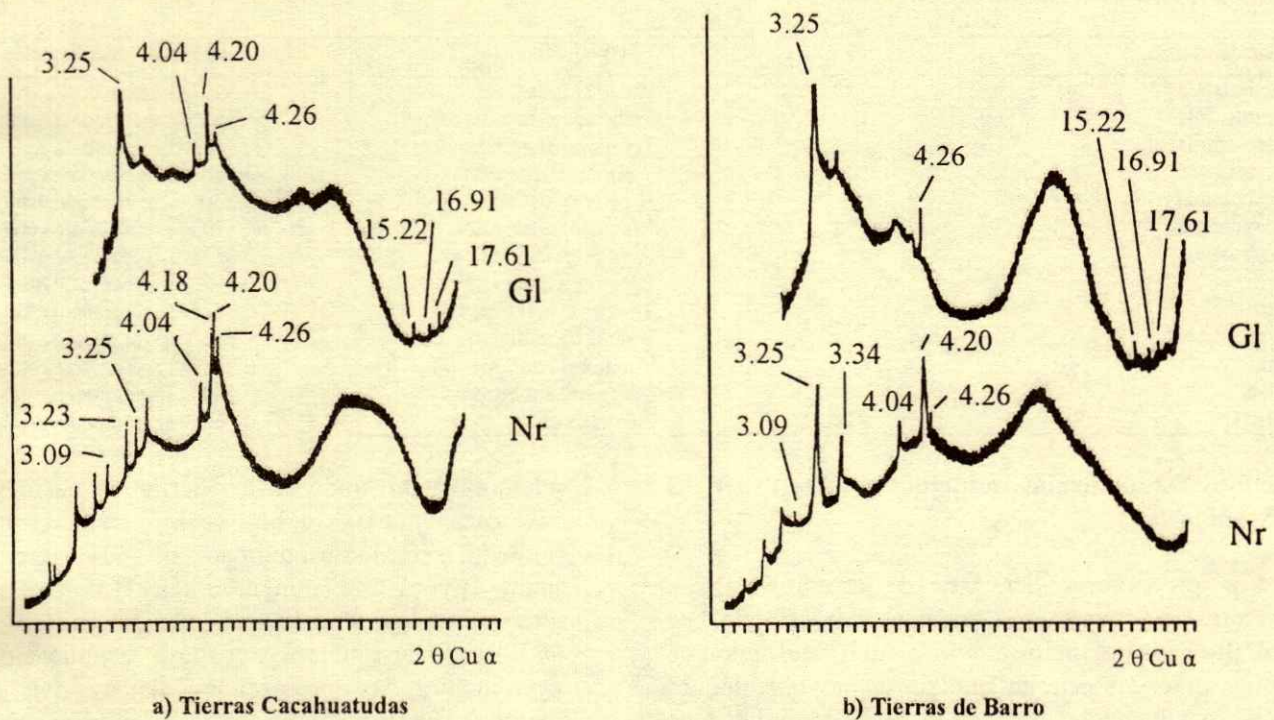


Figura 2. Difactogramas de rayos-X, en las tierras de barro y cacahuatudas. Abreviaturas: Gl, tratamiento de arcillas saturadas con K y con Acetil Glicol; Nr, tratamiento natural; 3.23 (augita); 4.04 (cristobalita); 3.25, 4.20 (feldespatos); 4.18 (goethita); 3.09 (hornblenda); 3.36, 4.26 (cuarzo); 15.22, 16.91, 17.61 (arcillas esmectíticas).

saturación de agua que exista. Las tierras cacahuatudas tienen un hidromorfismo moderado (saturación por una semana) y las tierras de barro, débil (saturación por un día) de acuerdo con las características morfológicas establecidas por Stoops y Eswaran (1985). El área de estudio es un lugar confinado que durante muchos años tuvo la presencia del lago de Texcoco que data del Terciario (Del Valle, 1983). Al considerar lo anterior, las tierras cacahuatudas tuvieron un contacto directo con las aguas del lago, predominando las condiciones de reducción; cuando los materiales fueron expuestos a la superficie, disminuyó su hidromorfismo a moderado, pero se mantiene la saturación en las capas inferiores, de ahí que preserven su depósito original y no haya contracción de las arcillas. En las tierras de barro, la saturación sólo se da en la temporada de lluvias y rápidamente el suelo es drenado, favorecido por movimientos descendentes y laterales debido a su posición altitudinal.

Salinidad y pH. La conductividad eléctrica (CE) presente en las tierras cacahuatudas es mayor que en los barros; y dentro de las primeras, sólo el suelo del

Sitio 2 se clasifica como salino. Lo anterior está relacionado con el drenaje deficiente que presenta este suelo, lo cual no permite la salida de una mayor cantidad de sales del perfil con el agua de riego aplicada, de tal manera que, en temporadas secas, las sales ascienden por capilaridad a la superficie. Por otra parte, las tierras de barro no son salinas y su pH es neutro a ligeramente ácido.

Materiales amorfos. La acumulación de materiales amorfos silíceos es mayor en las tierras cacahuatudas (6.31%) y disminuye conforme aumenta la altitud (3.24%, Sitio 7). Aparentemente, los amorfos silíceos tienden a aglutinar a las partículas, pero este fenómeno se reduce si existen óxidos cristalinos que tienen una acción enlazante menor (Barberis *et al.*, 1991). La masa basal de los agregados de las tierras cacahuatudas tiene materiales amorfos y cristalinos silíceos, como ya se explicó anteriormente, por lo que, cuando éstos se secan, existe una contracción de las partículas y confiere dureza a los agregados que los hace difíciles de manejar; sin embargo, la naturaleza de estos materiales no genera la estabilidad a los agregados.

Cuadro 4. Prácticas de manejo en el área de estudio.

Clase de tierra	Sitio	Tipo de manejo	Estabilidad de agregados
Cacahuatuda	1	Riego sin estiércol	0.3992- Inestable
Cacahuatuda	1	Temporal con estiércol	1.3510- Ligeramente estable
Cacahuatuda	1	Temporal sin estiércol	0.5606- Ligeramente estable
Cacahuatuda	2	Temporal sin estiércol	0.5259- Ligeramente estable
Cacahuatuda	2	Riego con estiércol	0.5304- Ligeramente estable
Cacahuatuda	3	Riego sin estiércol	0.6193- Ligeramente estable
Cacahuatuda	3	Riego con estiércol	0.8264- Ligeramente estable
Barro	4	Riego con estiércol	0.8972- Ligeramente estable
Barro	4	Temporal con estiércol	0.7198- Ligeramente estable
Barro	6	Riego con estiércol	1.0958- Ligeramente estable
Barro	6	Temporal con estiércol	0.9011- Ligeramente estable
Barro	5	Temporal sin estiércol	0.6407- Ligeramente estable
Barro	7	No cultivado	0.9106- Ligeramente estable

Cambios Estructurales Inducidos por las Prácticas de Manejo

Los productores del área de estudio realizan diferentes prácticas de manejo con el fin de hacer producir los suelos arcillosos. La utilización de algunas prácticas está en función de las condiciones del suelo, ubicación de las tierras, disponibilidad de agua y estiércol; así como de la situación económica de los campesinos.

La aplicación de riego con la incorporación de estiércol es la práctica de manejo que mejores

resultados ha mostrado en las tierras de barro y las tierras cacahuatudas, lo que se refleja en el ligero incremento en la estabilidad de los agregados (Cuadro 4) y en la disminución del pH de alcalino a neutro y hasta ligeramente ácido en el suelo.

El aporte de estiércol, aunado a la aplicación de riego, mejora las propiedades físicas del suelo (Figueroa, 1982); sin embargo, los resultados que se presentan en las dos clases de tierras son mínimos. El tiempo de recuperación o incorporación de estas tierras a la agricultura juega un papel importante en el efecto de este tipo de manejo; suelos con más de

Cuadro 5. Características generales de las tierras de barro y cacahuatudas.

Características	Cacahuatudas	Barro
Morfológicas	Costras	Presencia o ausencia de grietas
Arcillas	Estructura de bloques angulares a subangulares de consistencia dura Orientadas paralelamente < 30%	Estructura de bloques subangulares a granular, de consistencia firme o friable Orientadas aleatoriamente > 30%
Materiales amorfos	Mayor contenido	Menor contenido
% SiO ₂	> 0.10%	< 0.08%
Oxidos	Goethita Cristobalita	
Fábrica	Parte de la masa basal	Pedorasgo del suelo
Rasgos hidromorficos	> 60% de hiporevestimientos de Fe < 40% de nódulos de Mn	> 70% de nódulos e hiporevestimientos de Mn < 30% de hiporevestimientos de Fe
pH	Alcalino	Neutro a ligeramente ácido
Salinidad	Salino	No salino
Clasificación taxonómica	Orden: Entisols Subgrupo: Typic ustifluents	Orden: Entisols y Vertisols Subgrupos: Typic ustifluent Mollic ustifluent Typic haplustert
Altitud	< 2262 m	> 2268 m
Drenaje	Deficiente	Bueno
Riego	Con o sin riego	Con o sin riego
Fertilizante orgánico	1-2 t ha ⁻¹ a cada año	1 t ha ⁻¹ cada dos o tres años
Fertilizante inorgánico		250 kg de urea cada dos o tres años
Estabilidad de agregados	Inestables y ligeramente estables	Ligeramente estables

70 años de ser utilizados para la agricultura (tierras de barro) tienen agregados de forma granular y con un mayor desarrollo; mientras que suelos con menos de 30 años de incorporados a las actividades agrícolas, sus agregados son de bloques angulares a subangulares y en ocasiones presentan costras (tierras cacahuatudas).

La formación de costras no es una característica de todas las tierras cacahuatudas (Cuadro 5), ya que éstas sólo se generan cuando se presentan ciertos factores como: alto porcentaje de limos, manejo con riego para eliminar sales, bajo contenido de materia orgánica, sin aplicación de estiércol, y por la naturaleza de los sedimentos que originaron el suelo, y su reciente incorporación a la agricultura (10 años).

En estas condiciones, los agregados no son estables (Cuadro 4), lo que provoca la formación de costras del tipo estructural (Chen *et al.*, 1980; Miedema, 1997).

Cuando las tierras cacahuatudas tienen una influencia más directa de prácticas de manejo (riego con aplicación de estiércol) y más tiempo de incorporación (30 años) sólo se distinguen pequeños relictos de costras en la masa basal del suelo; además, se han mejorado las propiedades físicas del suelo con la generación de estructuras granulares y de bloques subangulares con una mayor estabilidad (Cuadro 4).

Las tierras de barro presentan altos contenidos de arcilla (> 30%) y porcentajes de materia orgánica superiores a los que ocurren en las tierras cacahuatudas (Cuadro 1) y no presentan formación de costras. Además, las propiedades físicas y biológicas de las tierras de barro influyen para que la estructura sea de bloques subangulares. De acuerdo con Pape y Lagger (1994), estos agregados se forman por procesos de expansión y contracción y por la acción de redondeo provocado por las lombrices y raíces de las plantas, influencia que también determina que la capa superficial sea granular.

CONCLUSIONES

Las tierras cacahuatudas tienen un origen lacustre, con arcillas esmectíticas, kaolinita y metahalosita, con orientación horizontal como resultado de su depósito lento. Su baja productividad está relacionada con drenaje deficiente, pH alcalino, sodio en los sitios de intercambio, poca materia orgánica, presencia o ausencia de costras y reciente incorporación a la agricultura (10 años).

Las tierras de barro son de origen aluvial con aluviones activos intermitentes y estables, con arcillas esmectíticas que se orientan aleatoriamente. Su productividad está relacionada con un drenaje eficiente, pH neutros a ligeramente ácidos, calcio en los sitios de intercambio y estructuras granulares y los 70 años que tienen con actividades agrícolas.

El riego, en combinación con la aplicación de materia orgánica y el tiempo de incorporación a la agricultura, es determinante en los cambios estructurales de los suelos arcillosos; es decir, de costras y bloques angulares a subangulares en las cacahuatudas y de bloques subangulares a granulares en las de barro.

LITERATURA CITADA

- Barberis, E., F.A. Marsh, V. Boero y E. Arduino. 1991. Aggregation of soil particles by iron oxides in various size fractions of soil B horizons. *Soil Sci.* 42: 535-542.
- Blakmore, L.C. 1983. Acid-oxalate extractable iron, aluminum and silicon. ICOMAND Circular letter 5, appendix 1. Int. Committee for the Classification of Andisols. New Zealand Soil Bureau, Lower Hutt, New Zealand.
- Bullock, P., N. Federoff, A. Jongerius, G. Stoops y T. Tursina. 1985. Handbook for soil thin section description. Waine Research Publications, England.
- Chen, Y., J. Tarschitzky, J. Brouwer, J. Morin y A. Banin. 1980. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Sci.* 130: 49-55.
- Cuanalo de la C., H.E. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 3a ed. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- De Coninck, F. y E. van Ranst. 1992. International training center for postgraduate soil scientists. University Ghent, Belgium.
- Del Valle C., H. 1983. Los procesos de acumulación de las sales e intemperismo en cubetas lacustres, en la transición del ex lago de Texcoco. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Figueroa P., J.M. 1982. El efecto de diferentes niveles de aplicación de estiércol en un suelo de la serie imperial bajo cultivo de trigo en el Valle de Mexicali; Baja California. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Suelos, Chapingo, México.
- FitzPatrick, A.E. 1984. Suelos, su formación, clasificación y distribución. Compañía Editorial Continental, México, DF.
- Gutiérrez C., Ma. del C. 1997. Los suelos de la ribera oriente del ex lago de Texcoco (Macro y micromorfología). Tesis de Doctorado. IRENAT, Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Gutiérrez C., Ma. del C. y C.A. Ortiz-Solorio. 1992. Caracterización de los suelos antropogénicos con problemas de labranza en el ex lago de Texcoco. *Agrociencia, Serie Agua-Suelo-Clima 3-2*: 29-47.
- Gutiérrez C., Ma. del C. y C.A. Ortiz-Solorio. 1999. Origen y evolución de los suelos del ex lago de Texcoco, México. *Agrociencia 33*: 199-208.

- Licona V., A., C.A. Ortiz S. y D. Pájaro H. 1993. El uso de la fotointerpretación en la cartografía de tierras campesinas. *Geografía Agrícola* 18: 84-93.
- López H., J.R. 1991. Definición de cualidades de las tierras en el ejido San Salvador Atenco. Tesis de Maestría. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Luna O., P. 1980. Clasificación campesina de los terrenos del ex lago de Texcoco y su relación con el levantamiento de suelos. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Luna O., P. 1982. Estudio comparativo sobre la clasificación campesina de suelos de dos comunidades del Valle de México. Tesis de Maestría. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Mehra, O.P. y M.L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soil and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium carbonate. *Clays Clay Miner.* 317-327.
- Miedema, R. 1997. Applications of micromorphology of relevance to agronomy. *Adv. Agron.* 59: 119-169.
- Mooser, F. 1961. Informe sobre la geología de la Cuenca del Valle de México. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.
- Mooser, F. 1963. La Cuenca Lacustre del Valle de México. Vol. 17-2: 47-56.
- Nieves F., J.L. 1995. Modelos de simulación para la estimación del rendimiento potencial del cultivo de maíz en el ejido Atenco, México. Tesis de Maestría. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Pájaro D., H. y C.A. Ortiz S. 1987. El levantamiento de suelos y su relación con la clasificación de tierras campesinas. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. (Mimeo).
- Pape, Th. y D. Lager. 1994. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science and Geology. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Rodríguez M., A. 1990. Caracterización de los métodos empíricos de recuperación de suelos salinos en San Salvador Atenco y San Francisco Acuexcomac. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Rodríguez T., S.A. 1999. Procesos de intemperismo en tepetates y su influencia en la formación de suelos. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Rzedouski, J. y L. Huerta. 1985. La vegetación de México. Limusa, México, DF.
- Soil Survey Staff. 1994. Claves para la Taxonomía de Suelos. Traducción del inglés por Carlos A. Ortiz S. y Ma. del C. Gutiérrez C. Publicación especial 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo, México.
- Stoops, G. y H. Eswaran. 1985. Micromorphology in wetland soils. Wetland soil, characterization, classification and utilization. International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna, Philippines.
- Van Reeuwijk, L.P. (ed). 1995. Procedures for soil analysis. Tech. Pap. 9. 4th ed. ISRIC, Wageningen, The Netherlands.
- Van Wambeke. 1987. Soil moisture and temperature regimen of Central America Caribbean, Mexico. SMSS Soil Cons. Serv. USDA. Technical Monograph 16. Cornell University.
- Veneman, P.L.M., M.J. Vepraskas y J. Bouma. 1976. The physical significance of soil mottling in a Emsconson toposequence. *Geoderma* 15: 103-118.
- Wada, K. 1989. Allophane and imogolite. pp.1051-1087. In: J.B. Dixon y S.B. Weed (eds.). Minerals and soil environments. 2nd ed. Soil Science Society of America, Book Ser. 1. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis and study of physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.* 28: 337-351.
- Zelaya M., C.R. 1992. Clasificación de tierras para la producción de maíz, en base al conocimiento del productor. Tesis de Maestría. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

ESTIMACION DE LAS NECESIDADES HIDRICAS DEL TOMATE

Estimation of Water Requirements of Tomato

Arnulfo González Meza¹ y Bertha A. Hernández Leos

RESUMEN

El uso consuntivo o evapotranspiración de los cultivos es un componente básico del ciclo hidrológico en las áreas tropicales donde el riego suplementario ha empezado a crecer. Uno de los aspectos clave en el fomento de la superficie hortícola en la zona henequenera es la aplicación del riego, ya que la mayor parte de los cultivos no pueden prosperar satisfactoriamente en condiciones de temporal. Consecuentemente, es un hecho el desconocimiento de la cantidad de agua que debe ser aplicada al cultivo para su mejor rendimiento, y de la respuesta fisiológica del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) a la aplicación de distintas láminas o volúmenes de agua. Una de las técnicas más simples y económicas para estimar la evapotranspiración de los cultivos es el método del tanque evaporímetro. La idea detrás del método es, medir la cantidad de agua evaporada desde un tanque evaporímetro y correlacionarla a la evapotranspiración de los cultivos. Los resultados de la aplicación de este método demostraron que afectar la cantidad de agua evaporada por un coeficiente equivalente a 0.80 generó los rendimientos más elevados de tomate y la mejor eficiencia en el uso del agua.

Palabras clave: Uso del agua, tanque evaporímetro.

SUMMARY

Crop water use, or evapotranspiration, is a basic component of the water cycle in tropical areas where supplementary irrigation has started to grow. One of the key aspects in encouraging vegetable cropping in the henequen region is irrigation since most of these crops cannot produce satisfactorily under rainfed conditions. It is a fact that the amount of irrigation water needed to obtain high yields and the physiological response of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) to different

¹ Campo Experimental Valle de Culiacán, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Apartado Postal 356, 80000 Culiacán, Sinaloa, México.

Recibido: Marzo de 1997.
Aceptado: Abril de 2000.

lamina of water are unknown. One of the simplest and cheapest techniques for estimating crop evapotranspiration is the pan evaporation method. The idea behind this method is to measure the amount of water that evaporates from a standard pan and correlate it to crop evapotranspiration. When this method was applied, the results showed that affecting the amount of water evaporated by a coefficient equivalent to 0.80 produced the highest yield of tomato and the most efficient use of water.

Index words: Water use, pan evaporation.

INTRODUCCION

El uso consuntivo o evapotranspiración de los cultivos es un componente básico del ciclo hidrológico, particularmente importante en regiones áridas o semiáridas del mundo y en las áreas tropicales donde el riego suplementario ha empezado a crecer.

Internacionalmente, el término evapotranspiración es más común que el de uso consuntivo, pese a que ambos significan casi lo mismo. De hecho, el uso consuntivo incluye el agua que es retenida en los tejidos de las plantas a diferencia del concepto de evapotranspiración. Información sobre el uso consuntivo es esencial en la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos como en el caso del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.).

El Tomate y sus Necesidades Hídricas en Yucatán

El cultivo del tomate en el noroeste de Yucatán, región conocida como zona henequenera, ocupa el lugar más importante entre las hortalizas sembradas pese a problemas persistentes de virosis aparecidos en los últimos años. La producción de tomate se destina a abastecer principalmente el mercado local y regional durante gran parte del año, y aún otras partes del centro de México.

Por lo anterior, el tomate resulta un cultivo remunerativo y constituye una fuente de trabajo segura a lo largo del año, principalmente por la mano de obra

requerida para el control de maleza, la aplicación del riego y la cosecha.

Uno de los aspectos clave en el fomento de la superficie hortícola en la zona henequenera es la aplicación del riego, ya que la mayor parte de los cultivos no pueden prosperar satisfactoriamente en condiciones de temporal. Ahora bien, aunque la extracción de agua del subsuelo para la irrigación de este cultivo requiere hacerse con un criterio definido que considere la cantidad precisa de agua a ser aplicada, para evitar volúmenes innecesarios que reducen la vida útil de las motobombas, que encarecen los costos de cultivo, y que facilitan la percolación de residuos de pesticidas y materia orgánica hacia el acuífero, con la consiguiente contaminación.

El sistema de riego por manguera (a chorro) es el que se utiliza en más de 95 % de la superficie total de riego. Además, en tomate se desconoce la cantidad de agua que debe ser aplicada al cultivo para su mejor rendimiento, así como la respuesta fisiológica del cultivo a la aplicación de distintas láminas o volúmenes de agua.

Considerando la superficialidad y escasez del suelo de la región, y los peligros potenciales del riego excesivo, el objetivo del presente trabajo fue determinar la cantidad de agua con que debe ser irrigado el cultivo de tomate, con base en criterios técnicos.

Riego en tomate. La aplicación del riego en el cultivo de tomate debe ser cuidadosa, ya que tanto la sequía como el exceso de agua repercuten en la calidad y producción del fruto. Se ha encontrado una correlación estrecha entre sequías intensas y rajaduras en el fruto. El exceso de agua se asocia con la presencia de enfermedades radicales de la planta y, por consecuencia, con bajos rendimientos (Manjarrez, 1980).

Según este autor, el tomate presenta tres periodos críticos de necesidad hídrica: emergencia de plántulas, floración, y cuando los frutos han alcanzado una quinta parte de su crecimiento, aunque otro criterio indica que los tres periodos importantes con relación al riego abarcan: desde el trasplante al inicio de formación del fruto, desde la formación del fruto hasta el primer corte, y el periodo de cosecha que requiere el mayor número de riegos. El exceso de agua, especialmente en los suelos fértiles, causa también un crecimiento considerable de las ramas y baja productividad; por el contrario, si el suelo se seca excesivamente, puede ser la causa de que los frutos se reventen (Richardson y Brauer, s/f).

El éxito o fracaso de un sistema de cultivos en particular puede muy bien depender del programa de manejo del agua seguido. El agua debe estar disponible en el suelo para reponer las pérdidas por evaporación del suelo y por

transpiración de los cultivos, aunque es difícil determinar el contenido óptimo de humedad, y más difícil aún es mantener este contenido de humedad específico durante cierto periodo de tiempo (Thorne, 1979).

Para determinar el déficit de agua en el suelo a reponer con el riego y la frecuencia con que ello debe hacerse, se requiere conocer las necesidades de agua de los cultivos. Esto ayudará a mantener su rendimiento, acorde con los beneficios que se esperan del regadío (Grassi, 1987).

Las necesidades de agua de los cultivos y la utilización del agua dependen de la integración de factores climáticos, botánicos y edáficos. Los dos primeros determinan la demanda de agua, mientras que la interacción de los dos últimos establece la oferta de agua porque afectan la retención y movimiento de agua en las raíces (Norero, 1984).

Método del tanque evaporímetro. Esta técnica es bien conocida en el mundo dado que es el método más simple y barato para estimar la evapotranspiración (Amayreh, 1995). La cantidad de agua evaporada desde un tanque evaporímetro puede correlacionarse con la evapotranspiración (Allen *et al.*, 1998), y los tanques evaporímetros son una parte integral en la mayoría de las estaciones climatológicas agrícolas.

La evapotranspiración de referencia del pasto (E_{to}) puede ser estimada utilizando la Ecuación 1:

$$E_{to} = K_p E_p$$

Donde E_p es la evaporación del tanque evaporímetro en las unidades deseadas, por ejemplo mm d^{-1} ; K_p es el coeficiente del tanque evaporímetro, adimensional; y E_{to} es la evaporación del cultivo de referencia (pasto) en las mismas unidades que E_p (Doorenbos y Kassam, 1986).

Aunque el tanque evaporímetro integra muchos de los factores (viento, radiación solar, humedad, etc.) incluidos en la evapotranspiración, la evaporación de dicho tanque es inanimada y no refleja las características de almacenamiento de calor de un cultivo (Palacios, 1981; Arteaga y Elizondo, 1986). Por tanto, debe tenerse cuidado al interpretar información del tanque evaporímetro, si se desea obtener estimaciones confiables de evapotranspiración. El valor del coeficiente K_p en Ecuación 1 es función de la clase de tanque evaporímetro utilizado y del ambiente que lo rodea (Allen *et al.*, 1998). Los tanques evaporímetros varían en tamaño y forma. El tanque evaporímetro clase A es el más popular en los Estados Unidos y en muchos otros países, tiene un diámetro de 121 cm, y 25.5 cm de profundidad. El tanque

es usualmente construido de acero galvanizado, y debe ser colocado en una plataforma de madera nivelada. La parte baja del tanque debe situarse 15 cm encima de la superficie. El nivel del agua debe ser mantenido entre 5 y 7.5 cm por debajo del borde superior del tanque. El agua evaporada debe ser reemplazada cuidadosamente, en forma manual o por un sistema de flotador y un tanque de abastecimiento. Los cambios en el nivel del agua son medidos usando un tornillo vernier colocado en un recipiente especial (Jensen, 1969).

El tamaño del tanque evaporímetro puede afectar K_p significativamente en climas áridos, donde los tanques son rodeados por varios metros o más de superficies secas; dicho tamaño es menos importante en climas húmedos, donde los dispositivos son montados dentro de campos cultivados de gran tamaño, tales como pasturas irrigadas. Es significativo el hecho de que los valores más bajos de K_p han sido observados en climas secos y con viento comparados con climas húmedos y con velocidades de viento bajas. En la región tropical se determinó que un K_p de 0.75 para estimar las necesidades de riego fue bastante aceptable (Norero, 1984).

Para el tomate en la zona henequenera, se probaron los coeficientes 0.6, 0.8, 1.0 y 1.2 con el riego por micromangueras y se encontró que el rendimiento de tomate comercial y total se elevó con los valores de 1.0 y 1.2, aunque el de 0.6 fue el más eficiente en el uso del agua (González, 1987).

MATERIALES Y METODOS

La investigación se desarrolló en un lote de suelo pedregoso (Litosol) de cinco años de uso consecutivo en las instalaciones del Campo Experimental de la Zona Henequenera (CEZOHE), ubicado en Mocochoá, Yucatán. El lugar se ubica en el municipio de Mocochoá, al noroeste de la ciudad de Mérida, Yucatán, y sus coordenadas geográficas son 21°07' latitud norte y 89°19' longitud oeste, con una altitud de 6 m. El clima del lugar es del tipo caliente subhúmedo; la Figura 1 muestra las variaciones de la temperatura del aire, precipitación y evaporación durante el año.

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con seis repeticiones. Se probaron cinco tratamientos, que consistieron en la aplicación de diferentes volúmenes de agua (láminas de agua), calculados a partir de los registros diarios de evaporación en un tanque evaporímetro tipo A y afectados por diferentes coeficientes K_p (Ecuación 1) mostrados en el Cuadro 1. Para la determinación de la evapotranspiración del tomate se usaron coeficientes K_c por etapa de cultivo, siguiendo las recomendaciones de Jensen *et al.* (1990). Los riegos se hicieron con el sistema de riego por mangueras, uniendo tramos de manguera de 37 mm de diámetro, dos veces por semana. El agua se depositó libremente en el suelo en la parte central de la parcela experimental, y se evitó el traslape de tratamientos por escurrimiento. Inicialmente se aforó para determinar el tiempo de riego por parcela después de haber

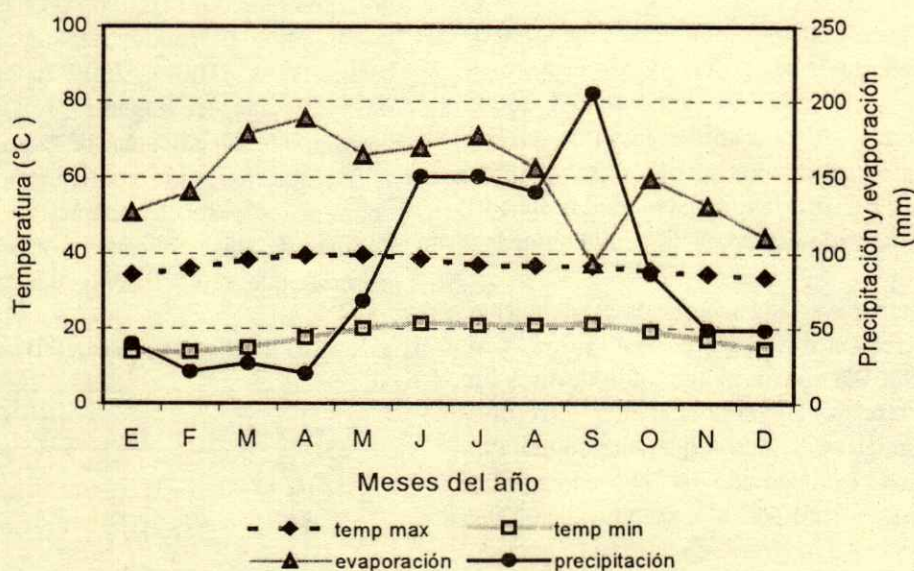


Figura 1. Variación climática en la zona henequenera de Yucatán.

Cuadro 1. Tratamientos de riego aplicados al tomate.

Tratamiento	Coefficiente
A	0.6
B	0.8
C	1.0
D	1.2
E [†]	0.6, 0.8, 1.2, y 1.0

[†] Coeficientes aplicados respectivamente en las siguientes etapas: postestablecimiento, desarrollo rápido, cobertura completa y cosecha.

establecido el volumen de agua necesario en cada tratamiento. La parcela experimental constó de dos hileras dobles de tomate de 6 m de longitud, separadas 2 m que ocuparon 24 m². Como parcela útil se usaron los dos surcos centrales, eliminando 0.75 m a cada uno de los extremos como efecto de orilla. El cultivo se manejó de acuerdo con las recomendaciones fitosanitarias y de aplicación de fertilizantes del Campo Experimental Zona Henequenera. (CEZOHE, 1997).

Durante el desarrollo de este trabajo se evaluaron las siguientes variables: rendimiento de cultivo (total, comercial y rezaga), el contenido relativo de agua, y el contenido de humedad del suelo medidos gravimétricamente. El contenido relativo de agua se realizó de acuerdo con la metodología propuesta por Smart y Bingham (1973), y el contenido de humedad en el suelo tal y como lo describen Hargreaves y Merkle (1998).

RESULTADOS Y DISCUSION

Rendimiento

El Cuadro 2 presenta los rendimientos de tomate obtenidos en las diferentes categorías, donde destacó el coeficiente 0.8 en las variables rendimiento total, comercial y de tercera "A". La clasificación de tercera categoría o rezaga se subdividió en dos clases o tipos (A y B), para separar el fruto de mala calidad o dañado por plaga (A), y el podrido por contacto con la humedad del suelo (B).

Los rendimientos que se alcanzaron con el coeficiente 0.8 significaron incrementos respectivos de 40 y 33 % con relación al coeficiente 0.6 que fue el más improductivo. En el rendimiento de tercera "B", el coeficiente 1.2 resultó estadísticamente superior, debido a que correspondía al tratamiento con mayor cantidad de agua aplicada y con las mayores cantidades de fruto podrido. Este problema fue de consideración, ya que la proporción de fruto podrido por humedad con relación al rendimiento total osciló entre 8 % para el tratamiento 0.8, y 17 % para el 1.2, lo cual equivale a una pérdida de 108 a 200 cajas por hectárea.

Cuadro 2. Rendimiento (t ha⁻¹) de tomate bajo diferentes tratamientos de riego.

Coeficiente	Categoría			
	Total	Comercial [†]	Tercera A [‡]	Tercera B [§]
0.6	25.5 b	16.0 b	6.8 b	2.7 bcd
0.8	35.8 a	23.9 a	9.8 a	2.7 bcd
1.0	29.2 b	18.0 b	7.5 b	3.7 abc
1.2	28.6 b	16.8 b	6.8 b	5.0 a
0.6-0.8-1.2-1.0	29.7 b	17.5 b	7.8 b	4.4 ab
CV (%)	19	21	18	50
DMS (0.05)	5.72	3.96	1.47	1.53

[†] Tomate con características para ser aceptado en el mercado.

[‡] Tomate no comercializable, de mala calidad y dañado por plaga o enfermedad.

[§] Tomate no comercializable, de mala calidad y dañado por el contacto con la humedad en el suelo.

Medias en columnas con igual letra no difieren estadísticamente.

Rendimiento Total y Comercial por Grupo de Cortes

En el rendimiento total no hubo diferencia significativa entre tratamientos evaluados por cortes, aunque globalmente sí existió (Cuadro 2). En el rendimiento comercial tampoco hubo diferencia en los periodos de cortes 1 a 4 y 5 a 9, pero sí en el período 10 a 13, en donde el tratamiento 0.8 fue estadísticamente superior al resto (Cuadro 3).

Volumen y Lámina de Agua Aplicada

El Cuadro 4 muestra los volúmenes de agua aplicada durante el ciclo de cultivo con base en cada uno de los tratamientos. La cantidad de agua aplicada por hectárea osciló entre 3500 y 7000 m³ para los coeficientes 0.6 y 1.2, respectivamente. Los volúmenes de agua correspondieron a láminas de riego de 348, 435, 563, 700 y 530 mm para los coeficientes 0.6, 0.8, 1.0 1.2 y combinados, respectivamente. En la comparación de las láminas de agua aplicadas por unidad de superficie se observó que el coeficiente 0.8 con que más se produjo,

Cuadro 3. Rendimiento comercial (t ha⁻¹) de tomate por cortes.

Coeficiente	Corte no.		
	1 a 4	5 a 9	10 a 13
0.6	0.5 a	5.9 a	9.6 c
0.8	0.3 a	9.0 a	14.7 a
1.0	0.8 a	7.6 a	9.8 c
1.2	0.5 a	6.7 a	9.6 c
0.6-0.8-1.0-1.2	0.5 a	4.9 a	10.9 b
CV (%)	43	40	26
DMS	0.55	5.4	6.4

Medias en columnas con igual letra no difieren estadísticamente.

Cuadro 4. Volumen y lámina de agua aplicada al tomate.

Coefficiente	Volumen de agua m ³	Lámina de agua aplicada mm	Porcentaje relativo
0.6	3478.3	348	50
0.8	4345.5	435	62
1.0	5625.0	563	80
1.2	7000.0	700	100
0.6-0.8-1.2-1.0	5303.0	530	76

representó un ahorro de agua de 20 % con relación al coeficiente 1.0, y de 38 % con relación al coeficiente 1.2 que vendría a representar el manejo del agua común. Los resultados derivados de esta investigación coinciden con los reportados por Obreza *et al.* (1996) y Jones *et al.* (1984), en el sentido de que es posible estimar las necesidades de agua de los cultivos, afectando las láminas de agua evaporadas desde un tanque tipo "A" por un coeficiente de 0.8, y se acercan a los reportados por Norero (1984), cuando indica que en forma genérica, en regiones tropicales, un coeficiente de 0.75 es aceptable.

Eficiencia en el Uso del Agua

En la eficiencia en el uso del agua, calculada con base en el rendimiento comercial y en el total, sobresale el coeficiente 0.8 con valores de 5.5 y 8.3 kg m⁻³, respectivamente, que significaron incrementos de más de 100 % con respecto a los tratamientos más ineficientes (Cuadro 5). Aunque las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas, se observó que el parámetro 1.2 donde más agua se aplicó, fue el más ineficiente por su relación inversa con el rendimiento de fruto y, caso contrario, el coeficiente con mayor eficiencia fue el 0.8.

El tratamiento con los coeficientes parciales (0.6-0.8-1.2-1.0) fue 65 % menos eficiente que el del coeficiente 0.8, demostrando que utilizar coeficientes diferenciales en cada etapa de cultivo no fue adecuado.

Cuadro 5. Eficiencia en el uso del agua (kg m⁻³) en diferentes tratamientos de riego.

Coeficiente	Con base en rendimiento	
	Comercial	Total
0.6	4.6 a	7.4 a
0.8	5.5 a	8.3 a
1.0	3.2 a	5.2 a
1.2	2.4 a	4.1 a
0.6-0.8-1.2-1.0	3.3 a	5.6 a

Medias en columnas con igual letra no difieren estadísticamente.

Contenido de Humedad en el Suelo

En el Cuadro 6 se presentan los resultados del análisis de varianza de los muestreos gravimétricos de la humedad en el suelo; se observa que en tres de los seis muestreos se encontraron diferencias significativas. El Cuadro 6 muestra los valores que alcanzó el contenido de humedad en el suelo, que varió entre 41 y 74 %.

Como regla general, se encontró que el efecto de los tratamientos fue inconsistente en los diferentes muestreos de humedad, y esto fue causado por las características irregulares de suelo en cuanto a microrelieve, pedregosidad, contenido de materia orgánica, y volumen edáfico. Debido a lo anterior, no se determinó la relación proporcional entre agua aplicada por los tratamientos y contenido de humedad en el suelo.

No fue posible aplicar el riego en forma completamente uniforme debido a la dificultad y resistencia que significa para el regador mover la manguera. De esta forma, la lámina de riego por unidad de superficie fue variable dentro del mismo tratamiento, aunque el volumen aplicado globalmente fue el adecuado. Esta fue una evidente desventaja del sistema de riego por manguera.

El otro factor en consideración es la irregularidad de los suelos, aun dentro de un mismo tratamiento. La pedregosidad y su distribución, el color, el contenido de humedad y el volumen superficial de suelo crean

Cuadro 6. Contenido de humedad (%) en el suelo bajo diferentes volúmenes de agua.

Coeficiente	Muestreo no.					
	1	2	3	4	5	6
0.6	51 ab	60 ab	66 a	54 abc	63 a	56 a
0.8	41 c	62 a	62 a	62 a	67 a	57 a
1.0	53 a	56 abc	55 a	53 abc	63 a	64 a
1.2	49 abc	51 c	60 a	53 abc	61 a	56 a
0.6-0.8-1.2-1.0	43 bc	53 bc	61 a	48 b	61 a	74 a
CV (%)	16	12	17 a	22	14 a	26 a
DMS	8.6	7.5	12.4	13.5	7.2	21

Medias en columnas con igual letra no difieren estadísticamente.

Cuadro 7. Contenido relativo de agua (%) en hojas de tomate bajo diferentes tratamientos de riego.

Coeficiente	Muestreo no.				
	1	2	3	4	5
0.6	63 bc	28 c	62 a	38 a	75 a
0.8	65 abc	30 bc	62 a	45 a	69 a
1.0	63 bc	38 ab	62 a	46 a	75 a
1.2	67 ab	29 c	57 a	50 a	70 a
0.6-0.8-1.2-1.0	71 a	39 a	57 a	47 a	67 a
CV (%)	9	20	9	13	13
DMS (0.05)	6.9	7.9	6.3	6.9	8.4

Medias en columnas con igual letra no difieren estadísticamente.

microcondiciones de humedad diversas que traslapan el efecto general de un tratamiento determinado de riego. En esencia, el efecto individual o combinado de los dos factores mencionados, manejo del agua e irregularidad de los suelos, no permitieron que se detectaran las diferencias en el contenido de humedad del suelo por efecto de los tratamientos.

Por otro lado, una condición constante que se establece en relación con la distribución del agua en el perfil del suelo, es el humedecimiento completo de la superficie con el riego por manguera, lo cual contrasta con otros sistemas de riego como el de goteo y microaspersión, los cuales sólo humedecen parcialmente.

Contenido Relativo de Agua

El Cuadro 7 concentra los datos del contenido relativo de agua, los cuales variaron entre 28 y 75 %, y muestra las diferencias significativas para tres de los cinco muestreos. Nuevamente, la inconsistencia en la respuesta por efecto de los tratamientos se atribuyó a las condiciones de humedad en el suelo.

CONCLUSIONES

El rendimiento más elevado de tomate en las categorías total, comercial, y de tercera se logró con el coeficiente 0.8 con 35.8, 23.9 y 12.5 t ha⁻¹, respectivamente. Igualmente, este mismo tratamiento de 0.8 resultó el más eficiente en el uso del agua, con valores de 5.5 y 8.3 kg m⁻³ de agua aplicada. Por lo anterior, afectar las lecturas del tanque evaporímetro por un coeficiente de 0.8

resulta un buen indicador para determinar las necesidades hídricas del cultivo del tomate en la zona henequenera de Yucatán.

LITERATURA CITADA

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Paper 56. FAO, Roma, Italia.
- Amayreh, J. 1995. Lake evaporation: a model study. Ph. D. Diss. Utah State University. Logan, UT.,
- Arteaga, R.R. y R.M. Elizondo. 1986. La evaporación como un indicador de la evaporación potencial. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México. CEZOHE (Campo Experimental de la Zona Henequenera). 1997. Guía para cultivar tomate en la Zona Henequenera de Yucatán. Manuscrito. CIRSE. INIFAP. SAGAR. Mérida, Yucatán.
- Doorenbos, J. y A.H. Kassam. 1986. Yield response to water. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 33. FAO, Rome, Italy.
- González, M.A. 1987. Estimación de las necesidades hídricas del cultivo del tomate en los suelos pedregosos de Yucatán. Informe técnico anual del Programa Uso y Manejo del Agua. CEZOHE-INIFAP-SARH.
- Grassi, C.J. 1987. Diseño y operación del riego por superficie. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Hargreaves, G.H y G.P. Merkle. 1998. Irrigation fundamentals. Water Resources Publication. Colorado. USA.
- Jones, J.W., L.H. Allen, S.F. Shih, J.S. Rogers, L.C. Hammond, A.G. Smajstrla y J.D. Martsof. 1984. Estimated and measured evapotranspiration for Florida climate, crops, and soils. Univ. of Florida. Agric. Exp. Stn. Tech. Bull. 840.
- Jensen, M.E. 1969. Plant and irrigation water requirements. Sprinkler Irrig. Assoc., Washington, D.C.
- Jensen, M.E., R.D. Burman y R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manual No. 70, Am. Soc. Civil Engineers, New York.
- Manjarrez, J.R.S. 1980. Riegos. El cultivo del tomate para consumo fresco en el valle de Culiacán. CEVAS-CIAPAN-SARH.
- Norero, A. 1984. La evapotranspiración de los cultivos. Aspectos agrofísicos. CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- Obreza, T.A., D.J. Pitts, R.J. McGovern y T.H. Spreen. 1996. Deficit irrigation of micro-irrigated tomato affects yield, fruit quality and disease severity. J. Prod. Agric. 9: 270-275.
- Palacios, V.E. 1981. Estimación de los requerimientos de agua de los cultivos para conocer el cuando y el cuanto regar. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Richardson, R.W. y O.H. Brauer. S/F. El tomate, indicaciones generales para su cultivo. Programa Agrícola Cooperativo de la Secretaría de Agricultura y Ganadería de México y la Fundación Rockefeller.
- Smart, E.R. y E.G. Bingham. 1973. Rapid estimates of relative water content. Soil Sci. Soc. Am. J. 37-4: 993-999.
- Thorne, D.M. 1979. Soil-water-plant relations. Soil, water and crop production. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Conn.

EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA Y DEL NITROGENO, Y RENDIMIENTO DEL GIRASOL, EN FUNCION DEL NITROGENO Y DENSIDAD DE POBLACION EN CLIMA CALIDO

Water and Nitrogen-use Efficiency and Sunflower Yield as Affected by Nitrogen and Plant Density in Hot Climate

Víctor M. Olalde Gutiérrez¹, J. Alberto Escalante Estrada¹, Prometeo Sánchez García², Leonardo Tijerina Chávez³, E. Mark Engleman Clark¹ y Angel A. Mastache Lagunas⁴

RESUMEN

Durante el temporal de 1998, se realizó en Cocula, Guerrero, un estudio para evaluar el efecto del nitrógeno (N) (0, 10 y 20 g de N m⁻²) y de la densidad de población (5, 7.5 y 10 plantas m⁻²) sobre la fenología del cultivo, la producción de biomasa, el rendimiento y sus componentes, la eficiencia en el uso del agua (EUA) y del nitrógeno (EAN), así como la evapotranspiración (ETc) y las unidades calor (UC) para la emergencia (VE), inicio de anthesis (R5.1) y madurez fisiológica (R9) del girasol cv. Victoria (*Helianthus annuus* L.). Las condiciones del clima durante el desarrollo del cultivo indican que 63% del total de la lluvia coincidió con el ciclo del cultivo y la temperatura máxima y mínima promedio fueron 35 °C y 21.5 °C, respectivamente. La fenología del cultivo no mostró cambios con la aplicación de N y la densidad de población. Las unidades calor (UC) y la evapotranspiración del cultivo (ETc) de la siembra a la madurez fisiológica fueron de 1744°C y 353 mm, respectivamente. El N incrementó la producción de biomasa, el rendimiento de semilla y sus componentes como: peso de cien semillas (PCS), número de semillas m⁻² (S), área del capítulo (AC), la eficiencia en el uso del agua y del N. Con la aplicación de 10 y 20 g de N m⁻² se encontraron incrementos similares en las variables antes mencionadas. También al aumentar la densidad de población se encontró un incremento en la producción de biomasa, el rendimiento, sus componentes y en la EUA y del EAN. La producción

de biomasa y el rendimiento más alto se lograron con la densidad de 10 pl m⁻². La combinación de 10 pl m⁻² y 20 g de N m⁻² condujo a la más alta producción de biomasa (1615 g m⁻²) y rendimiento (503 g m⁻²).

Palabras clave: Materia seca, componentes del rendimiento, fenología, unidades calor, evapotranspiración del cultivo, *Helianthus annuus* L.

SUMMARY

During the rainy season of 1998, in Cocula, Guerrero State, we evaluated the effect of nitrogen (N) (0, 10 and 20 g N m⁻²) and plant densities (5, 7.5, and 10 plants m⁻²) on the crop phenology, biomass production, yield and their components, water use efficiency (WUE) and nitrogen use efficiency (NUE), evapotranspiration (ETc), heat units (HU) for emergence (VE), beginning of anthesis (R5.1), and physiological maturity (R9) of sunflower cv. Victoria (*Helianthus annuus* L.). Climatic conditions during crop growing stage provided 63% of the total rain during the crop cycle and the average maximum and minimum temperatures were 35 °C and 21.5 °C. Crop phenology did not change with the application of N and plant density. HU and ETc from sowing to physiological maturity were 1744 °C and 353 mm. Nitrogen increased biomass production, seed yield, weight of 100 seeds (CSW), seed number m⁻² (S), head area (HA), WUE and NUE. Application of 10 and 20 g N m⁻² similarly increased the above variables. Also the increase in plant density increased biomass production, yield, its components, WUE and NUE. The highest biomass production and yield were obtained with density of 10 plants m⁻². The combination of 10 pl m⁻² and 20 g of N m⁻² gave the highest biomass production (1615 g m⁻²) and highest yield (503 g m⁻²).

¹ Especialidad de Botánica, ² Edafología y ³ Hidrociencias del IRENAT, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Méx.

⁴ Centro de Estudios Profesionales, Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero, Cocula, Gro.

Recibido: Agosto de 1999.

Aceptado: Enero de 2000.

Index words: Dry weight, yield components, phenology, heat units, crop evapotranspiration, *Helianthus annuus L.*

INTRODUCCION

El girasol (*Helianthus annuus L.*) es un cultivo que produce semillas ricas en aceite y proteínas, que desde la antigüedad ha sido usado como alimento, medicina, en ceremonias religiosas, en tintes para uso textil y cestería. En la actualidad, el aceite obtenido de la semilla se utiliza en la cocina, en la producción de margarina y en otros usos industriales como la producción de ceras, fosfatinas, lecitinas y tocoferoles. Después de la extracción de aceite, se produce una torta rica en grasas y proteínas útil para la alimentación animal (Alba y Llanos, 1990). El girasol se cultiva en diferentes países del mundo, en México, se produce en varios Estados, aunque registros recientes señalan siembras de importancia solamente en Coahuila, Morelos y San Luis Potosí, con una superficie total cosechada de 212 ha y una producción total de 376 Mg (SAGAR, 1995). Esta producción no satisface las necesidades crecientes de la población nacional, por lo que se han tenido que importar 47.8 millones de Mg (INEGI, 1996). La mayoría de las investigaciones que se han realizado en México con girasol, se concentran en regiones de clima árido y semiárido, por lo que es importante explorar su comportamiento en otros ambientes, principalmente bajo condiciones de temporal, a través de la búsqueda de las mejores prácticas de manejo para incrementar su producción. Se ha encontrado que con el manejo de la densidad de población y fertilización nitrogenada se ha logrado una mayor cobertura del suelo y un uso más eficiente de los recursos necesarios para el crecimiento y rendimiento del cultivo (Sojka *et al.*, 1988; Sarmah *et al.*, 1994; Escalante, 1995). Investigaciones, que se han desarrollado con girasol en diferentes ambientes, han demostrado que con aplicaciones de fertilizante nitrogenado se han incrementado el rendimiento de semilla por unidad de superficie (Zubriski y Zimmerman, 1974; Sarmah *et al.*, 1994; Sharma, 1994; Vivek *et al.*, 1994; Vega *et al.*, 1998a), la producción de biomasa, el número de semillas por m² (Vega *et al.*, 1998a), el peso de 100 semillas y de capítulo seco (Sarmah *et al.*, 1994), el tamaño del capítulo (Zubriski y Zimmerman, 1974), el número de semillas y porcentaje de semillas llenas por capítulo

(Vivek *et al.*, 1994). Un indicador importante respecto al uso del nitrógeno (N) es su eficiencia agronómica, que indica el incremento en el rendimiento económico de un cultivo por unidad de N aplicado. Al respecto, Escalante y Rodríguez (1994) encontraron que la eficiencia en el uso del N en girasol de secano cultivado en Córdoba, España, se incrementó cuando se aplicó fertilizante nitrogenado y fue mayor cuando se combinó con densidades altas. Respecto a aumentos en la densidad de población en girasol, se ha encontrado en diversos estudios que incrementa el rendimiento de semilla (Zubriski y Zimmerman, 1974; Robinson *et al.*, 1980; Vega *et al.*, 1998a), la producción de biomasa y el número de semillas por m² (Vega *et al.*, 1998a), no obstante, de obtener una reducción en el tamaño del capítulo (Zubriski y Zimmerman, 1974; Robinson *et al.*, 1980), y tamaño de semilla (Robinson *et al.*, 1980). Mathers y Stewart (1982) señalan que el requerimiento de N ha⁻¹ para el crecimiento del girasol a una densidad entre 25 y 86 mil plantas ha⁻¹ es en término medio de 50 a 100 kg, para obtener rendimientos mayores que 3 t ha⁻¹. Esta variabilidad dependerá de la fertilidad del suelo, genotipo y humedad disponible para el cultivo. En regiones de clima templado (e.g. Chapingo, Méx.), Escalante (1995) encontró que con la aplicación de N y el uso de altas densidades en girasol cv. Victoria sembrada bajo condiciones de secano, se incrementaron la producción de biomasa, el rendimiento de semilla, de aceite y la eficiencia en el uso del agua [expresado como el nivel de acumulación de biomasa o rendimiento de semilla por cantidad de agua consumida como transpiración, evapotranspiración o agua total aplicada (Sinclair *et al.*, 1984)]. La producción de biomasa y rendimiento más alto se encontraron con 100 kg de N ha⁻¹ y 114 mil plantas ha⁻¹ y fue de 576 y 206 g m⁻², respectivamente. En clima semiárido (Bs, Montecillo, Méx.) se han encontrado tendencias similares con aumentos en la densidad y en la aplicación de fertilizante nitrogenado (Vega *et al.*, 1998a,b). Estas evidencias sugieren que mediante el manejo del cultivo se puede lograr un uso más eficiente del agua disponible del suelo y, en consecuencia, tener una mayor producción de biomasa y semilla. El objetivo del presente estudio fue determinar bajo condiciones de clima cálido subhúmedo, el efecto de la fertilización nitrogenada y densidad de población sobre la eficiencia en el uso del agua y del N, producción de biomasa y rendimiento de semilla y sus componentes.

MATERIALES Y METODOS

El experimento se realizó durante el verano de 1998 bajo condiciones de temporal en Cocula, Gro., (18° 19' norte, 99° 39' oeste y 640 msnm). El clima es A_w (w)(i)g que indica cálido subhúmedo con lluvias en verano (García, 1988). El suelo es un vertisol que se expande al humedecerse y se contrae al secarse, característico de la presencia de la arcilla montmorillonita, con pH neutro, efectos despreciables de salinidad, pobre en materia orgánica y N total, de medio a alto en fósforo y concentraciones altas de calcio (Ca). El girasol cv. Victoria se sembró el primero de junio de 1998 bajo tres densidades de población: 5 (25x80 cm), 7.5 (33x40 cm) y 10 (25x40 cm) pl m^{-2} (50, 75 y 100 mil plantas ha^{-1}), y tres niveles de nitrógeno: 0, 10 y 20 g de N m^{-2} (0, 100 y 200 kg de N ha^{-1}) aplicados al momento de la siembra, utilizando como fuente al sulfato de amonio (20.5 % N). Además, a todo el experimento se le aplicaron 10 g de P_2O_5 m^{-2} (100 kg de P_2O_5 ha^{-1}), como superfosfato triple (46 % de P_2O_5). El diseño experimental fue bloques al azar con arreglo en parcelas divididas, asignando a la parcela grande el N y a la parcela chica la densidad de población. La unidad experimental fue de 6.0 m x 3.2 m. Durante el desarrollo del experimento se registraron la temperatura máxima y mínima diaria, la evaporación y la precipitación. Las etapas fenológicas registradas fueron: días a emergencia, a inicio de antesis y a madurez fisiológica. El criterio utilizado para determinar estas variables fue el de Schneiter y Miller (1981). También, para cada etapa fenológica se determinó la acumulación de unidades calor por el cultivo (UC), utilizando el método residual (Flores *et al.*, 1985), el cual es descrito por la siguiente relación:

$$UC = T_{\max} + T_{\min} / 2 - TB,$$

Donde: T_{\max} = Temperatura máxima diaria ($^{\circ}C$), T_{\min} = Temperatura mínima diaria ($^{\circ}C$) y TB = Temperatura base, considerada como $6^{\circ}C$ (Merrien, 1986). La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se estimó para todo el experimento a partir de los datos de la evaporación (E_v) del tanque tipo "A", utilizando 0.6

como coeficiente para el evaporímetro y 0.8 para el cultivo, a partir de la siguiente relación:

$$ET_c = E_v * 0.6 * 0.8. \text{ (Doorenbos y Pruitt, 1986).}$$

A la cosecha, se evaluaron la biomasa aérea total (materia seca), el índice de cosecha (IC) (relación entre el peso del grano y biomasa aérea total), rendimiento de semilla (PS, peso de semilla al 10 % de humedad por m^2), el peso de cien semillas (PCS), número de semillas por m^2 (S), área del capítulo (AC), la eficiencia del uso del agua para biomasa total y rendimiento de grano ($g\ m^{-2}\ mm^{-1}$) se calculó considerando las relaciones $EUA = \text{Biomasa total o rendimiento} / ET_c$. La eficiencia agronómica del N aplicado, considerada como el incremento en el rendimiento económico de un cultivo por unidad de fertilizante aplicado, se calculó a través de la siguiente relación:

$$EAN = RCN - RSN / CN$$

Donde: EAN = eficiencia agronómica del nitrógeno aplicado (kg de semilla $kg\ N^{-1}\ m^{-2}$), RCN = rendimiento de semilla con N ($kg\ m^{-2}$), RSN = rendimiento de semilla sin N ($kg\ m^{-2}$) y, CN = cantidad de N aplicado ($kg\ m^{-2}$) (Harmsen, 1984). A las variables respuesta se les practicó un análisis de varianza, y aquellas con significancia estadística, una prueba complementaria de Tukey al 5 % de probabilidad y polinomios ortogonales.

RESULTADOS Y DISCUSION

Elementos del Clima

En la Figura 1, que presenta la temperatura máxima y mínima (media decenal) y la precipitación estacional (suma decenal). Se observa que durante el período de siembra se registraron las temperaturas máxima y mínima más altas ($40^{\circ}C$ y $22.5^{\circ}C$, respectivamente), lo cual coincidió con una escasa precipitación, por lo que se aplicó un riego de presiembra, posteriormente las temperaturas tendieron a disminuir ligeramente conforme el ciclo de cultivo avanzó. Así, para la época de inicio de antesis (R5.1),

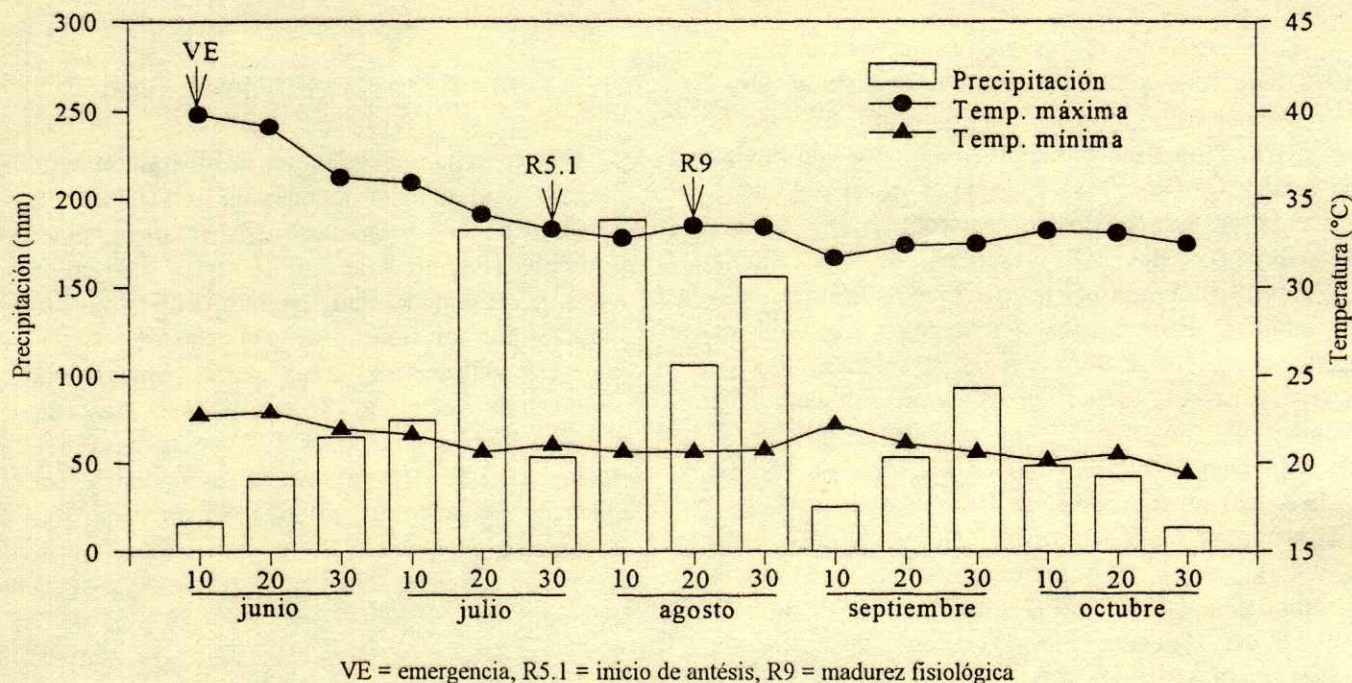


Figura 1. Distribución de la temperatura máxima, mínima (media decenal) y precipitación (suma decenal) durante el ciclo del cultivo de girasol cv. Victoria. Cocula, Gro. Temporal 1998.

estación de lluvias fue de 1156 mm, de la cual 725 mm ocurrieron durante el desarrollo del cultivo (63% del total). De ésta, 529 mm (73%) se presentaron en la época de floración y llenado de grano.

Fenología

Las etapas fenológicas del girasol bajo los tratamientos aplicados fueron similares. Así, la emergencia de plántulas se presentó a los cuatro días después de la siembra (DDS), el inicio de antesis (R5.1) a los 54 DDS y la madurez fisiológica a los 77 DDS. Estos resultados muestran una tendencia similar a las encontradas por Escalante (1995), al evaluar la fenología del cv. Victoria bajo condiciones de secano tipo intraestival, quien señala que la fenología no mostró cambios por efecto de la fertilización nitrogenada y densidad de población. La etapa de floración (R5) ocurrió a los 45 días y la madurez fisiológica a los 110 días. Las diferencias en el desarrollo fenológico encontradas en las dos investigaciones pueden atribuirse a las contrastantes condiciones ambientales (climas A_{w_0} y C_w), en que se desarrollaron estos estudios.

Unidades Calor

La acumulación de unidades calor (UC) en relación con la fenología del cultivo se presenta en la Figura 2A. El requerimiento térmico del cultivo bajo condiciones de clima cálido fue similar entre tratamientos. Así, las UC fueron de 120 °C a la emergencia, 1266 °C al inicio de antesis (R5.1) y de 1744 °C a la madurez fisiológica. Valores similares de unidades calor encontraron Salera y Baldini (1998), al probar diferentes híbridos de girasol en diferentes ambientes y manejo del agua, y determinar los grados días de desarrollo (GDD) con el método residual y temperatura base de 6 °C, en diferentes etapas fenológicas. Estos autores concluyeron que en los cuatro ambientes examinados, el rango de GDD fue de 789 a 1108 °C y de 1612 a 2036 °C para los períodos siembra-floración y siembra-madurez fisiológica. Establecen además, que las diferencias en los GDD entre híbridos se debieron principalmente a diferencias en sus ciclos biológicos y su interacción con el ambiente.

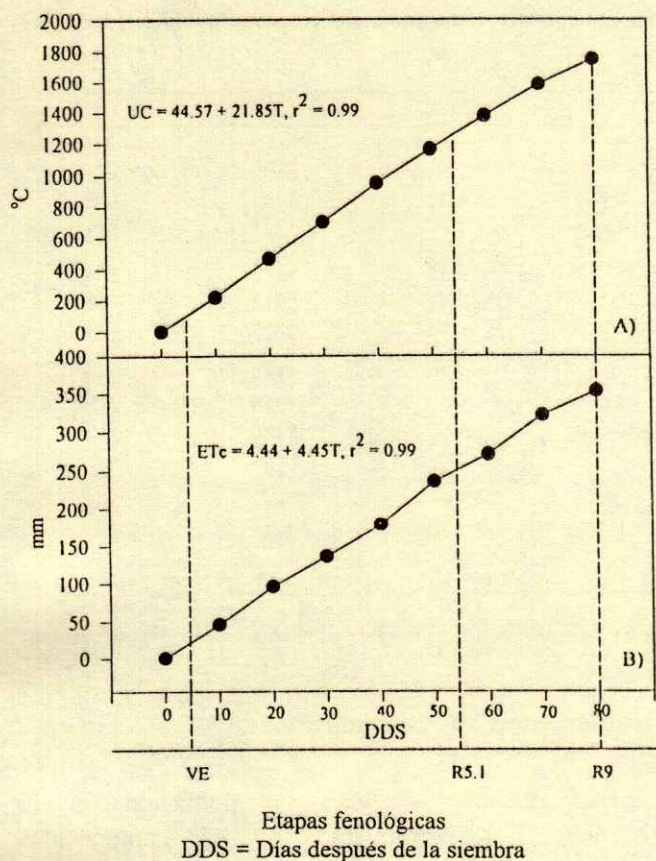


Figura 2. Unidades calor (A) y evapotranspiración (B) acumuladas de girasol cv. Victoria. Cocula, Gro.

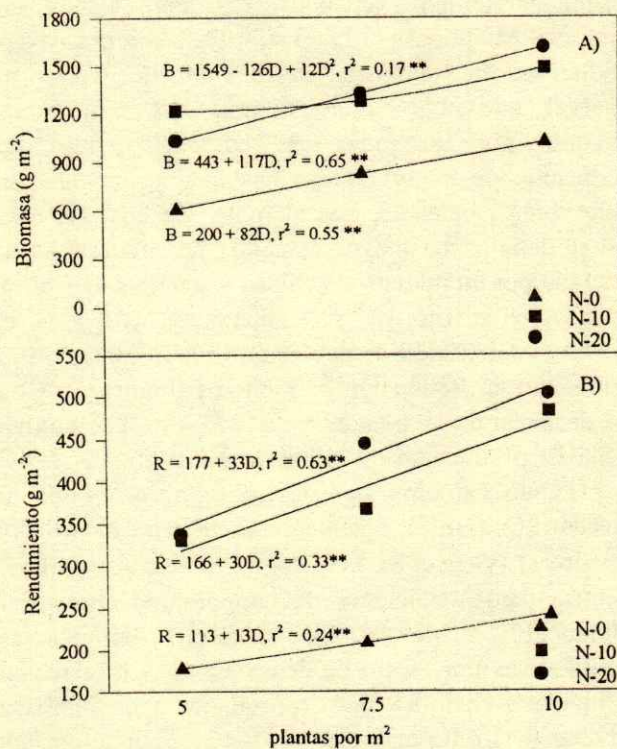
Evapotranspiración del Cultivo (ETc)

En la Figura 2B, que relaciona la evapotranspiración acumulada del cultivo (ETc) y su fenología, se observa que en el período de siembra-emergencia, la ETc fue de 22 mm. Debido a que en esta etapa el desarrollo del dosel vegetal del girasol es muy limitado, se asume que la mayor parte de la ETc es evaporación directa del suelo. En el período de emergencia-antesis la ETc fue de 234 mm y de antesis a madurez fisiológica fue de 97 mm. La ETc acumulada durante todo el ciclo del cultivo fue de 353 mm. Una ETc estacional similar (371 mm) reporta Escalante (1995) cuando cultivó girasol cv. Victoria bajo condiciones de secano en clima Cw, pero con 33 días de ciclo más largo. Estos cambios en el ciclo del cultivo entre las localidades pueden ser atribuibles a marcadas diferencias en la temperatura ambiental.

Biomasa Total (BT) e Índice de cosecha (IC).

Las variables evaluadas en este estudio, no presentaron efectos significativos a causa de la interacción N * densidad de población. Así, los resultados y su discusión se centrarán al efecto por separado de N y la densidad.

En cualquier densidad de población, el N incrementó la producción de biomasa y el índice de cosecha (Cuadro 1 y 2 y Figura 3A). Con la aplicación de 10 y 20 g de N m⁻² se encontraron incrementos similares en la producción de biomasa y en el índice de cosecha. La aplicación de 20 g de N m⁻² ocasionó incrementos de biomasa de 505 g m⁻² e índice de cosecha del 7%, en tanto que con 10 g de N m⁻² el incremento fue de 509 g m⁻² y 4% para biomasa e índice de cosecha, respectivamente (Cuadro 2). Estos resultados indican que el N promovió una mayor acumulación de materia seca en la semilla respecto a la producción de biomasa total, generando un mayor IC.



N-0 = 0, N-10 = 10 y N-20 = 20 g de N m⁻². Cada punto es la media de cuatro repeticiones.

Figura 3. Producción de biomasa (A) y rendimiento de semilla (B) a la cosecha de girasol cv. Victoria en función del nitrógeno y densidad de población. Cocula, Gro. Temporal 1998.

Cuadro 1. Rendimiento y sus componentes de girasol cv. Victoria en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido, 1998.

Nitrógeno	Densidad	BT	IC	REND	PCS	S	AC
g m ⁻²	plantas m ⁻²	g m ⁻²	%	g m ⁻²	g	No m ⁻²	cm ²
N-0	D-5	607	29	177	4.52	3895	171
	D-7.5	826	26	208	4.22	4906	152
	D-10	1018	23	241	4.17	5725	145
N-10	D-5	1217	27	331	6.32	5270	274
	D-7.5	1276	29	367	5.42	6713	213
	D-10	1485	32	483	5.14	9325	223
N-20	D-5	1029	33	336	6.30	5349	264
	D-7.5	1323	34	444	5.66	7918	228
	D-10	1615	31	503	6.00	8379	218
Prob. F	N	**	*	**	**	**	**
	D	**	NS	**	*	**	**
	N*D	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CV	%	14	9	18	10	15	13

*,** = P≤0.05,0.01, respectivamente; NS = Diferencias no significativas a P≤0.05.

BT = Biomasa total, IC = Índice de cosecha, REND = Peso de semilla, PCS = Peso de cien semillas, S = Número de semillas m⁻², AC = Área del capítulo. N = Nitrógeno, D = Densidad, CV = Coeficiente de variación.

Resultados similares encontró Escalante (1999) en frijol cv. Michoacán 12 A3 tipo II sembrado bajo condiciones de clima cálido subhúmedo (A_{w_0}) al observar que el rendimiento más alto con N es generado por un índice de cosecha y tasa de producción de materia seca más alta y mayor área foliar. Indica, además, que el índice de cosecha más alto se debe a una mayor demanda por materia seca, generada por un número de vainas y semillas más altos con relación al frijol sin N. En cualquier nivel de N, el aumento en densidad de población (5 a 10 plantas m⁻²) incrementó la producción de biomasa (Figura 3). Con una densidad de 10 plantas m⁻² (1373 g m⁻²) se obtuvo la mayor producción de biomasa. En contraste, el IC no presentó cambios significativos por efecto de la densidad (Cuadro 1), obteniéndose en promedio 29.7% (Cuadro 2). Vega *et al.* (1998a), al sembrar girasol cv. Victoria bajo condiciones de temporal en clima BS₁ (Montecillo, Méx.), encontraron diferencias significativas por efecto de densidad en la producción de biomasa e IC. La mayor producción de biomasa (2472 g m⁻²) e IC más alto (22%) se obtuvieron con una densidad de 114 000 plantas ha⁻¹ y 100 kg de N ha⁻¹. Esta diferencia en respuesta en el IC puede atribuirse a diferencias contrastantes en los ambientes donde se establecieron los estudios.

Rendimiento y sus Componentes

En cualquier densidad de población, el N incrementó el rendimiento y sus componentes (Cuadro 1). El girasol con N mostró mayor área del capítulo (AC), número de semillas por m² (S), peso de cien semillas (PCS) y, en consecuencia, un rendimiento más alto. Con 10 g de N m⁻² el rendimiento se incrementó en 185 g m⁻², el peso de 100 semillas en 1.32 g, el número de semillas por m² en 2260 y, el área del capítulo en 81 cm² (Cuadro 2). En cualquier nivel de N, el aumento en densidad de población redujo el área del capítulo y el número de semillas por capítulo, no obstante, el número de semillas (S) por unidad de área aumentó, y se relacionó con el incremento en el rendimiento de semilla. Los más altos valores en S, AC y PCS ocurrieron con la densidad de 10 plantas m⁻² (7810 semillas), 5 plantas m⁻² (236 cm²) y 5 plantas m⁻² (5.72 g) (Cuadro 2). El rendimiento de semilla aumentó en 69 g m⁻² al incrementar la densidad de 7.5 a 10 plantas m⁻² (Cuadro 2 y Figura 3B). Vega *et al.* (1998a), trabajando con girasol cv. Victoria en Montecillo, Méx., (clima BS₁), encontraron que el rendimiento y la biomasa se incrementaron con la aplicación de N y aumento en la densidad de población. El área del capítulo, el número de semillas

Cuadro 2. Biomasa, índice de cosecha, rendimiento y sus componentes de girasol cv. Victoria en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido. 1998.

Factor	BT	IC	REND	PCS	S	AC
	g m ⁻²	%	g m ⁻²	g	No m ⁻²	cm ²
^a N-0	817b	26b	209b	4.31b	4842b	156b
N-10	1326a	30ab	394a	5.63a	7102a	237a
N-20	1322a	33a	428a	5.99a	7216a	236a
DSH _{0.05}	391	5.9	78.3	0.62	1590	33.8
^b D-5	951c	30a	281b	5.72a	4838c	236a
D-7.5	1142b	30a	340b	5.10b	6512b	198b
D-10	1373a	29a	409a	5.10b	7810a	196b
DSH _{0.05}	172	2.9	63.9	0.56	1020	27.5

^aValores medios de los niveles de nitrógeno y ^bValores medios de densidad de población.

BT = Biomasa total, IC = Índice de cosecha, REND = Peso de semilla, PCS = Peso de cien semillas, S = Número de semillas m⁻², AC = Area del capítulo, DSH = Diferencia significativa honesta, 0.05 = 5% de probabilidad.

capítulo⁻¹ y por m² fueron los componentes más relacionados con el rendimiento.

Eficiencia en el Uso del Agua

En cualquier densidad de población, el N incrementó la eficiencia del uso del agua (EUA), (Cuadro 3). La aplicación de 10 g de N m⁻² aumentó la EUA tanto para el rendimiento de grano como para la biomasa total en 0.53 y 1.44 g m⁻² mm⁻¹, respectivamente (Figuras 4A y 4B). En cualquier nivel de N, el aumento en la densidad de población incrementó la EUA. Con la densidad de 10 pl m⁻² se obtuvo en promedio la mayor eficiencia en el uso del

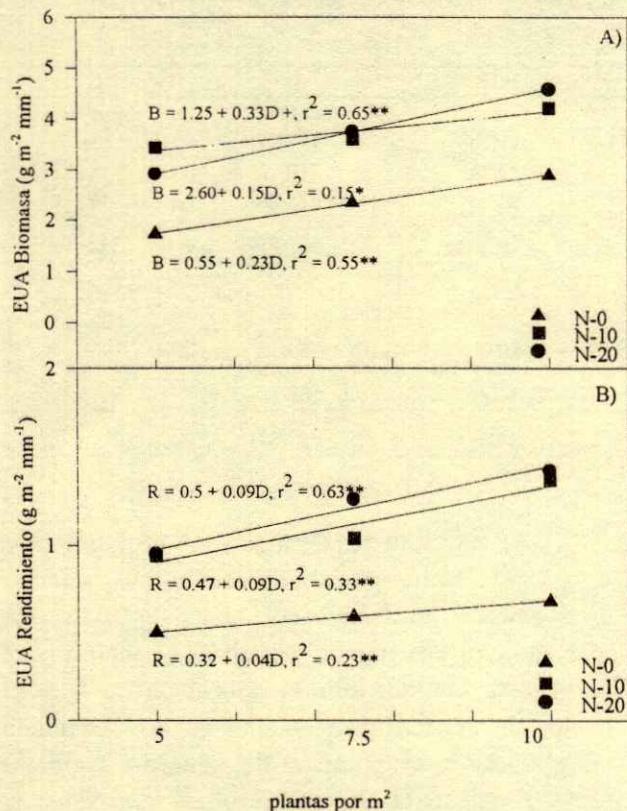
agua (EUA) con 3.89 para producción de biomasa y 1.16 g m⁻² mm⁻¹ para producción de semilla, respectivamente. Se asume, que la mayor EUA está relacionada con una mayor y temprana cobertura del dosel vegetal, causado por la aplicación de N y el aumento en la densidad de población, generando disminución en la evaporación del agua del suelo. Al respecto, Escalante (1995) encontró que la producción de biomasa, el rendimiento de semilla, de aceite y la eficiencia en el uso del agua se incrementaron al elevar la densidad y fertilizante nitrogenado, y que dichos incrementos fueron mayores con la combinación de ambas prácticas.

Cuadro 3. Eficiencia del uso del agua en girasol en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido.

Nitrógeno	Densidad	EUA	EUA	EAN
		Biomasa	Rendimiento	Rendimiento
g m ⁻²	plantas m ⁻²	g m ² mm ⁻¹	g m ² mm ⁻¹	kg kg N ⁻¹
0	D-5	1.72	0.50	-
	D-7.5	2.34	0.59	-
	D-10	2.89	0.68	-
10	D-5	3.44	0.94	15.40
	D-7.5	3.61	1.04	15.92
	D-10	4.21	1.37	24.20
20	D-5	2.91	0.95	8.00
	D-7.5	3.75	1.26	11.80
	D-10	4.57	1.42	13.07
Prob. F	N	**	**	NS
	D	**	**	NS
	N*D	NS	NS	NS
CV	%	14	18	40

*, ** = P ≤ 0.05, 0.01, respectivamente; NS = Diferencias no significativas.

EUA = Eficiencia del uso del agua. EAN = Eficiencia agronómica del nitrógeno.



N-0 = 0, N-10 = 10 y N-20 = 20 g de N m⁻². Cada punto es la media de cuatro repeticiones.

Figura 4. Eficiencia en el uso del agua en la producción de biomasa (A) y rendimiento de semilla (B) de girasol cv. Victoria en función del nitrógeno y densidad de población. Cocula, Gro. Temporal 1998.

Eficiencia Agronómica del Nitrógeno [kg de Semilla (kg N)⁻¹]

La aplicación de N y el aumento en la densidad de población no provocaron cambios significativos (Cuadro 3) en la eficiencia agronómica del nitrógeno (EAN) sobre el rendimiento de semilla. En promedio de las tres densidades, la mayor eficiencia se logró cuando se aplicaron 10 g de N m⁻² (100 kg de N ha⁻¹), obteniéndose 18.50 kg de semilla por kg de N aplicado, y menor eficiencia (10.95 kg de semilla kg⁻¹ N) cuando se aplicaron 20 g de N m⁻² (200 kg de N ha⁻¹). Resultados similares encontró Harmsen (1984), al indicar que la eficiencia agronómica del fertilizante generalmente decrece con incrementos en los niveles del fertilizante aplicado.

Tanto con 10 g de N m⁻² y 20 g de N m⁻², la EAN se incrementó por efecto de la densidad (Cuadro 3). La

mayor EAN se logró con la combinación de 10 g de N m⁻² y 10 plantas m⁻². Esta mayor eficiencia puede ser atribuible a que con la combinación de estos niveles se obtuvieron mayor área del capítulo, mayor número de semillas por m², mayor peso de 100 semillas y, consecuentemente, mayor rendimiento de semilla.

CONCLUSIONES

Bajo condiciones de clima cálido, la aplicación de N al cultivo del girasol elevó la eficiencia en el uso del agua y del N, la producción de biomasa, el índice de cosecha y el rendimiento de semilla y sus componentes. El aumento en densidad de población incrementó la eficiencia en el uso del agua y del N, la producción de biomasa, el rendimiento de semilla, el número de semillas m⁻², pero disminuyó el área del capítulo y el peso de cien semillas. Con la combinación de 20 g de N m⁻² (200 kg de N ha⁻¹) y 10 pl m⁻² (100 mil plantas ha⁻¹) se generó la mayor eficiencia en el uso del agua, producción de biomasa y rendimiento de semilla, en tanto que la mayor eficiencia en el uso del N se obtuvo con 10 g de N m⁻² (100 kg de N ha⁻¹) y 10 plantas m⁻² (100 mil plantas ha⁻¹).

LITERATURA CITADA

- Alba, O.A. y M. Llanos C. 1990. El cultivo de girasol. Agroguías Mundiprensa. Mundiprensa. Madrid, España.
- Doorenbos, J. y W.O. Pruitt. 1986. Las necesidades de agua por los cultivos. Estudio FAO. Riego y Drenaje. Manual 24.
- Escalante E., J.A. 1995. Aprovechamiento del recurso agua en cultivos de secano. pp. 28-32. In: Colegio de Postgraduados. Agroproductividad. Montecillo, Méx.
- Escalante E., J.A. 1999. Área foliar, producción de materia seca y su asignación en los órganos del frijol en función del nitrógeno. p. 37. In: XLV Reunión Anual del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos y Animales. Guatemala, Guatemala.
- Escalante E., J.A. y M.T. Rodríguez G. 1994. Mayor eficiencia en el uso del nitrógeno en girasol mediante el manejo del cultivo. pp. 345-347. In: J. Pérez-Moreno y R. Ferrera-Cerrato (eds.). Nuevos horizontes en agricultura: Agroecología y desarrollo sostenible. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Flores, J.M., J.L. Chan y L. Bravo. 1985. Fenología del maíz y frijol en el Altiplano de Zacatecas. II. Unidades calor (UC) y desarrollo fenológico. Fitotecnia 7: 66-81.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema climático de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Cuarta edición. Talleres offset Laros. México, D.F.
- INEGI. 1996. Anuario Estadístico del Comercio Exterior de los Estados Unidos Mexicanos. Tomo I. México, D.F.

- Harmsen, K. 1984. Nitrogen fertilizer use in rainfed agriculture. *Fertilizer Res.* 5: 371-382.
- Mathers, A.C. y B.A. Stewart. 1982. Sunflower nutrient uptake, growth, and yield as affected by nitrogen or manure, and plant population. *Agron. J.* 74: 911-915.
- Merrien, A. 1986. Cahier technique turnesol. Physiologie. CETIOM. Paris. pp. 1-47.
- Robinson, R.G., J.H. Ford, W.E. Lueschen, D.L. Rabas, L.J. Smith, D.D. Warnes y J.V. Wiersma. 1980. Response of sunflower to plant population. *Agron. J.* 72: 869-871.
- SAGAR. 1995. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. Centro de Estadística Agropecuaria. Tomo I. México, D.F.
- Salera, E. y M. Baldini. 1998. Performance of high and low oleic acid hybrids of sunflower under different environmental conditions. *Note I. Helia* 21 (28): 41-54.
- Sarmah, D.C., S.K. Katyal y A.S. Faroda. 1994. Response of sunflower (*Helianthus annuus*) cultivars to fertility level and plant population. *Indian J. Agron.* 39: 76-78.
- Schneiter, A.A. y J.E. Miller. 1981. Description of sunflower growth stages. *Crop Sci.* 21: 901-903.
- Sharma, R.S. 1994. Influence of irrigation schedule and fertility levels on yield sunflower (*Helianthus annuus*). *Indian J. Agron.* 39: 496-497.
- Sinclair, T.R., C.B. Tanner y J. Bennett. 1984. Water-use efficiency in crop production. *Bio Sci.* 34: 36-40.
- Sojka, R.E., D.L. Warlen y E.J. Salder. 1988. Planting geometries and the efficient use of water and nutrients. In: W.I. Hargave (ed.). Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. Special Publication 1.51. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.
- Vega, M.R., J.A. Escalante E., P. Sánchez G., E. Cuenca A. y C. Ramírez A. 1998a. Crecimiento y rendimiento del girasol (*Helianthus annuus* L.) en función del nitrógeno, densidad de población y época de aclareo en el altiplano de México. 1er. Simposio Nacional sobre Nutrición de Cultivos. Querétaro, Qro.
- Vega, M.R., J.A. Escalante E., P. Sánchez G., E. Cuenca A. y C. Ramírez A. 1998b. Crecimiento y rendimiento de girasol (*Helianthus annuus* L.) en función de la fertilización nitrogenada. p. 269. In: Memorias del 29º Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Tapachula de Córdova y Ordóñez, Chiapas.
- Vivek, I.S. Chakor y H.K. Sharma. 1994. Effect of moisture regimes and nitrogen levels on seed yield of sunflower (*Helianthus annuus*). *Indian J. Agron.* 39: 142-143.
- Zubriski, J.C. y D.C. Zimmerman. 1974. Effects of nitrogen, phosphorus and plant density on sunflower. *Agron. J.* 66: 798-801.

EFFECTO DE LA LABRANZA SOBRE LA ESTRUCTURA DEL SUELO, LA GERMINACION Y EL DESARROLLO DEL MAIZ Y FRIJOL

Effect of Tillage on Soil Structure and on Germination and Development of Corn and Beans

Agustín Navarro Bravo¹, Benjamín Figueroa Sandoval¹, Víctor M. Ordaz Chaparro¹
y Félix V. González Cossio²

RESUMEN

El propósito principal del presente estudio fue evaluar cinco tratamientos de labranza, con dos cultivos, en dos tipos de suelo (un migajón arenoso y un arcilloso) con el objetivo fundamental de medir hasta qué grado es necesario remover el suelo para obtener un alto porcentaje de emergencia y desarrollo inicial de maíz y frijol. Se cuantificaron algunas propiedades físicas como textura, densidad real, densidad aparente, resistencia mecánica, distribución y estabilidad de agregados, porosidad total, composición de macroagregados, coeficiente de estructuración y estado estructural del suelo, entre otras. Con base en los resultados obtenidos, se concluye que no se requiere demasiado movimiento del suelo (labranza tradicional) para lograr una buena emergencia del cultivo. En los suelos de textura gruesa, se tienen pocos problemas con el manejo, y aun con intenso laboreo no se puede cambiar su arreglo estructural inicial, por lo cual es recomendable la siembra directa para ahorrar energía y dinero.

Palabras clave: Laboreo, estructura, suelo, plántulas.

SUMMARY

The main aim of this study was to evaluate five tillage treatments with two crops on two types of soil, sandy loam and clay. The fundamental objective was to assess how much tillage is needed to obtain good germination, emergence and initial development of maize and beans. Several soil properties were measured: texture, particle density, bulk density,

mechanical resistance, distribution and stability of aggregates, total porosity, composition of macroaggregates, structural coefficient and structural state of the soil, among others. Results showed that good seed germination was obtained without much tillage (traditional tillage). In coarse textured soils there are few management problems, and even with intensive tillage, it is not possible to change initial structural arrangement. Thus, direct seeding is recommended to save energy and money.

Index words: Tillage, structure, soil, seedlings.

INTRODUCCION

La disminución de los rendimientos en los cultivos es cada vez mayor por la degradación del suelo, debido a la sobreexplotación, los altos índices de deforestación, la eliminación de la cobertura vegetal y el exceso de laboreo del suelo. Una explotación eficiente del suelo en la producción de cultivos debe considerar los principios básicos de sustentabilidad, que se traducen en procesos productivos ecológicamente sanos, económicamente viables, socialmente justos, humanos y adaptables, con la aplicación adecuada de los adelantos e innovaciones de la ciencia y la tecnología.

La agricultura en México tiene una producción escasa y fluctuante frente a un consumo en constante crecimiento que obliga a producir más y mejor con base en cultivos intensivos cada vez más mecanizados, lo cual origina la degradación de los suelos, que tiene un efecto irreversible como es el caso de la erosión. Sin embargo, el avance tecnológico surge por la necesidad de producir más intensamente sobre una unidad de suelo; esto ha implicado la utilización más intensa de las labores agrícolas y abuso del uso de la maquinaria agrícola, con la creencia de que entre más se disgrega el suelo mejor es su preparación para la producción de cultivos.

¹ Edafología. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México. Tel. (5) 951-14-74.

² Estadística. ISEI, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México.

Recibido: Mayo de 1998.

Aceptado: Febrero de 2000.

La estructura se considera como el conjunto de las unidades elementales de diferente tamaño y nivel de organización, que presentan un arreglo específico en el espacio y una dinámica en el tiempo característica de cada tipo de suelo. Los suelos sin estructura no existen, ya que en cualquier suelo hay un número dado de niveles de organización estructural, que puede ser igual a uno o más. Sin embargo, el proceso de agregación no se presenta en todos los suelos. La tendencia actual en el laboreo de los suelos debe ser hacia el uso de sistemas de labranza que permitan un ahorro de energía y propicien un deterioro mínimo de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Figuroa y Ventura, 1990). En la actualidad, para laborear el suelo se han diseñado implementos agrícolas con el objetivo de lograr menor deterioro de la estructura y obtener mayor rendimiento en la producción, conjuntamente con el empleo de nuevas técnicas agrícolas.

El laboreo del suelo con los implementos tradicionales (arado de discos o de vertederas), es una práctica agrícola que la investigación está demostrando como posible causa de erosión, compactación, pérdida de humedad y aumento en los costos de producción cuando se usa con exceso. Por lo tanto, es difícil asegurar si los métodos tecnificados de labranza más recomendados en algunas zonas son adecuados para los suelos y condiciones climáticas y socioeconómicas de otra zona particular, y mucho más difícil resulta precisar si esta misma tecnología puede tener ventajas sobre aquélla tradicional desarrollada por los agricultores en áreas marginadas.

La cama de siembra es la capa de suelo que se ha laboreado para producir una condición que promueva la germinación, emergencia y el crecimiento de las plantas (Braunack y Dexter, 1989). Esta condición se logra a través de la labranza y, dado que ésta altera la distribución del tamaño de agregados, también afecta las propiedades físicas y químicas del suelo. El tamaño de agregados en la cama de siembra juega un papel considerable en el desarrollo de los cultivos e interactúa con otros factores en el rendimiento final. En general, se ha sugerido que las condiciones ideales para una cama de siembra son las producidas por agregados no menores que 0.5 a 6.0 mm (Russell, 1973).

Las necesidades de energía en la agricultura han crecido rápidamente en todo el mundo en los últimos 15 años. Se necesita más energía, en general, y en

determinadas épocas del año, en particular, por ello es necesario aplicar la mecanización agrícola, la cual no debe confundirse con tractorización, pues esta última es el empleo de tracción mecánica y sólo es un componente más de la mecanización agrícola (Cruz, 1992). En México, 93.5% de las unidades de producción poseen superficies menores que 20 ha; el uso o introducción de la tracción mecánica se dificulta cuando la extensión de las unidades de producción es pequeña e irregular topográficamente, y la utilización de la tracción animal y humana es importante en la producción agrícola (Cruz, 1991).

El objetivo general de la presente investigación es evaluar el efecto de tres sistemas de labranza con diferentes fuentes de energía en la preparación de la cama de siembra con residuos en la superficie, para obtener una buena germinación y desarrollo inicial del maíz y frijol, y que, además, ayuden a conservar y mejorar la estructura del suelo.

MATERIALES Y METODOS

El experimento se ubicó en terrenos de Huexotla (suelo arcilloso) y Nativitas (suelo migajón arenoso) del municipio de Texcoco; estos sitios se localizan a 19° 29' 51.78" latitud norte con 98° 51' 02.82" longitud oeste, con una altitud de 2164 m y a 19° 28' 43.74" latitud norte con 98° 54' 53.76" longitud oeste a una altitud de 2376 m, respectivamente. El estudio se realizó en condiciones de temporal en Junio de 1997, en dos sitios experimentales, con una pendiente de 1% en el sitio de Huexotla y de 3.6% en el sitio Nativitas. En ambos suelos, en años anteriores se sembraron maíz y frijol con labranza tradicional, obteniendo una cosecha por año. Los tratamientos de labranza se establecieron con diferentes implementos, fuerza de tracción y residuos en la superficie para la siembra del cultivo y se delimitaron las parcelas.

Las dimensiones de las parcelas experimentales del ejido Huexotla son de 30 x 100 m, donde se laboreó con tracción motriz, 15 x 100 m con tracción animal y 6 x 100 m con labranza cero. Las parcelas experimentales correspondientes al ejido Nativitas tienen las siguientes dimensiones: 44 x 70 m, donde se laboreó con tracción motriz, 20 x 70 m con tracción animal y 8 x 70 m con labranza cero. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, el diseño de tratamientos fue un factorial 2⁴; la distribución de las parcelas en el campo se muestra en el Cuadro 1. Para

Cuadro 1. Tratamientos estudiados en un suelo arcilloso y un suelo migajón arenoso.

Labranza tradicional				Labranza en franjas				Labranza cero	
Tracción motriz (A. de discos)		Tracción motriz (A. de cincel)		Tracción animal (A. reversible japonés)		Tracción animal (A. combinado)		Testigo	
Maíz	Frijol	Maíz	Frijol	Maíz	Frijol	Maíz	Frijol	Maíz	Frijol

caracterizar la estructura del suelo, se midieron varias propiedades físicas. Algunas se midieron antes y después de la siembra para observar el cambio del suelo y establecer cual tratamiento es mejor para la germinación de la semilla.

En el ciclo agrícola se sembraron maíz y frijol por separado, y se midieron algunos parámetros relacionados con la tasa de germinación y desarrollo inicial del cultivo. La labranza se ha asociado con el control de malezas, aunque los nuevos herbicidas, aun cuando son caros, son efectivos para combatir las malezas, pues en la actualidad existe maquinaria para siembra directa, la cual puede colocar las semillas de muchos cultivos dentro del suelo no disturbado. El objetivo de una máquina para la preparación de la cama de siembra es reducir los agregados del suelo a un tamaño que permita un estrecho contacto alrededor de la semilla sembrada, para fomentar el movimiento de la humedad y dejar una superficie escabrosa que se seque con rapidez y evite la germinación de semillas de malezas. En las operaciones de labranza se utilizó la maquinaria y equipo convencional; tractor de 84 HP, arado de tres discos, rastra de 18 discos, arado de cincales, yunta de animales (caballos), arado reversible japonés y arado combinado; se sembró manualmente con pala.

La muestra de suelo se obtuvo en cada parcela experimental; en esta área se colectaron cuatro muestras simples de manera sistemática a lo largo de la parcela a cada 25 m de separación, la profundidad de muestreo de suelo fue de 0 a 10 cm. También se obtuvieron muestras de suelo, con el fin de observar el contacto de la semilla con los agregados del suelo por el efecto de labranza, para lo cual se utilizaron como moldes, latas vacías de conservas, cuyas dimensiones son 8 cm de diámetro por 12 cm de largo, debido a que éstas tienen la ventaja de facilitar el muestreo.

En cada punto de muestreo del terreno se colocó el molde con la abertura perpendicular al suelo, después se fue golpeando uniforme hasta lograr su penetración total. Las muestras del suelo migajón arenoso se secaron en la estufa y las del suelo arcilloso mediante la adición de acetona, para mantener el estado

inalterado, y posteriormente se impregnaron con resina.

La siembra se efectuó del 20 al 24 de mayo de 1997. Se sembró material utilizado en la región, la variedad de maíz fue la San Berna con 97% de pureza y 98% de germinación en condiciones ideales. La variedad del frijol fue la Canario, la cual es recomendable para la zona, con 98% de pureza y 97% de germinación en condiciones ideales. El control de malezas se realizó con la aplicación de 1.5 L ha⁻¹ de Faena con una aspersora manual después de la siembra, para eliminar hierbas y pastos existentes. Para diagnosticar el efecto de labranza en el suelo se midieron ciertas características físicas de éste, como indicadores principales, las cuales reflejan el comportamiento del suelo en el tiempo por la labranza. La textura del suelo se determinó por el método del hidrómetro, cuya técnica se basa en la ley de Stokes. La densidad real se determinó utilizando el método del picnómetro y la densidad aparente mediante el método del cilindro. El arreglo estructural, para observar la distribución, el tamaño de agregados y la forma como queda sembrada la semilla, se estudió haciendo uso de láminas delgadas obtenidas de muestras impregnadas con resina poliéster. Las mediciones se efectuaron mediante el programa de cómputo Image-Pro Plus, versión 3.1 1997, adaptado a una cámara Hitachi KP-D51 y a un microscopio Olympus Bx-50.

La resistencia mecánica del suelo se define como una medida de la facilidad con la cual un objeto puede ser introducido o manejado dentro del suelo. Existen dos formas de estimarla, la resistencia a la penetración y la resistencia al corte del suelo, éstas se miden con un penetrómetro y una veleta de corte, respectivamente. La distribución del tamaño y la estabilidad de agregados se estiman mediante el método de tamizado en seco y húmedo, respectivamente. Con el tamizado en seco se calculó el coeficiente de estructuración del suelo (E) (Kaurichev, citado por Lomelí, 1996):

$$E = A/B$$

Donde:

E = Coeficiente de estructuración del suelo, adimensional

A = La suma de los agregados del tamaño desde 0.25 hasta 10 mm

B = La suma de los agregados <0.25 y mayores que 10 mm.

Cuanto mayor es el valor de E más estructurado estará el suelo. El estado estructural del suelo (EES) se evaluó desde un punto de vista agronómico, partiendo del peso de los agregados de tamaño óptimo (0.25 a 10 mm), entre el peso total de la muestra. Para expresar la distribución de tamaño de agregados se aplicó el parámetro denominado diámetro medio ponderado (DMP). La fracción erosionable por el viento (FEV) fue otro índice de agregación del suelo que se estimó a partir del tamizado en seco. La rugosidad del suelo se midió con el rugosímetro de agujas y se estimó multiplicando por 100 el logaritmo natural de la desviación estándar promedio de los valores obtenidos. La germinación se estimó contando las plantas que existen en una superficie de 1 a 25 m², efectuando repeticiones en distintos lugares de la parcela de control.

RESULTADOS Y DISCUSION

La labranza en las propiedades físicas del suelo constituye una de las características más importantes del mismo debido a que define el comportamiento físico de la estructura del suelo. La textura es una propiedad poco variable en el tiempo, en el sitio experimental Nativitas el suelo está constituido por 69.21% de arena, 22.44% de limo y 8.35% de arcilla,

se clasifica como migajón arenoso; este tipo de suelo es muy poroso y es fácilmente erosionable. En el sitio Huexotla, la textura del suelo está constituida por 14.5% de arena, 32.9% de limo y 52.6% de arcilla, por lo cual su clase textural es arcillosa; estos suelos presentan formación de costras en la superficie en el proceso de mojado y secado. Los valores de densidad real (Dr) variaron de 2.28 a 2.30 g cm⁻³, en el suelo arcilloso, y de 2.45 a 2.48 g cm⁻³, en el suelo migajón arenoso.

El contenido de humedad y la densidad aparente, cuando se evalúan diferentes sistemas de labranza, presentan una tendencia generalizada hacia mayores contenidos de humedad en los sistemas que ocasionan menor disturbio del suelo y con residuos en la superficie. Los resultados se muestran en el Cuadro 2, estos valores son promedios obtenidos de 10 observaciones por cada tratamiento. En los tratamientos con labranza en franjas y cero, se dejó de 60 a 70% de residuos sobre la superficie del suelo y en labranza tradicional los residuos se sacaron del terreno antes del laboreo; a esto se le atribuye el mayor contenido de humedad en los tratamientos con residuos después del laboreo.

La prueba de Tukey, con $P < 0.05$, se realizó después del laboreo del suelo, las letras iguales indican que no existió diferencia significativa. La pérdida de humedad en el suelo arcilloso después de cinco días del laboreo fue mayor en los tratamientos LTD y LTJ, de 62 y 46%, respectivamente, que es donde se pulveriza demasiado el suelo y corresponden a la labranza tradicional. En los tratamientos de labranza en franjas LFC y LFA, la humedad perdida después de la preparación del suelo fue de 35 y 44%, la labranza

Cuadro 2. Densidad aparente y porcentaje de humedad en dos suelos antes y después del laboreo.

Tratamiento	Suelo arcilloso				Suelo migajón arenoso			
	Humedad		Densidad aparente		Humedad		Densidad aparente	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
	----- % -----		----- g cm ⁻³ -----		----- % -----		----- g cm ⁻³ -----	
LTD	32.28	12.25 a	1.18	0.92 a	14.86	7.97 a	1.24	1.12 a
LTJ	29.99	15.96 a	1.07	0.96 a	14.48	5.58 a	1.26	1.12 a
LFC	33.03	21.19 b	1.09	1.01 b	16.64	12.43 b	1.23	1.14 a
LFA	32.32	17.80 b	1.04	0.98 b	14.18	11.41 b	1.24	1.16 a
LC	33.52	31.29 c	1.11	1.12 c	13.36	12.72 b	1.26	1.25 b

Tukey ($P < 0.05$). Tratamientos con distinta letra son diferentes.

LTD = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción motriz con arado y rastra de discos).

LTJ = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción animal con arado reversible japonés).

LFC = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción motriz con arado de cincel).

LFA = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción animal con arado combinado).

LC = Labranza cero (sin movimiento del suelo).

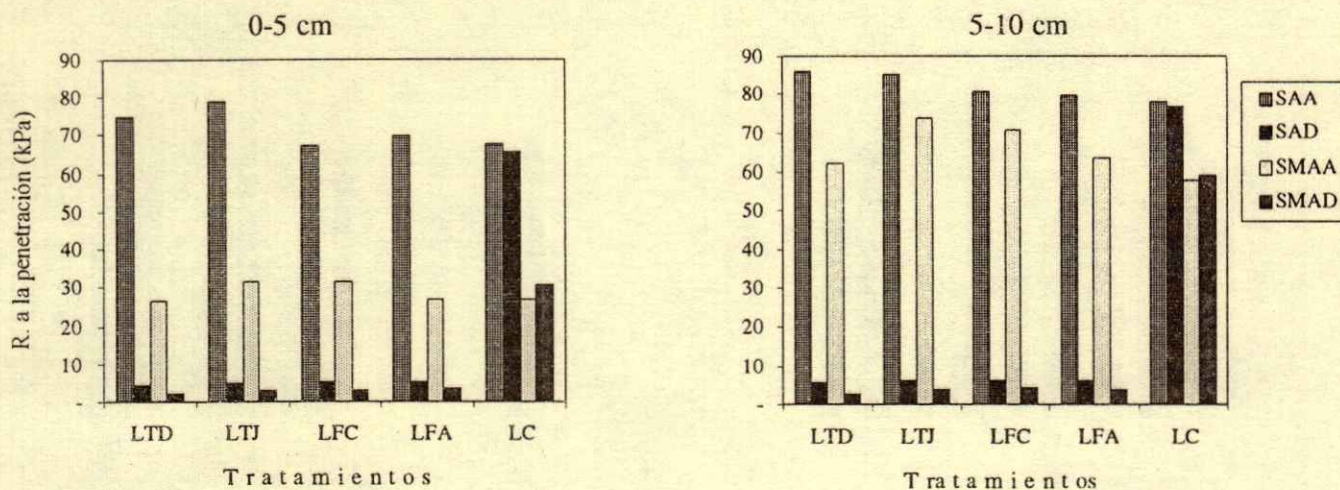


Figura 1. Resistencia a la penetración en (kPa), 0 a 5 y de 5 a 10 cm de profundidad en dos suelos.

SAA = Suelo arcilloso antes del laboreo; SAD = Suelo arcilloso después del laboreo; SMAA = Suelo migajón arenoso antes del laboreo; SMAD = Suelo migajón arenoso después del laboreo; LTD = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción motriz con arado y rastra de discos); LTJ = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción animal con arado reversible japonés); LFC = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción motriz con arado de cincel); LFA = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción animal con arado combinado); LC = Labranza cero (sin movimiento del suelo).

cero LC tuvo una pérdida de humedad de 6%. Esta cantidad menor se debe a la presencia del residuo en la superficie y a la no remoción del suelo. En el suelo migajón arenoso, la pérdida de humedad del suelo fue de 61 y 46% para los tratamientos LTD y LTJ, respectivamente, 25 y 20% en los tratamientos LFC y LFA; mientras que en el tratamiento LC, la pérdida de humedad fue de solamente 5%. Por lo tanto, el contenido de humedad puede mantenerse por más tiempo en el sistema de labranza en franjas y labranza cero, lo cual se logra con un menor o nulo grado de perturbación y con residuos en la superficie del suelo.

La prueba de Tukey ($P < 0.05$) mostró que el contenido de humedad en el suelo arcilloso, después del laboreo en los tratamientos LTD y LTJ, no presentó diferencias significativas entre ellos; los tratamientos LFC y LFA se comportaron de la misma manera, y el tratamiento LC fue el que conservó mayor humedad en el suelo. Es decir, entre los sistemas de labranza tradicional, labranza en franjas y labranza cero existieron diferencias significativas independientemente del tipo de tracción e implementos utilizados. En el suelo migajón arenoso, los tratamientos con LFC, LFA y LC no mostraron diferencias significativas entre ellos después de la preparación del suelo, los tratamientos con LTD y LTJ también fueron similares, pero mayores que los tres tratamientos anteriores, es decir,

en este suelo únicamente se encontraron dos grupos diferentes en lo que se refiere al contenido de humedad.

La densidad aparente, en el suelo arcilloso, en los tratamientos LTD y LTJ, se redujo en 22 y 10%, respectivamente, en 7 y 12% en los tratamientos LFC y LFA, en LC permaneció constante. En el suelo migajón arenoso, la densidad aparente, en los tratamientos con LTD y LTJ, se redujo en 10 y 12%, respectivamente, y en 8 y 7% en los tratamientos LFC y LFA, respectivamente, y en LC se mantuvo constante. La prueba de Tukey mostró que los valores de densidad aparente del suelo arcilloso en los tratamientos LTD y LTJ son similares, de la misma manera ocurre con los tratamientos de LFC y LFA y, finalmente, el tratamiento LC; en consecuencia, existieron tres diferencias significativas con una probabilidad ($P < 0.05$). Al realizar las pruebas de Tukey sobre la densidad aparente en el suelo migajón arenoso, se observó que los tratamientos LTD, LTJ, LFC y LFA tuvieron comportamientos similares, pero mostraron diferencia significativa con el tratamiento LC, esto indica que en los suelos arenosos con cualquier tipo de labranza se logra el mismo efecto en la densidad aparente.

Para estimar el grado de compactación del suelo, se midió la resistencia a la penetración y al corte del suelo, lo cual depende principalmente del contenido de

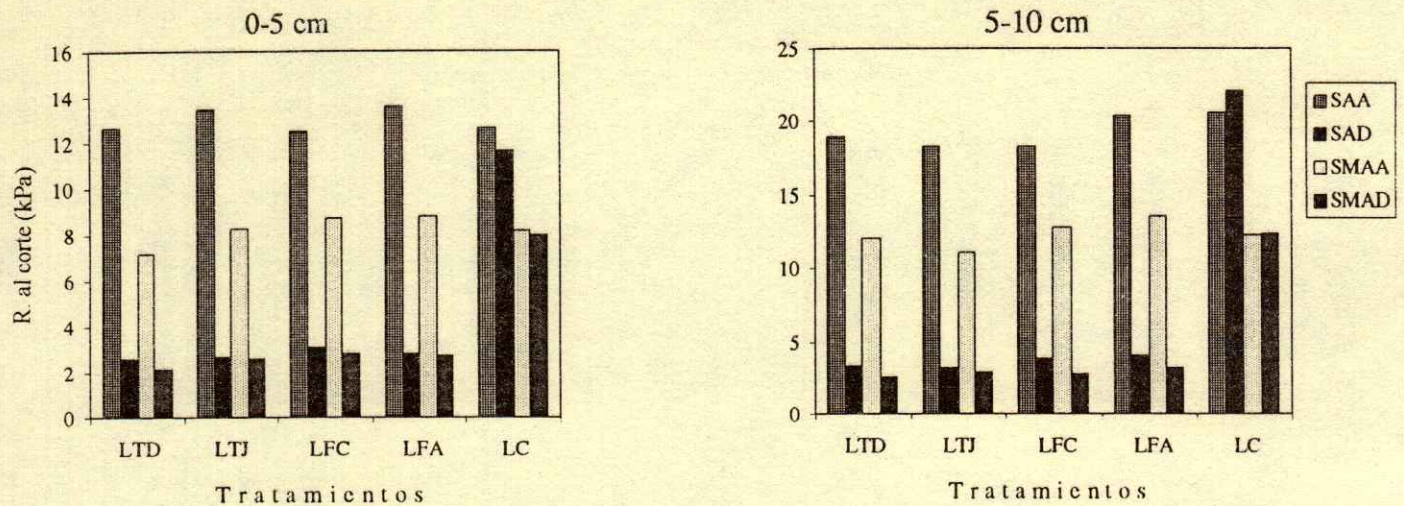


Figura 2. Resistencia al corte (kPa), de 0 a 5 y de 5 a 10 cm de profundidad en dos suelos.

SAA = Suelo arcilloso antes del laboreo; SAD = Suelo arcilloso después del laboreo; SMAA = Suelo migajón arenoso antes del laboreo; SMAD = Suelo migajón arenoso después del laboreo; LTD = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción motriz con arado y rastra de discos); LTJ = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción animal con arado reversible japonés); LFC = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción motriz con arado de cincel); LFA = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción animal con arado combinado); LC = Labranza cero (sin movimiento del suelo).

humedad, la textura y el tipo de arcilla (Baver *et al.*, 1980). En el suelo arcilloso y a la profundidad de 0 a 5 cm, los valores fueron mayores hasta 50% que los del suelo migajón arenoso. A la profundidad de 5 a 10 cm, la resistencia sigue siendo mayor hasta 30%. La resistencia a la penetración en el suelo arcilloso es mayor debido a las características propias de estos suelos. Esto se debe a la presencia de partículas finas de arcillas que se unen o atraen unas con otras y forman agregados del suelo, mientras que en el suelo migajón arenoso este enlace se da muy débilmente por la presencia de partículas gruesas como las arenas.

En la Figura 1 se observa que la resistencia a la penetración antes de la labranza es mayor en ambos suelos y que, después del laboreo del suelo, disminuyó considerablemente. En el sistema tradicional, donde se emplearon el barbecho y el rastreo, la resistencia disminuyó en la capa arable (10 cm) hasta 95% del valor inicial. En el suelo arcilloso, la labranza en franjas disminuyó la resistencia del suelo hasta 94% (en la parte donde se laboreó). En el suelo migajón arenoso, ésta disminuyó 96% su resistencia a la penetración. Las pruebas de Tukey, con $P < 0.05$, indican que existe diferencia significativa donde hay perturbación del suelo y donde se usa labranza cero. Existe diferencia a la resistencia al corte entre los dos tipos de suelos, presentando valores más altos el suelo

arcilloso que el migajón arenoso en las dos profundidades.

En la Figura 2 se observa que la resistencia al corte del suelo aumentó con la profundidad. Al hacer la comparación de medias, se encontró que la labranza cero (LC) fue diferente a los sistemas de labranza tradicional y en franjas, y esto se debe a que no hubo remoción del suelo. La labranza en franjas no modificó la estructura del suelo, sin embargo, no muestra diferencia con la labranza tradicional en donde se invirtió toda la capa arable, debido a que las mediciones se hicieron en el lugar donde se laboreó el suelo y no donde los cincelos no cortaron el suelo.

La distribución y estabilidad de agregados del suelo se determinaron después de la preparación de la cama de siembra; estos parámetros se estiman mediante el tamizado en seco y en húmedo. Los índices de agregación relacionados con la estructura del suelo (tamizado en seco) se muestran en el Cuadro 3, donde se observa el cambio del suelo después del laboreo en cada uno de los tratamientos de labranza.

La estructura del suelo arcilloso, con base en los datos obtenidos de DMP, es estable en cada uno de los tratamientos, aunque con LFC y LTJ los valores son mayores que los otros. No existió diferencia entre los tratamientos del mismo suelo, lo cual se debe a los altos contenidos de arcilla y de materia orgánica que

Cuadro 3. Indices de agregación obtenidos a partir del tamizado en seco.

Suelo	Trata- miento	DMP	E	FEV	EES
		mm		--- % ---	
Arcilloso	LTD	3.89	2.28	29.01	83.51
	LTJ	4.36	3.59	19.16	90.74
	LFC	4.05	3.86	20.92	90.21
	LFA	3.85	4.36	21.49	89.41
	LC	3.92	3.89	21.45	89.88
Migajón arenoso	LTD	1.47	0.57	73.53	36.74
	LTJ	1.27	0.36	80.02	32.24
	LFC	1.19	0.48	74.41	42.16
	LFA	1.56	0.46	74.40	38.89
	LC	1.38	0.56	73.16	40.83

DMP = Diámetro medio ponderado. E = Coeficiente. La unidad de (E) es adimensional y el significado es que cuanto mayor es el valor de E más estructurado será el suelo.

FEV = Fracción erosionable por el viento.

EES = Estado estructural del suelo.

LTD = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción motriz con arado y rastra de discos).

LTJ = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción animal con arado reversible japonés).

LFC = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción motriz con arado de cincel).

LFA = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción animal con arado combinado).

LC = Labranza cero (sin movimiento del suelo).

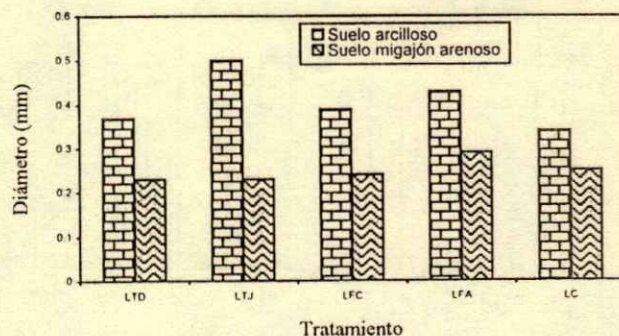
posee. En el suelo migajón arenoso, la estabilidad estructural, de acuerdo con los datos obtenidos del DMP, se clasifica como ligeramente estable, esto se debe principalmente al alto contenido de arena y bajo contenido de materia orgánica presentes en el suelo. Cabe mencionar que en el tratamiento con LC, el DMP fue menor que en los tratamientos con LTD y LFA, esto quiere decir que estos suelos, por su naturaleza misma, son ligeramente estables, aunque no se les realice ningún tipo de labranza, como es el caso de la labranza cero. En el suelo arcilloso, con LTD el coeficiente de estructuración del suelo E fue menor y con LFA este coeficiente fue mayor; en el tratamiento con LC, fue similar a LFC. En general, el suelo migajón arenoso tiene menor coeficiente de estructuración que el suelo arcilloso, aunque para este tipo de suelo no existe diferencia dentro de los tratamientos, incluso al comparar el tratamiento de LC con LTD. El estado estructural del suelo (EES) es otro índice que se calcula a partir del tamizado en seco. En este aspecto, puede observarse que para el suelo arcilloso no hubo diferencia en todos los tratamientos y su estado estructural se clasifica como excelente,

aunque con LTD este valor fue menor que en los otros tratamientos.

En el suelo migajón arenoso, su estado estructural fue satisfactorio en los tratamientos LFC y LC, pero en los tratamientos con LTD, LTJ y LFA no fue satisfactorio (Kaurichev, 1984), lo cual se corrobora por el hecho de que estos suelos mantienen un mejor estado estructural en sitios sin perturbar o con poco movimiento del suelo, como es el caso de la labranza en franjas.

La fracción erosionable por el viento (FEV) es otro índice de agregación del suelo que se estima a partir del tamizado en seco. En el suelo arcilloso, con los diferentes tipos de labranza aplicados al suelo, no se presentaron problemas con la erosión por el viento, ya que las partículas menores que 0.84 mm no excedieron 60%, lo cual es el punto crítico para favorecer a la erosión, aunque con LTD el porcentaje fue mayor. En el suelo migajón arenoso, todos los tratamientos excedieron 60% de fracciones erosionables por el viento, independiente del tipo de labranza, incluso en LC, donde no existe remoción del suelo.

Las láminas delgadas se usaron para cuantificar el tamaño de agregados producidos por los diferentes sistemas de labranza en la preparación de la cama de siembra. De acuerdo con la Figura 3, el suelo arcilloso con LTJ produjo agregados de mayor tamaño, seguido del tratamiento con LFA, LFC, LTD y, finalmente,


Figura 3. Diámetro de agregados (mm) en dos suelos con diferentes tipos de labranza.

LTD = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción motriz con arado y rastra de discos).

LTJ = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción animal con arado reversible japonés).

LFC = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción motriz con arado de cincel).

LFA = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción animal con arado combinado).

LC = Labranza cero (sin movimiento del suelo).

LC. En el suelo migajón arenoso, la cuantificación de agregados todavía fue mucho menor que en el suelo arcilloso, e incluso se observó en el microscopio que en este tipo de suelo existían partículas aisladas unas de otras. En el tratamiento con LFA, se obtuvieron agregados de mayor tamaño seguido de los tratamientos LC, LTD, LTJ y LFC.

En la Figura 4 se muestra la rugosidad superficial del suelo, parámetro que indica la facilidad con que puede erosionarse el suelo por la escorrentía del agua de lluvia. En el tratamiento LTD, el suelo arcilloso quedó más rugoso que el suelo migajón arenoso. En el tratamiento LC, el suelo arcilloso tuvo un valor de rugosidad más alto que el suelo migajón arenoso, pero cabe aclarar que esto se debió a la presencia de surcos de la cosecha anterior. En los otros tratamientos no hubo diferencia de un suelo con respecto al otro. Por lo tanto, en general, puede afirmarse que el surcado mantiene más rugoso el suelo lo cual evita la erosión por el agua de lluvia.

Una buena siembra es uno de los requisitos fundamentales para obtener una buena cosecha. Por lo tanto, antes de sembrar deben considerarse aspectos como la forma de preparar el terreno, el tipo de semilla, la época, la densidad y los métodos de siembra. La densidad de siembra en este experimento fue de 120 000 plantas por hectárea, tanto para el cultivo de maíz como para el frijol, con el objetivo

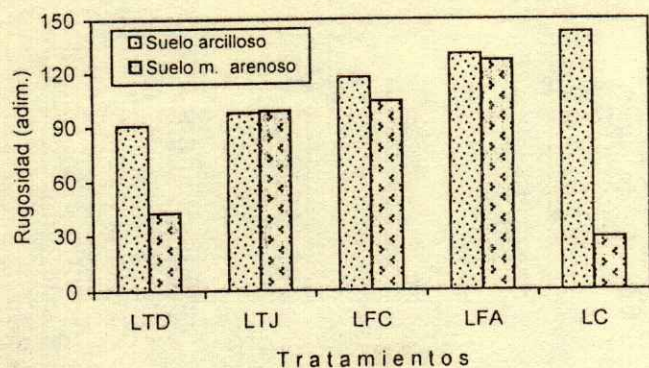


Figura 4. Comportamiento de la rugosidad del suelo con diferentes tipos de labranza.

LTD = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción motriz con arado y rastra de discos).

LTJ = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción animal con arado reversible japonés).

LFC = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción motriz con arado de cincel).

LFA = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción animal con arado combinado).

LC = Labranza cero (sin movimiento del suelo).

de tener una cobertura más rápida del suelo, evitando así la pérdida de humedad y protegiendo el suelo de agentes erosivos. El Cuadro 4 muestra la germinación del maíz y frijol. En el suelo arcilloso con LTD, la emergencia de la planta fue buena con 92.8 y 90%, respectivamente, aunque es pertinente comentar que en los primeros días la germinación fue cero, es decir, con este tipo de labranza el suelo pierde fácilmente su humedad; sin embargo, después de presentarse las lluvias, las plantas emergieron uniformemente. Un caso similar sucedió con LTJ y, por lo mismo, se deduce que en los tratamientos con remoción del suelo se presenta este problema. Bajo el sistema de labranza en franjas con LFC y LFA, la germinación del maíz y frijol fue mayor en comparación con la labranza tradicional. En el caso de la labranza cero, las plantas emergieron en perfectas condiciones. En LC, la germinación del maíz y frijol tuvo un porcentaje de 90.0 y 94.3, lo cual fue superior que con LTJ; es decir, la planta emergió bien aun sin la labranza del suelo. Al efectuar la prueba de Tukey, no se encontraron diferencias significativas en los tratamientos del suelo arcilloso.

En el suelo migajón arenoso, la germinación fue similar en todos los tratamientos; en el caso del maíz, la germinación con LTD y LFC fue de 95 y 94.3%,

Cuadro 4. Germinación y crecimiento inicial del maíz y frijol en dos suelos.

Tratamiento	Suelo arcilloso		Suelo migajón arenoso	
	Germinación %	Altura cm	Germinación %	Altura cm
LTDm	92.9	89.5	95.0	80.5
LFCm	94.3	104.2	94.3	79.4
LTJm	89.3	88.0	88.6	79.3
LFAm	95.0	91.0	95.0	79.6
LCm	92.9	88.8	90.0	79.8
LTDf	90.0	29.0	90.7	30.4
LFCf	93.6	31.1	94.3	30.3
LTJf	88.6	30.2	90.7	29.7
LFAf	93.6	31.0	93.6	30.0
LCf	94.3	30.3	92.1	30.4

m = maíz; f = frijol.

LTD = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción motriz con arado y rastra de discos).

LFC = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción motriz con arado de cincel).

LTJ = Labranza tradicional con inversión del suelo (tracción animal con arado reversible japonés).

LFA = Labranza en franjas con residuos, sin invertir el suelo (tracción animal con arado combinado).

LC = Labranza cero (sin movimiento del suelo).

respectivamente. En el caso de LTJ, se obtuvo 88.6% de germinación, que es inferior al obtenido en los demás tratamientos. A pesar de estas pequeñas discrepancias, no hubo diferencia significativa en los diferentes tipos de labranza. La emergencia del frijol en los tratamientos LFC y LFA fue de 94.3 y 93.6%, respectivamente; en los tratamientos con LTD y LTJ la germinación fue similar (90.7%) y en el caso de LC la germinación obtenida fue de 92.14%. Al igual que en el suelo arcilloso, no se encontró diferencia significativa en los tratamientos del suelo migajón arenoso.

La altura del cultivo se midió a 55 días de la siembra y los datos se presentan en el Cuadro 4. En todos los tratamientos del suelo arcilloso, el crecimiento fue favorable. En el caso del cultivo del maíz, la altura en LC fue muy similar o casi igual a la alcanzada con LTJ (80.8 y 80.0 cm, respectivamente). En el tratamiento con LFC y LFA, la planta mostró un mejor desarrollo y vigor, que corresponde a la modalidad de labranza en franjas, alcanzando una altura de 104.2 y 91.0 cm, respectivamente. En el cultivo del frijol, la altura que alcanzó la planta antes de la floración fue muy similar en todos los tratamientos de labranza. En el suelo migajón arenoso, todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales.

CONCLUSIONES

Los tratamientos de labranza tuvieron efectos sobre algunas variables del suelo, pero no se reflejaron en la germinación y desarrollo del maíz y frijol.

El contenido de humedad en el suelo fue mayor en los sistemas de labranza que remueven menos el suelo, y además mantienen los residuos de cosecha anterior sobre la superficie del terreno.

La densidad aparente del suelo se modifica con cualquier tipo de labranza y sólo se mantiene inalterable con el sistema de labranza cero.

Cualquier tipo de labranza modifica la resistencia a la penetración y al corte en la capa arable del suelo.

Cualquier sistema de labranza modifica la estructura del suelo y, dependiendo del contenido de humedad de éste, la labranza favorece o destruye la estructura, repercutiendo en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

La rugosidad del suelo evita la erosión por el agua de lluvia, independientemente de la textura del suelo.

LITERATURA CITADA

- Baver, L.D., W.H. Gardner y W.R. Gardner. 1980. Física de suelos. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. México.
- Braunack, M.V. y A.R. Dexter. 1989. Soil aggregation in the seedbed: a review. II. Effect of the aggregate sizes on plant growth. *Soil Tillage Res.* 14: 281-298.
- Cruz, L.A. 1991. Guía de instrumentos agrícolas. Muestra permanente. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Cruz, L.A. 1992. El papel de la tracción animal en la producción agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Figueroa S., B. y E. Ventura R. Jr. 1990. Instructivo para la evaluación del proyecto. Efecto de la labranza en la estructura del suelo y su relación con el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Salinas, San Luis Potosí, México.
- Figueroa S., B. y F.J. Morales F. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. Colegio de Postgraduados. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Montecillo, México.
- Hunt, D. 1991. Maquinaria agrícola. Rendimiento económico, costos, operaciones, potencia y selección de equipo. Limusa. México.
- Kaurichev, I.S. 1984. Prácticas de edafología. Traducido del ruso por Esther Vicente. Mir. Moscú, Rusia.
- Lomeli G., V. 1996. Cambios antropogénicos de los Vertisoles de la cuenca del arroyo Ucum, Quintana Roo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Russell, E.W. 1973. Soil conditions and plant growth. 10th ed. Longman. London, England.

FERTILIZACION EN PAPA Y SU EFECTO RESIDUAL EN MAIZ, EN DOS AGROSISTEMAS DE LA SIERRA VERACRUZANA

Fertilization on Potato and its Residual Effect on Corn in Two Agrosystems of the Sierra Veracruzana

José Luis Aguilar Acuña¹, Rosalío López Morgado², Víctor Volke Haller³ y
Abdul Khalil Gardezi³

RESUMEN

Dentro del objetivo general de incrementar la productividad de la tierra, se efectuaron dos ensayos sobre siembra de maíz como cultivo tradicional imbricado en el cultivo de papa en dos agrosistemas fisiográficos de la Sierra Veracruzana, con los objetivos de: a) determinar la respuesta de dos variedades de papa a la aplicación de dosis de N, P y K en dos agrosistemas fisiográficos (Chic y Nao) de la región de Naolinco, Veracruz; b) cuantificar el efecto residual de los tratamientos de fertilización aplicados al cultivo de papa sobre el rendimiento de maíz imbricado; c) determinar la viabilidad económica del sistema de cultivo múltiple; y d) verificar si los agrosistemas fisiográficos delimitados para el cultivo de maíz son válidos para la papa. Los resultados indican la mayor capacidad productiva de la variedad Tollocan (13.4 t ha⁻¹) con respecto a la variedad Puebla (10.4 t ha⁻¹) en los dos agrosistemas fisiográficos. Esta diferencia es mayor en el agrosistema Chic, con rendimientos de 16.9 y 11.2 t ha⁻¹ para Tollocan y Puebla, respectivamente. La ausencia de la interacción agrosistema x tratamientos de fertilización sugiere que los agrosistemas no difieren de la respuesta a los fertilizantes. Con el análisis gráfico, la variedad Tollocan produjo mayor rendimiento de tubérculos con la dosis 80-200-80 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente; sin embargo, es conveniente estudiar dosis más elevadas de fósforo; en cambio, con la variedad Puebla resultó la dosis 80-150-50 kg ha⁻¹

de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente. El efecto residual de la fertilización aplicada en el cultivo de papa incrementó el rendimiento de maíz de 1.6 a 4.9 t ha⁻¹ y de 1.1 a 4.4 t ha⁻¹ con el tratamiento 120-100-100 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente, en las variedades de papa Tollocan y Puebla, respectivamente, en el agrosistema fisiográfico Nao, ya que en el agrosistema Chic el productor cooperante no permitió la evaluación del experimento. La dosis óptima de fósforo para papa es suficiente para satisfacer los requerimientos del maíz, pero no las dosis de nitrógeno y de potasio, por lo que es conveniente adicionar cuando menos 40 y 30 kg de N y K₂O ha⁻¹ al cultivo de maíz para maximizar el rendimiento de las dos especies. El máximo ingreso neto + costos fijos (INCF) y la mayor tasa de retorno al capital variable (TRCV) se obtienen con el tratamiento 80-200-50 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente, con la variedad Tollocan. El análisis de varianza combinado aportó evidencia experimental de que los dos agrosistemas fisiográficos para maíz estratifican las condiciones de producción también para el cultivo de papa.

Palabras clave: Solanum tuberosum, efecto residual de fertilizantes, Zea mays, sistema de cultivo múltiple, patrón de cultivo múltiple, estratificación fisiográfica.

SUMMARY

Within the general objective to increase the productivity of the land, two trials were established on corn sown as traditional imbricate crop in the potato crop in two physiographic agrosystems of the 'Sierra Veracruzana'. The objectives were: a) to determine the response of two varieties of potato to the application of N, P, and K in two physiographic agrosystems (Chic and Nao) of the region Naolinco, Veracruz; b) to quantify the residual effect of the fertilization treatments applied to the potato crop on the imbricated

¹ Campo Experimental Bajío, INIFAP, Apartado Postal 112, 38110 Celaya, Gto.

² Campo Experimental Auxiliar Xalapa, INIFAP, Apartado Postal 540, Xalapa, Ver.

³ Especialidad de Edafología, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Méx.

Recibido: Julio de 1999.

Aceptado: Abril de 2000.

corn yield; c) to determine the economic viability of the multiple crop system; and d) to verify whether the physiographic agrosystems delimited for corn crop are valid for potato. The results indicate that the variety Tollocan has a greater productive capacity (13.4 t ha^{-1}) with respect to the variety Puebla (10.4 t ha^{-1}), in the two physiographic agrosystems. This difference is greater in the agrosystem Chic, with yields of 16.9 t ha^{-1} and 11.2 t ha^{-1} for Tollocan and Puebla, respectively. The absence of the interaction agrosystem \times fertilization treatments suggests that agrosystems do not defer to the response to fertilizers. The graphic analysis shows that the variety Tollocan produces a higher tuber yield with the dose $80-200-80 \text{ kg ha}^{-1}$ of N, P_2O_5 and K_2O , respectively; however, it is convenient to study higher doses of phosphorus; on the other hand, with the variety Puebla resulted the dose $80-150-50 \text{ kg ha}^{-1}$ of N, P_2O_5 , and K_2O , respectively. The residual effect of the applied fertilization on the crop, increased the corn yield from 1.6 to 4.9 t ha^{-1} and from 1.1 to 4.4 t ha^{-1} with the treatment $120-100-100 \text{ kg ha}^{-1}$ of N, P_2O_5 , and K_2O , respectively, in the potato varieties Tollocan and Puebla, in the physiographic agrosystem Nao, since in the agrosystem Chic the co-operating producer did not permit the evaluation of the experiment. The optimum phosphorus dose for potato is sufficient to satisfy the corn's requirements, but not the nitrogen and potassium doses, therefore it is convenient to add at least 40 and 30 kg ha^{-1} of N and K_2O , respectively, to the corn crop to maximize the yield of the two species. The maximum INCF and the greater TRCV are obtained with the treatment $80-200-50 \text{ kg ha}^{-1}$ of N, P_2O_5 , and K_2O , respectively, with the variety Tollocan. The combined variance analysis provided the experimental evidence that the two physiographic agrosystems for corn stratify the production conditions for the potato crop as well.

Index words: *Solanum tuberosum*, *residual fertilizer effect*, *Zea mays*, *multiple crop system*, *multiple crop pattern*, *physiographic stratification*.

INTRODUCCION

En la región de Naolinco, en la Sierra Veracruzana, el cultivo de maíz criollo ocupa el terreno de nueve a 10 meses del año, lo que representa una baja productividad de la tierra. Esta baja

productividad se puede aumentar sembrando otro cultivo previo al de maíz, como papa, con lo cual se intensificaría el uso de la tierra en espacio y tiempo (Andrews y Kassam, 1976; Turrent, 1979a; Márquez, 1981; Manrique, 1996), por lo que puede explorarse el patrón de cultivo papa imbricado (Turrent, 1979a; Márquez, 1981) con maíz. Papendick *et al.* (1976) señalaron que, en muchas áreas, la mejor alternativa para incrementar la producción de alimentos es desarrollar y aplicar nuevas tecnologías en sistemas de cultivos múltiples.

De acuerdo con Manrique (1996), generalmente, existen dos líneas utilizadas para encontrar las necesidades de fertilizar a sistemas de cultivo múltiple: 1) la aplicación basada en la suma de nutrimentos necesarios para los cultivos individuales (Sharma *et al.*, 1993); y 2) la aplicación basada en los requerimientos nutrimentales del cultivo principal. Esta última está enfocada en que los requerimientos nutrimentales del cultivo principal esencialmente son los mismos, tanto para los cultivos individuales como para el sistema de cultivo múltiple (Ahmad y Rao, 1982). El problema es que las dosis de fertilizante para el cultivo principal pueden ser demasiado altas o bajas para el cultivo acompañante (Oelsgle *et al.*, 1976).

Por otro lado, los suelos de la región son derivados de cenizas volcánicas, los cuales se caracterizan por su capacidad de reaccionar rápidamente con grandes cantidades de fósforo, en particular en condiciones ácidas (Egawa, 1980) y, en consecuencia, la disponibilidad del fósforo de los fertilizantes fosfatados solubles para las plantas es fuertemente reducida, llegando a sólo alrededor de 10% del P aplicado al suelo, por lo que la papa obtiene una respuesta positiva a la aplicación de fósforo (McCollum, 1978) en estos suelos.

Sin embargo, el fósforo es un elemento relativamente inmóvil en la mayoría de los suelos y no se mueve muy lejos del punto de aplicación, de 2 a 3 cm desde el gránulo del fertilizante, y reacciona con los componentes del suelo, lo cual detiene su movimiento (Phillips y Webb, 1971). Por lo tanto, la absorción de fósforo por el cultivo depende, en estos casos, del desarrollo y de la morfología de su sistema radical. Por otro lado, la planta de papa tiene un ciclo de crecimiento más corto y un sistema radical más limitado que el del maíz y otros cultivos, por lo que el cultivo de papa tiene una alta dependencia del suplemento de fertilizante fosfórico (McCollum, 1978).

Por ello, los objetivos planteados en la presente investigación fueron: a) explorar la respuesta de dos variedades de papa a la aplicación de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio en dos agrosistemas de la región de Naolinco, Veracruz; b) cuantificar el efecto residual de los tratamientos de fertilización aplicados a la papa sobre el maíz imbricado; c) determinar la viabilidad económica del sistema de cultivo múltiple; y d) estratificar las condiciones de producción para el cultivo de papa en agrosistemas mediante el levantamiento fisiográfico.

MATERIALES Y METODOS

La región de Naolinco se ubica entre los meridianos 96°45' y 97°00' longitud oeste y entre los paralelos 19°07' y 19°45' latitud norte. Forma parte de la vertiente oriental de la Sierra Madre Oriental y del Eje Neovolcánico, a esta confluencia en el estado se le conoce como Sierra Veracruzana o región de las grandes montañas que culmina con el Pico de Orizaba [5747 metros sobre el nivel del mar (msnm)] y el Cofre de Perote (4282 msnm).

De acuerdo con las estaciones meteorológicas de Naolinco y Chiconquiaco, el clima es templado húmedo, las precipitaciones se concentran de junio a octubre en 75%, y de mayo a noviembre en 81%, respectivamente.

Las diferentes condiciones de suelo y clima de la región de Naolinco, Ver., generan diversos agrosistemas (Turrent, 1978; 1979b). A este respecto, Aguilar y Ortiz (1987) identificaron dos grandes agrosistemas definidos por la fisiografía: a) la fisiografía Naolinco (Nao), caracterizada por tener un relieve ondulado con pendientes de suaves a moderadas, altitudes de 1300 a 1700 m y predominancia de Andosol, con precipitación anual de 1300 mm y temperatura media anual de 18 °C; y b) la fisiografía Chiconquiaco (Chic), caracterizada por poseer un relieve más accidentado, con pendientes de moderadas a fuertes en general, aunque también se localizan pendientes suaves en las hondonadas al pie de los lomeríos cerriles, altitudes de 1700 a 2300 m, predominancia de la asociación de suelos Andosol-Luvisol (FAO/UNESCO/ISRIC, 1988), con precipitación anual de 1800 mm y temperatura media anual de 13 °C.

El ámbito de las variables edáficas son: materia orgánica de 3 a 30.3%, nitrógeno total de 0.2 a 1.0%,

fósforo (Bray I) de 0 a 9.4 mg kg⁻¹, potasio de 42 a 1500 mg kg⁻¹, calcio de 298 a 4300 mg kg⁻¹, y magnesio de 7 a 343 mg kg⁻¹ (Aguilar, 1985).

La frecuencia de los principales patrones de cultivo que se practican en la región de Naolinco (Aguilar, 1982) son: maíz intercalado con frijol arbustivo (38%), maíz en unicultivo (30%), maíz asociado con frijol de guía (21%), papa imbricado con maíz (2%), y el 9% restante con otros cultivos. Los rendimientos de maíz, solo o asociado con frijol de guía, fluctúan de 1.3 a 5.6 t ha⁻¹, fertilizados con 80-40-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, respectivamente.

Diseño de Tratamientos y Diseño Experimental

Se condujeron dos experimentos, uno en el agrosistema fisiográfico Nao y otro en el agrosistema Chic, mismos que incluyen los factores y niveles siguientes: a) las variedades de papa Tollocan y Puebla; b) nitrógeno, en dosis de 80 y 120 kg ha⁻¹; c) fósforo, en dosis de 100 y 200 kg de P₂O₅ ha⁻¹; y d) potasio, en dosis de 50 y 100 kg de K₂O ha⁻¹.

El diseño de tratamientos fue un factorial en un arreglo de parcelas subdivididas, en donde la parcela grande consideró dos agrosistemas fisiográficos, la parcela intermedia correspondió a dos variedades de papa, y la parcela chica al factorial 2³ para los factores nitrógeno, fósforo y potasio, más un testigo absoluto. Los sitios experimentales tenían un pendiente de menos de 8%.

Las variedades de papa, Tollocan y Puebla, fueron generadas por el INIFAP, para las condiciones serranas y de temporal de los estados de México y Puebla, respectivamente. Son tolerantes al tizón tardío (*Phytophthora infestans*) y de ciclo intermedio (120-130 días). Tollocan tiene la cutícula blanca y Puebla cutícula roja. No se hicieron aplicaciones de fungicidas.

Los tratamientos de fertilización se aplicaron al cultivo de papa (como cultivo principal), las unidades experimentales se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Como fuentes de los fertilizantes se usó urea (46% de N), superfosfato de calcio triple (46% de P₂O₅) y cloruro de potasio (60% de K₂O).

La parcela útil para papa constó de dos surcos de 7 m de largo, espaciados a 0.8 m y con una separación entre matas de 0.5 m; en maíz se utilizaron 10 matas, espaciadas a 0.75 m con tres plantas por mata.

contenidas entre los dos surcos útiles de papa. Con esto se obtuvo una población de 25 mil plantas de papa ha^{-1} y de 50 mil plantas ha^{-1} de maíz, poblaciones que se manejan en unicultivo.

La variable evaluada fue el rendimiento de tubérculo total para papa y de grano para maíz, independientes. Para efectos de los análisis estadísticos se usó el peso fresco total de los tres tamaños de papa y el grano de maíz a 14% de humedad. Para evaluar las dosis de N, P_2O_5 y K_2O en el sistema de cultivo múltiple, se hizo un análisis económico mediante el procedimiento discreto para capital ilimitado y limitado (Volke, 1982).

Conducción del Patrón de Cultivo Múltiple Papa Imbricado con Maíz

La preparación del terreno se hizo con equipo de tracción animal, utilizando el arado egipcio de madera con punta metálica, y consistió en "rayar", cruzar y surcar en la primera semana de enero de 1990.

Para minimizar la competencia entre especies y maximizar la utilización del espacio y el tiempo, se sembró la papa como cultivo principal, del 10 al 15 de enero de 1990 en suelo con humedad residual, depositando un tubérculo en el fondo del surco y aplicando a un lado de cada tubérculo el tratamiento de fertilizante en una sola oportunidad. A fines de febrero, después de la emergencia, se hizo la primera escarda, y a fines de marzo se efectuó el atierre y al siguiente día de esta labor, cuando la papa se encontraba al inicio de la floración, se sembró el maíz criollo como cultivo secundario, entre las líneas o surcos de papa, sin fertilizarse durante su ciclo. El periodo vegetativo de las especies se muestra en la Figura 1. Cabe señalar que el ciclo de la papa se alargó debido a que se presentaron heladas en los meses de enero a marzo.

El follaje del cultivo de papa se cortó alrededor del 18 de mayo para que la cutícula del tubérculo suberizara. La cosecha de la papa ocurrió 10 días después, y la del maíz el 23 de noviembre.

RESULTADOS Y DISCUSION

Desarrollo Vegetativo de las Variedades de Papa

En promedio, la variedad Tollocan creció hasta una altura de 0.50 m con un desarrollo lateral moderado, mientras que el crecimiento de la variedad Puebla alcanzó hasta una altura de 0.80 m, con un desarrollo lateral vigoroso y cerrando totalmente el surco con su follaje. Este desarrollo de la variedad Puebla afectó mucho más al crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz imbricado que la variedad Tollocan. El menor desarrollo en biomasa aérea de la variedad Tollocan permitió mayor entrada de luz a los estratos bajos, reduciendo la competencia con maíz por este factor, principalmente al inicio del período de crecimiento del maíz.

Rendimiento de Tubérculo de Papa

El análisis de varianza combinado del rendimiento de tubérculo de papa se presenta en el Cuadro 1, e indica que hubo efectos significativos para: a) agrosistemas; b) variedades; c) variedades x agrosistemas; d) nitrógeno; e) fósforo; f) potasio; g) nitrógeno x variedad; h) fósforo x variedad; e i) potasio x variedad.

El efecto simple de agrosistema indica que, para las condiciones estudiadas, la estratificación mediante el levantamiento fisiográfico fue un procedimiento razonablemente preciso para estratificar potenciales de producción para maíz, el cual funciona también para el cultivo de papa, de tal manera que en el agrosistema

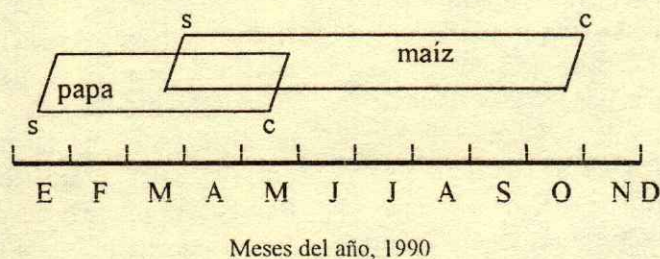


Figura 1. Periodo vegetativo de los cultivos de papa y maíz, de siembra (s) a cosechas (c).

Cuadro 1. Análisis de varianza combinado del rendimiento de tubérculo de papa, que incluye dos agrosistemas, dos variedades y ocho tratamientos de fertilización.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	FC
Agrosistema (A)	1	624.72	624.72	17.62 **
Error "a"	6	212.70	35.45	
Variedad (V)	1	321.76	321.76	13.04 **
V x A	1	193.84	193.84	7.86 **
Error "b"	6	148.02	24.67	
Tratamientos (T)	7	397.82	56.12	13.76 **
N	(1)	253.40	253.40	61.36 **
P	(1)	114.42	114.42	27.70 **
NP	(1)	1.87	1.87	0.45
K	(1)	17.96	17.96	4.25 *
NK	(1)	2.01	2.01	0.49
PK	(1)	6.65	6.65	1.61
NPK	(1)	1.51	1.51	0.37
T x A	7	12.53	1.79	0.43
T x V	7	139.24	19.46	4.82 **
N x V	(1)	18.43	18.43	4.46 *
P x V	(1)	89.24	89.24	21.61 **
NP x V	(1)	0.48	0.48	0.12
K x V	(1)	22.51	22.51	5.45 **
NK x V	(1)	0.18	0.18	0.04
PK x V	(1)	5.53	5.53	1.34
NPK x V	(1)	2.87	2.87	0.69
T x V x A	7	8.35	8.35	2.02
Error "c"	84	4.13	4.13	

* significativo al nivel de 0.05 de probabilidad.

** significativo al nivel de 0.01 de probabilidad.

Chic, el rendimiento promedio de papa fue de 14.1 t ha⁻¹ y en el agrosistema Nao de 9.6 t ha⁻¹.

En general, la variedad de papa Tollocan produjo mayor rendimiento de tubérculo que la variedad Puebla; sin embargo, en el agrosistema Nao las dos variedades rindieron estadísticamente igual, mientras que en el agrosistema Chic la variedad Tollocan superó a Puebla con 5.6 t ha⁻¹ (Cuadro 2). Esta interacción, también conocida como interacción genotipo-ambiente

Cuadro 2. Rendimiento del tubérculo de papa por agrosistema y variedad.

Agrosistema	Variedad de papa	Rendimiento de tubérculo de papa t ha ⁻¹
Chic	Tollocan	16.9 a*
Chic	Puebla	11.2 b
Nao	Tollocan	10.0 b
Nao	Puebla	9.3 b

* Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, P < 0.05).

(Cervantes, 1992; Ortiz, 1992), se debe a que la variedad Tollocan encontró mejores condiciones ecológicas en el agrosistema fisiográfico Chic para expresar su potencial genético.

En promedio, el tubérculo de papa tuvo su rendimiento máximo con las dosis de 80, 200 y 50 kg de N, P₂O₅ y K₂O ha⁻¹, Figura 2(a), 2(b) y 2(c), respectivamente. Las dosis de nitrógeno y potasio se ubican entre las recomendadas para las zonas paperas de las sierras de México (se incluye a la Sierra Veracruzana), éstas fluctúan entre 60 y 90 kg de N ha⁻¹, y entre 30 y 90 kg de K₂O ha⁻¹, respectivamente. Sin embargo, las dosis de fósforo resultaron más altas que las de la sierra del Eje Neovolcánico y que las de la Sierra Madre Oriental, donde se recomiendan entre 100 y 160 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (SARH, 1981, 1982; Paredes, 1987), incluso la dosis de fósforo resultó insuficiente para alcanzar el rendimiento potencial, por lo cual es necesario explorar dosis más altas de fósforo.

La interacción variedad x nitrógeno se muestra en la Figura 3(a), en ésta se observa que con la aplicación de 80 kg de N ha⁻¹ se satisfacen los requerimientos para obtener los máximos, pero diferentes, rendimientos para cada variedad, pues Tollocan supera a la Puebla con una diferencia de 3.9 t ha⁻¹. Si se aplica más nitrógeno, el rendimiento decrece rápidamente en ambas variedades.

En la Figura 3(b) se presenta la interacción variedad x fósforo. El rendimiento de tubérculo fue función de la dosis de fósforo aplicada en ambas variedades. Las necesidades de fósforo de la variedad Puebla quedaron satisfechas con 150 kg P₂O₅ ha⁻¹, mientras que la variedad Tollocan tuvo una respuesta casi lineal y positiva (McCullum, 1978), lo cual indica que la demanda de fósforo no fue satisfecha y, por lo tanto, se requiere seguir explorando con dosis mayores que 200 kg ha⁻¹ de fósforo, en estos suelos, para que esta variedad manifieste su potencial de rendimiento (Kleinkopf *et al.*, 1981).

La interacción variedad x potasio se muestra en la Figura 3(c). Los rendimientos de tubérculo fueron función de la dosis de potasio aplicada. En la variedad Tollocan, rendimientos cercanos a los máximos (14 t ha⁻¹) se consiguieron con 80 kg de K₂O, en tanto que las necesidades de la variedad Puebla (11 t ha⁻¹) quedaron satisfechas con 50 kg de K₂O ha⁻¹; en estudios posteriores convendría incluir al sulfato de potasio como fuente, ya que el Cl del cloruro de

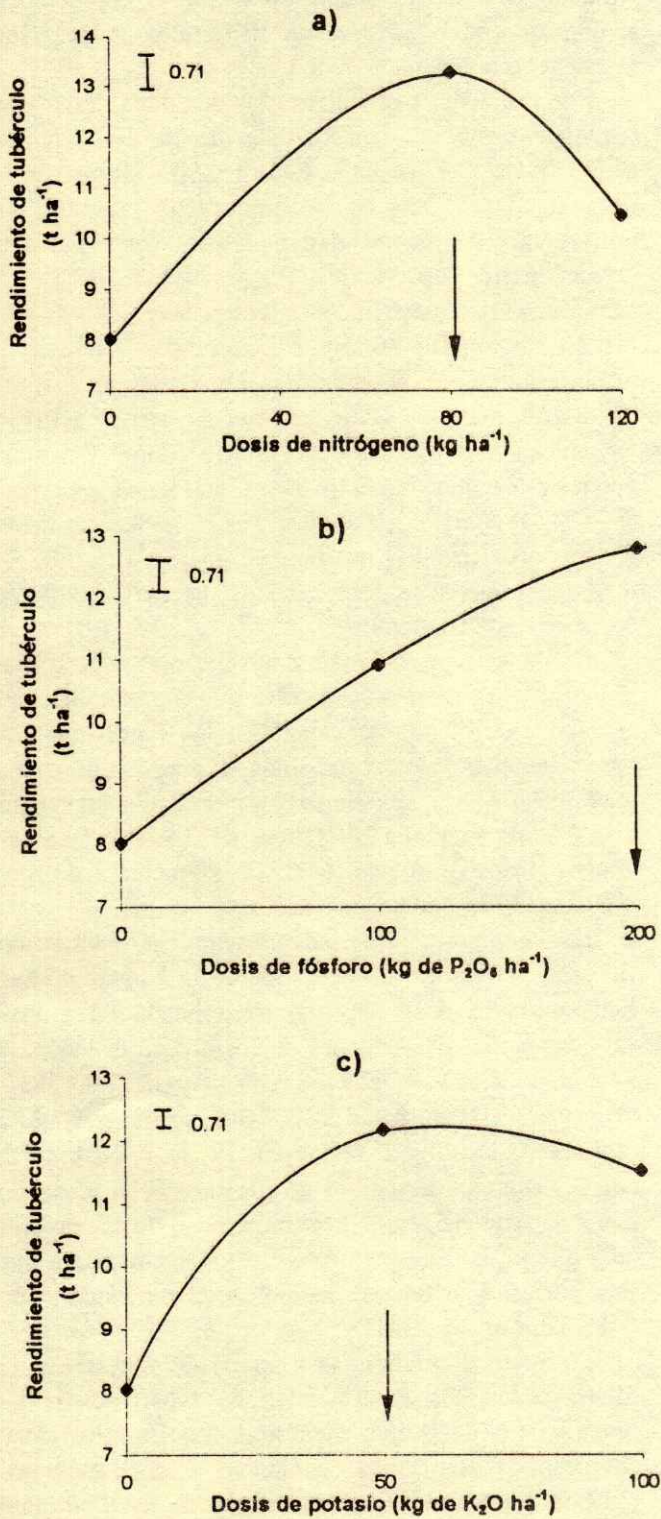


Figura 2. Respuesta del rendimiento del tubérculo de papa a dosis de nitrógeno, fósforo y potasio.

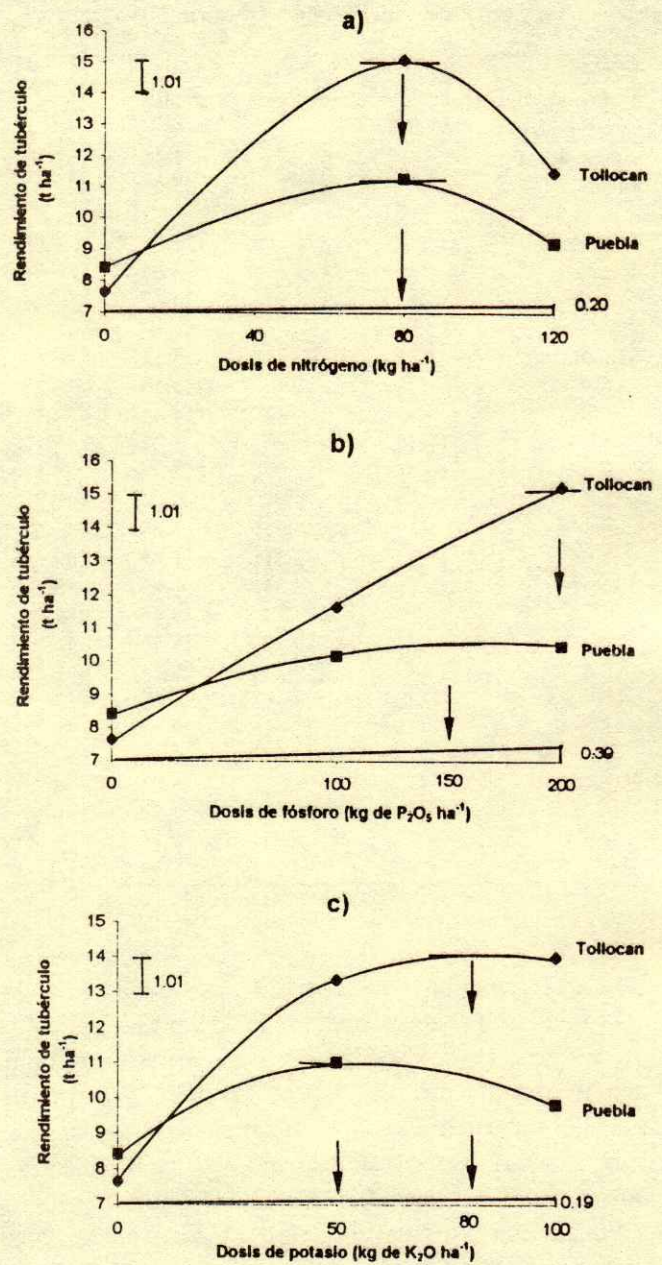


Figura 3. Respuesta del rendimiento de tubérculo de dos variedades de papa a dosis de nitrógeno, fósforo y potasio.

potasio puede resultar nocivo para la planta de papa (Tisdale y Nelson, 1982) y limitar su rendimiento y respuesta a K.

Los rendimientos de tubérculo de papa en el patrón de cultivo múltiple resultaron equivalentes a los obtenidos como cultivo solo (Aguilar, 1982).

Cuadro 3. Análisis de varianza del rendimiento de maíz como efecto de los tratamientos estudiados en el cultivo de papa en el agrosistema Nao.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	FC
Repeticiones	3	3.26	1.09	0.48
Variedad (V)	1	4.44	4.44	1.96
Error "a"	3	0.76	2.27	
Tratamientos (T)	7	18.82	2.69	1.79
N	(1)	6.98	6.98	4.65 *
P	(1)	1.30	1.30	0.87
K	(1)	4.48	4.46	2.99
NP	(1)	4.11	4.11	2.74
NK	(1)	1.25	1.25	0.83
PK	(1)	0.58	0.58	0.39
NPK	(1)	0.11	0.11	0.08
T x V	7	34.86	4.98	3.32 **
N x V	(1)	0.26	0.26	0.17
P x V	(1)	1.85	1.85	1.23
K x V	(1)	0.63	0.63	0.42
NP x V	(1)	7.74	7.74	5.16 *
NK x V	(1)	2.16	2.16	1.44
PK x V	(1)	10.99	10.99	7.33 **
NPK x V	(1)	11.22	11.22	7.48 **
Error "b"	42	63.00	1.50	

* significativo al nivel de 0.05 de probabilidad.

** significativo al nivel de 0.01 de probabilidad.

Rendimiento de Maíz Imbricado en el Agrosistema Nao

Sólo se presentan los resultados del análisis de varianza del rendimiento de maíz en el agrosistema Nao, ya que el productor cooperante del agrosistema Chic no permitió la evaluación del experimento.

El análisis de varianza del rendimiento de maíz, como efecto de los tratamientos aplicados al cultivo de papa, mostró significancia en las siguientes fuentes de variación: a) nitrógeno; b) variedad x nitrógeno x fósforo; c) variedad x fósforo x potasio; y d) variedad x nitrógeno x fósforo x potasio (Cuadro 3).

En la Figura 4 se observa que el maíz tuvo su rendimiento máximo promedio con la dosis de 120 kg de N ha⁻¹ aplicada al cultivo de papa, sin embargo, resultó insuficiente para que el maíz alcanzara su potencial de rendimiento. Lo anterior no concuerda con lo obtenido por Ifenkwe y Odurukwe (1990), pero sí con resultados de Oelsigle *et al.* (1976), por lo que es necesario estudiar dosis de N aplicadas al cultivo de

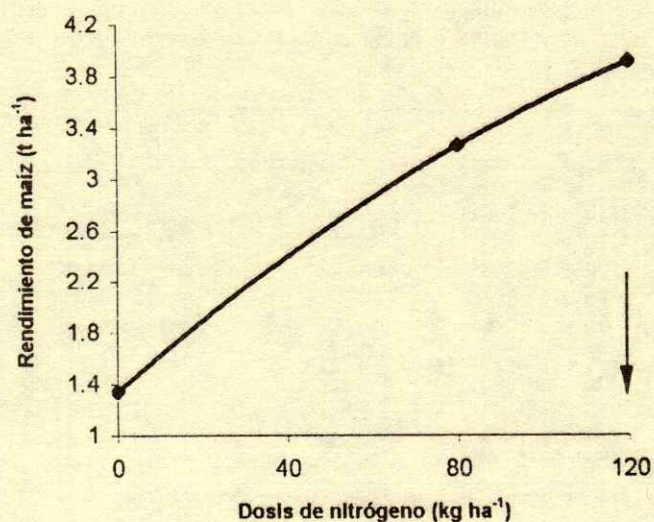


Figura 4. Respuesta del rendimiento de maíz imbricado a dosis de nitrógeno residual aplicado al cultivo de papa, en el agrosistema Nao.

maíz imbricado como complemento para satisfacer sus requerimientos.

El maíz tuvo rendimientos diferenciales en función de las variedades de papa y sus interacciones con las dosis de N x P, P x K y N x P x K aplicadas al cultivo de papa (Cuadro 3). Las variedades de papa y dosis de nitrógeno, fósforo o potasio asociadas con los rendimientos máximos de maíz en cada interacción son las siguientes:

El mejor tratamiento para maíz en la interacción V x N x P fue 120-100 kg de N y P₂O₅ ha⁻¹, respectivamente, con rendimientos promedio de 4.7 t ha⁻¹ de grano de maíz con la variedad de papa Tollocan y de 4.0 t ha⁻¹ de grano de maíz con la variedad Puebla (Cuadro 4).

En la interacción V x P x K, el mejor tratamiento para maíz con la variedad de papa Tollocan fue 100-100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y K₂O, respectivamente, con un rendimiento promedio de 4.5 t ha⁻¹ de grano de maíz, y con la variedad de papa Puebla resultó 200-50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y K₂O, respectivamente, con un rendimiento promedio de maíz de 3.6 t ha⁻¹ de grano (Cuadro 5).

El mejor tratamiento para maíz en la interacción V x N x P x K fue 120-100-100 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente, con 4.9 t ha⁻¹ de grano con la variedad de papa Tollocan y de 4.4 t ha⁻¹ de grano con la variedad de papa Puebla (Cuadro 6).

Cuadro 4. Rendimiento de maíz imbricado por efecto del nitrógeno y fósforo residual aplicados en dos variedades de papa.

N	P ₂ O ₅	Variedad de papa	Rendimiento de maíz
- - kg ha ⁻¹ - -			t ha ⁻¹
120	100	Tollocan	4.65 a*
120	100	Puebla	3.95 b
120	200	Tollocan	3.83 bc
80	100	Tollocan	3.60 bcd
80	200	Puebla	3.48 cde
80	200	Tollocan	3.25 de
120	200	Puebla	3.19 e
80	100	Puebla	2.55 f
0	0	Tollocan	1.63 g
0	0	Puebla	1.05 h

* Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, P<0.05).

El nitrógeno residual que no aprovechó en su totalidad el cultivo de papa en la dosis de 120 kg ha⁻¹ favoreció el rendimiento de maíz. Cuando el maíz se imbricó en la variedad de papa Puebla, en términos generales respondió menos a las dosis altas de nitrógeno y potasio y a la dosis baja de fósforo que cuando se imbricó en la variedad Tollocan, ya que esta última desarrolló menos vegetativamente que la variedad Puebla, lo cual contribuyó a una menor competencia por luz, principalmente en los estratos bajos.

La dosis de fósforo aplicada al cultivo de papa satisfizo adecuadamente los requerimientos nutrimentales de la papa y del maíz en el sistema de cultivo múltiple, concordando con Ahmad y Rao (1982). Sin embargo, el cultivo de maíz posee un sistema radical profuso y profundo lo que le da ventaja sobre el sistema radical de la papa (McCollum, 1978), debido a

Cuadro 5. Rendimiento de maíz imbricado por efecto del fósforo y potasio aplicados en dos variedades de papa.

P ₂ O ₅	K ₂ O	Variedad de papa	Rendimiento de maíz
- - kg ha ⁻¹ - -			t ha ⁻¹
100	100	Tollocan	4.54 a*
200	50	Tollocan	4.00 b
100	50	Tollocan	3.71 bc
200	50	Puebla	3.57 cd
100	100	Puebla	3.25 de
100	50	Puebla	3.25 de
200	100	Puebla	3.10 e
200	100	Tollocan	3.08 e
0	0	Tollocan	1.63 f
0	0	Puebla	1.05 g

* Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, P<0.05).

Cuadro 6. Rendimiento de maíz por efecto de la fertilización residual y de las variedades de papa Tollocan y Puebla.

Tratamiento			Variedad de papa	Rendimiento de maíz
N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
- - - - kg ha ⁻¹ - - - -				t ha ⁻¹
120	100	100	Tollocan	4.88 a*
120	100	50	Tollocan	4.42 b
120	100	100	Puebla	4.40 bc
80	100	100	Tollocan	4.20 bcd
120	200	50	Tollocan	4.10 bcde
80	200	50	Tollocan	3.90 def
120	200	50	Puebla	3.78 efg
80	200	100	Puebla	3.60 fgh
120	200	100	Tollocan	3.55 ghi
120	100	50	Puebla	3.50 ghij
80	200	50	Puebla	3.35 hij
80	100	50	Tollocan	3.00 k
80	100	50	Puebla	3.00 k
80	200	100	Tollocan	2.60 l
120	200	100	Puebla	2.60 l
80	100	100	Puebla	2.10 m
0	0	0	Tollocan	1.63 n
0	0	0	Puebla	1.05 o

* Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, P<0.05).

que puede explorar más volumen de suelo para absorber el fósforo por difusión (Itoh y Barber, 1983; Mengel y Kirkby, 1987) sin mayor problema, razón por la cual el cultivo de maíz sólo respondió hasta 100 kg de P₂O₅ ha⁻¹. Esta respuesta del maíz es similar (92 kg de P₂O₅ ha⁻¹) a la que obtuvo Aguilar (1985) para maíz en unicultivo, en Andosoles con alto contenido de alófono, cuantificado indirectamente utilizando el pH con NaF, (Fieldes y Perrott, 1966; Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 1975).

Con los resultados obtenidos, puede afirmarse que la dosis de fósforo aplicada a la papa como cultivo principal satisface adecuadamente los requerimientos nutrimentales del maíz imbricado y es consistente con lo reportado por Ifenkwe y Odurukwe (1990).

Análisis Económico del Sistema de Cultivo Múltiple

En el análisis económico, practicado con el procedimiento discreto, al patrón de cultivo papa imbricada con maíz y con la variedad de papa Tollocan, resultó que el máximo ingreso neto + costos fijos (INCF) fue de \$54 223.00 ha⁻¹, así como la mayor tasa de retorno al capital variable (TRCV) de 16.98, se asociaron con el tratamiento óptimo económico para capital ilimitado y limitado (TOECI y TOECL,

Cuadro 7. Ingresos netos más costos fijos del patrón de cultivo de papa imbricado con maíz, como respuesta a dosis de N, P₂O₅ y K₂O, con la variedad de papa Tollocan.

Tratamiento			Rendimiento		IBCF [†]	Costo variable	INCF [‡]	ΔINCF [§]	TRCV [¶]
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Papa	Maíz					
kg ha ⁻¹			t ha ⁻¹		\$ ha ⁻¹				
80	100	50	12.94	3.00	41413	1249	40164	16869	13.51
80	100	100	13.77	4.20	45158	1534	43624	20329	13.25
80	200	50	17.57	3.90	56044	1821	54223[#]	30928	16.98^{††}
80	200	100	16.49	2.60	51454	2106	49348	26053	12.37
120	100	50	9.30	4.42	32209	1446	30763	7468	5.16
120	100	100	10.62	4.88	36599	1730	34869	11574	6.69
120	200	50	13.54	4.10	44371	2018	42353	19058	9.44
120	200	100	13.27	3.55	42981	2302	40679	17384	7.55
0	0	0	7.30	1.63	23395	0	23295		

[†] Ingresos bruto + costos fijos.[‡] Ingreso neto + costos fijos. Los precios considerados fueron de: a) \$ 4.91, \$ 5.72 y \$ 5.69 por kg de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente; b) \$ 2.95 y \$ 1.08 por kg de tubérculo de papa y maíz, respectivamente.[§] Incremento de ingreso neto más costos fijos sobre el testigo absoluto.[¶] Tasa de retorno al capital variable = ΔINCF/costo variable.[#] Máximo ingreso neto asociado al tratamiento óptimo económico para capital ilimitado (TOECI).^{††} Mayor tasa de retorno al capital variable, asociado al tratamiento óptimo económico para capital limitado (TOECL).**Cuadro 8. Ingresos netos más costos fijos del patrón de cultivo de papa imbricado con maíz, como respuesta a dosis de N, P₂O₅ y K₂O, con la variedad de papa Puebla.**

Tratamiento			Rendimiento		IBCF [†]	Costo variable	INCF [‡]	ΔINCF [§]	TRCV [¶]
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Papa	Maíz					
kg ha ⁻¹			t ha ⁻¹		\$ ha ⁻¹				
80	100	50	12.10	3.00	38935	1249	37686	11772	9.43^{††}
80	100	100	9.97	2.10	31680	1534	30146	4232	2.76
80	200	50	12.20	3.35	39608	1821	37787[#]	11873	6.52
80	200	100	11.03	3.60	36427	2106	34321	8407	3.99
120	100	50	9.65	3.50	32248	1446	30802	4888	3.38
120	100	100	8.91	4.40	31037	1730	29307	3393	1.96
120	200	50	10.06	3.78	33759	2018	31741	5827	2.89
120	200	100	8.21	2.60	27028	2302	24726		
0	0	0	8.40	1.05	25914	0	25914		

[†] Ingresos bruto + costos fijos.[‡] Ingreso neto + costos fijos. Los precios considerados fueron de: a) \$ 4.91, \$ 5.72 y \$ 5.69 por kg de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente; b) \$ 2.95 y \$ 1.08 por kg de tubérculo de papa y maíz, respectivamente.[§] Incremento de ingreso neto más costos fijos sobre el testigo absoluto.[¶] Tasa de retorno al capital variable = ΔINCF/Costo variable.[#] Máximo ingreso neto asociado al tratamiento óptimo económico para capital ilimitado (TOECI).^{††} Mayor tasa de retorno al capital variable, asociado al tratamiento óptimo económico para capital limitado (TOECL).

respectivamente) 80–200–50 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente (Cuadro 7). Con la variedad Puebla, el máximo INCF fue de \$37 787.00 ha⁻¹, asociado con el TOECI 80–200–50 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente, mientras que la mayor TRCV de 9.43 se asoció al TOECL 80–100–50 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente (Cuadro 8).

CONCLUSIONES

Sobre el Cultivo de Papa

En promedio, el rendimiento de papa respondió mejor a las condiciones del agrosistema Chic (14.1 t ha⁻¹) que a las del agrosistema Nao (9.6 t ha⁻¹).

En general, la variedad Tollocan rindió más tubérculos (13.4 t ha^{-1}) que la variedad Puebla (10.3 t ha^{-1}). Las diferencias entre variedades fue mayor en el agrosistema Chic, con rendimientos de 16.9 y 11.2 t ha^{-1} para Tollocan y Puebla, respectivamente, la diferencia fue mínima entre variedades en el agrosistema Nao.

La interacción variedad x nitrógeno, fósforo o potasio se explica porque Tollocan se asoció con el tratamiento $80-200-80 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente; sin embargo, es conveniente estudiar dosis más elevadas de fósforo, ya que no se presentaron rendimientos decrecientes, por ser suelos con características ándicas. Para la variedad Puebla el tratamiento fue $80-150-50 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente.

La ausencia de la interacción agrosistema x tratamientos de fertilización sugiere que la respuesta del cultivo a las dosis de N, P y K es similar en los dos agrosistemas.

Sobre el Rendimiento de Maíz Imbricado

El efecto residual de la fertilización aplicada en el cultivo de papa incrementó el rendimiento de maíz de 1.6 t ha^{-1} a 4.9 t ha^{-1} y de 1.1 a 4.4 t ha^{-1} con el tratamiento $120-100-100 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente, en las variedades de papa Tollocan y Puebla, respectivamente.

Las dosis óptimas de fósforo para papa son suficientes para satisfacer los requerimientos del maíz, sin embargo, las dosis óptimas de nitrógeno y de potasio para papa son insuficientes para el cultivo de maíz, por lo que se sugiere estudiar dosis complementarias de N y K en el cultivo de maíz imbricado.

Sobre el Patrón de Cultivo

Cuando el principal interés del productor es producir papa y, en segundo término, maíz, las dosis $80-200-50 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente, con la variedad de papa Tollocan, en promedio permiten producir 17.6 y 3.9 t ha^{-1} de tubérculo y de maíz, respectivamente, con el máximo INCF y la mayor TRCV.

Si el interés del productor es maximizar los rendimientos de papa y de maíz, tendrá que adicionar cuando menos $40 \text{ kg de N ha}^{-1}$ y $30 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$ al

cultivo de maíz, aplicándose en la primera labor de cultivo o en el atierre.

Dado el alto riesgo de pérdidas del cultivo único y simple de papa en condiciones de temporal, su producción en un sistema de cultivo múltiple tiene mayor probabilidad de éxito (Turrent, 1979a; Manrique, 1996), además de que la papa, en un sistema de cultivo múltiple, es un cultivo alternativo viable y una fuente valiosa de proteínas.

LITERATURA CITADA

- Aguilar A., J.L. 1982. Evaluación del programa sistemas de producción. SARH, INIA, CIAGOC, Campo Experimental Xalapa, Xalapa, México.
- Aguilar A., J.L. 1985. Comparación de cinco métodos para definir agrosistemas y su relación con la precisión en la generación de tecnología agrícola en dos patrones de cultivo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Aguilar A., J.L. y C.A. Ortiz S. 1987. Uso del levantamiento fisiográfico para generar tecnología de producción en el cultivo asociado maíz-frijol de guía. Suelos Ecuatoriales 17 (2): 269-274.
- Ahmad, S. y M.R. Rao. 1982. Performance of maize-soybean intercrop combination in the Tropics. Results of a multilocation study. Field Crops Res. 5: 147-161.
- Andrews, D.J. y A.H. Kassam. 1976. The importance of multiple cropping in increasing world food supplies. pp 1-10. In: R.I. Papendick, P.A. Sánchez y G.B. Triplett (eds.). Multiple cropping. Special Publication No. 27. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Cervantes, S.T. 1992. La interacción genotipo-ambiente en la clasificación de regiones agrícolas. pp. 117-125. In: J.J. Sánchez G., J. Ron P. y F. Márquez S. (comp.) Memorias Simposio de Interacción Genotipo-Ambiente en Genotecnia Vegetal. 26 y 27 de marzo. Sociedad Mexicana de Fitotecnia A.C. (SOMEFI), Guadalajara, Jal., México.
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 1975. Manual para investigaciones en levantamientos de suelos. Procedimientos de campo. Trad. del inglés por Fausto Maldonado. Publicación 34. Ecuador.
- Egawa, T. 1980. Propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas. pp 14-67. In: Y. Ishizuka y C.A. Black (eds.). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Japón. CIMMYT, México, DF.
- FAO/UNESCO/ISRIC. 1988. FAO/UNESCO soil map of the world, revised legend. World Soil Resources Report 60. FAO, Rome, Italy.
- Fieldes, M. y K.W. Perrott. 1966. The nature of allophane in soils. III Rapid field and laboratory test for allophane. N.Z. J. Sci. 9: 623-629.
- Ifenkwe, O.P. y S.O. Odurukwe. 1990. Potato-maize intercropping in the Jos plateau of Nigeria. Field Crops Res. 23: 73-82.
- Itoh, S. y S.A. Barber. 1983. Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs. Agron. J. 75: 457-461.

- Kleinkopf, G.E., D.T. Westermann y R.B. Dwelle. 1981. Dry matter production and nitrogen utilization by six potato cultivars. *Agron. J.* 73: 799-802.
- Manrique, L.A. 1996. The potato in multiple cropping systems. *J. Plant Nutr.* 19: 215-243.
- Márquez S., F. 1981. Clasificación tecnológica de los sistemas de producción agrícola (agrosistemas) según los ejes espacio y tiempo. pp. 143-154. *In:* E. Hernández X. (ed.). *Agroecosistemas de México: Contribuciones a la enseñanza, investigación agrícola.* Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- McCollum, R.E. 1978. Analysis of potato growth under differing P regimes. I. Tuber yields and allocation of dry matter and P. *Agron. J.* 70: 51-57.
- Mengel, K. y E.A. Kirkby. 1987. Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Bern, Switzerland.
- Oelsgle, D.D., R.E. McCollum y B.T. Kang. 1976. Soil fertility management in tropical cropping systems. pp. 275-292. *In:* R.I. Papendick, P.A. Sánchez y G.B. Triplett (eds.). *Multiple Cropping.* Special Publication 27. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Ortiz V., M. 1992. Determinación de zonas homogéneas para cultivos básicos. pp. 67-89. *In:* J.J. Sánchez G., J. Ron P. y F. Márquez S. (comp.) *Memorias Simposio de Interacción Genotipo-Ambiente en Genotecnía Vegetal.* 26 y 27 de marzo. Sociedad Mexicana de Fitotecnía A.C. (SOMEFI), Guadalajara, Jal., México.
- Papendick, R.I., P.A. Sánchez y G.B. Triplett. 1976. Preface. pp. vii-viii. *In:* R.I. Papendick, P.A. Sánchez y G.B. Triplett (eds.). *Multiple Cropping.* Special Publication No. 27. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Paredes T., A. 1987. Comportamiento de once variedades de papa mexicanas al ataque del nemátodo dorado *Globodera rostochiensis* (Woll, 1923) (Hulvey and Stones), en la sierra del estado de Veracruz. Tesis de Licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología Presidente Juárez. Uruapan, Michoacán.
- Phillips, A.B. y J.R. Webb. 1971. Production, marketing and use of phosphorus fertilizer technology and use. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1981. Guía para la asistencia técnica agrícola. SARH-INIA-CIAMEC Campo Experimental "Valle de México", Chapingo, México.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1982. Guía para la asistencia técnica agrícola. SARH-INIA-CIAMEC. Campo Experimental "Tecamachalco", Tecamachalco, Puebla, México.
- Sharma, S.N., R. Prasad y S. Singh. 1993. Relative productivity and economics of mono, sequential, and relay cropping systems of potato (*Solanum*) and wheat (*Triticum aestivum*). *Indian J. Agric. Sci.* 63: 261-264.
- Tisdale, S. y W. Nelson. 1982. Fertilidad de suelos y fertilizantes. Traducción al español de J. Balasch y C. Piña. UTHEA, México.
- Turrent F., A. 1978. El agrosistema, un concepto útil dentro de la disciplina de Productividad. Escritos sobre la metodología de la investigación en productividad de agrosistemas. Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Turrent F., A. 1979a. El sistema agrícola, un marco de referencia para la planeación de la investigación agrícola en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Turrent F., A. 1979b. El método CP para el diseño de agrosistemas. Escritos sobre la metodología de la investigación en productividad de agrosistemas. Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Volke H., V. 1982. Optimización de insumos de la producción en la agricultura. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

CARACTERIZACION DE PRODUCTORES AGRICOLAS DE SEIS DISTRITOS DE DESARROLLO RURAL DE ZACATECAS

Characterization of Agricultural Producers of Six Rural Development Districts in Zacatecas

Guillermo Galindo González¹, Wilfrido César Tabares Rodríguez² y Guillermo Gómez Aguirre³

RESUMEN

Con el propósito de caracterizar a los productores agrícolas de seis distritos de desarrollo rural de Zacatecas, en el segundo semestre de 1998 se realizó un estudio, en el cual se consideraron 10 variables relativas al productor y cinco a la unidad de producción. Para recopilar la información se aplicó un cuestionario integrado de 59 preguntas de tipo abierto y cerrado, a una muestra compuesta de 594 unidades muestrales, las cuales fueron seleccionadas aleatoriamente. Los resultados mostraron que los rendimientos que se obtienen en el campo son bajos, lo cual se manifiesta por un bajo espíritu de innovación; también, su exposición a periódico y radio es alto. El principal problema que enfrentan los productores es la sequía.

Palabras clave: Transferencia de tecnología, desarrollo rural, extensión agrícola.

SUMMARY

During the second half of 1998, a survey was done to characterize agricultural producers of the six rural development districts of Zacatecas. Ten relative variables were considered for producers and five for production units. To gather this information a questionnaire with 59 open and closed questions was applied to a compound sample of 592 sample units. The results showed that the yields obtained in the rural areas are low and are manifested by a lack of an innovative spirit. Exposure to newspapers and radio is high. The major problem that confronts the producers is drought.

¹ Campo Experimental Calera, INIFAP-SAGAR, Apartado Postal 18, 98500 Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México.

² y ³ Universidad Autónoma de Fresnillo, Apartado Postal 312, 99000 Fresnillo, Zacatecas, México.

Recibido: Febrero de 2000.

Aceptado: Junio de 2000.

Index words: Technological transfer, rural development, agricultural extension.

INTRODUCCION

En el estado de Zacatecas 1 350 047 ha se dedican a la agricultura; de esta superficie, 14% se siembra bajo riego y 86% de temporal, con lluvia deficiente (250 a 550 mm), ciclo corto (de 80 a 110 días) y temperaturas bajas (de 15 a 29 °C); 95% se cultiva en primavera-verano, y 5% en otoño-invierno. Los principales cultivos que se desarrollan bajo temporal son frijol, maíz, trigo, avena de grano, así como cebada y avena forrajera; entre los de riego destacan frijol, maíz, trigo, chile, vid, guayabo y duraznero. Los cultivos básicos ocupan en promedio 91% del área cultivada, los frutales 4%, las hortalizas 2%, y los cultivos forrajeros cubren 3% de la superficie (Luna y Galindo, 1997). Los rendimientos unitarios que se obtienen en los principales cultivos son bajos, en comparación con el promedio nacional y con los que se pudieran obtener de acuerdo con datos experimentales.

En Zacatecas es urgente incrementar la producción agropecuaria, ya que con esto será posible elevar el nivel de vida en el medio rural, donde se encuentra 22.4% de la población total en extrema pobreza. Es indiscutible que se dispone de tecnologías, que en la mayoría de los casos no son aplicadas; existen también diferentes instituciones que enfocan su trabajo para lograr un desarrollo rural integral, y varios apoyos gubernamentales para el incremento de la producción.

Se realizó la presente investigación con el objetivo de caracterizar a los productores zacatecanos de los seis distritos de desarrollo rural (DDR) más importantes desde el punto de vista agrícola, de acuerdo con diferentes variables relativas al productor (relación con dependencias del sector agropecuario, contacto con extensionistas, escolaridad, relación con medios de comunicación, edad, ingreso económico, contacto con casas comerciales agropecuarias, espíritu de innovación, empatía y nivel de vida), y a la unidad de producción (tenencia de la tierra, superficie

cultivada, uso de crédito agropecuario, apoyos recibidos de la Alianza para el Campo y problemas que enfrentan los productores en sus cultivos). El presente estudio es importante, ya que los resultados que se obtengan permitirán diseñar estrategias de divulgación, para transferir los resultados de las investigaciones generadas en las instituciones de investigación; además, será posible estructurar los mensajes de acuerdo con variables sociales de los productores.

MATERIALES Y METODOS

Diseño y Aplicación de Cuestionario

De acuerdo con el objetivo del estudio se diseñó un cuestionario que permitiera capturar, sistematizar y analizar los datos en forma sencilla, económica y oportuna. Este instrumento fue estructurado de la siguiente manera: en la primera se identificó la entrevista y se redactó una presentación sobre el propósito del estudio; en la segunda se plantearon preguntas relacionadas con las variables relativas al productor; y en la tercera, las interrogantes que tenían relación con la unidad de producción.

El cuestionario se integró por un total de 59 preguntas de tipo abierto y cerrado; se probó previamente antes de ser aplicado a la muestra seleccionada, y se le hicieron las adecuaciones necesarias para que pudiera ser contestado fácilmente por los entrevistados; éstos fueron aplicados durante los meses de octubre y noviembre de 1998, para lo cual fueron capacitados encuestadores.

Determinación de Tamaño de Muestra

Para determinar el tamaño de muestra en los distritos de desarrollo rural (DDR) seleccionados (Tlaltenango, Zacatecas, Ojocaliente, Río Grande, Jalpa y Fresnillo), se definió el número de productores que se encontraban inscritos en el Programa de Apoyos Directos al Campo (PROCAMPO); el cual fue de 2563, 17679, 22590, 25835, 5119 y 15688, respectivamente.

El tamaño de muestra determinado (n') para cada uno de los DDR fue de 99, mediante un esquema de muestreo aleatorio con varianza máxima, empleando la fórmula propuesta por García (1985), con un nivel de confiabilidad de 10%; el tamaño de muestra total (n) fue de 594. Sahagún y Méndez (1985) informaron que "Una población grande con un tamaño

de muestra de 100 individuos asegura cuando menos 96% de la confiabilidad, y 10% de la precisión de la estimación de proporciones; lo anterior significa que si se tiene una varianza de la proporción menor, se mejoran las características de las estimaciones, puesto que la muestra de tamaño 100 se define para cuando se trata de varianza máxima.

Procesamiento de la Información

La metodología utilizada para transferir los datos de los cuestionarios en información fue la siguiente: a) se desarrolló el modelo de datos a través del análisis de requerimientos utilizando el modelo entidad-relación; b) se transformó el modelo entidad relación a tablas relacionales; c) se normalizaron las tablas relacionadas; d) se diseñó la interfaz de captura de datos en el sistema manejador de bases de datos relacionales ForPro/LAN versión 2.5 para MS DOS; una vez capturados los datos, se exportó la información a Microsoft Excel para el formato final de las tablas a través del lenguaje de consultas estructurado o SLQ (Structured Language Query) incorporado en el paquete FoxPro/LAN.

RESULTADOS Y DISCUSION

Relación con Dependencias del Sector Agropecuario

En el distrito de desarrollo rural (DDR) de Fresnillo, 60.6% de los productores visitaron alguna dependencia durante 1997, y el primer semestre de 1998, 55.5% en el de Jalpa, 54.5% en el de Río Grande, 39.4% en el de Tlaltenango, 32.3% en el de Zacatecas, y solamente 21.2% en el de Ojocaliente.

La dependencia más visitada fue la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR), debido principalmente a los trámites que realizan los productores para el PROCAMPO; es necesario destacar que solamente 1.5% de los entrevistados asistieron al Campo Experimental Calera (institución de investigación agropecuaria), así como la nula asistencia a otras dependencias que generan innovaciones. Lo anterior posiblemente se deba al poco interés que tienen los productores por estar enterados de nuevas tecnologías, a que su objetivo principal sea obtener apoyos y subsidios, y al desconocimiento de su existencia. Sobre esta variable, Tapia *et al.* (1991) señalaron que uno de los factores que limita la generación de tecnología apropiada, así

como su transferencia a la gran mayoría de los productores, es el escaso vínculo que se da entre investigadores, extensionistas y productores; además, Mendoza (1979) afirmó que a medida que aumenta la relación de los productores con las instituciones del sector agropecuario aumenta el uso de innovaciones agropecuarias.

Es necesario promover en el medio rural a las instituciones del sector que están presentes en Zacatecas; se deben destacar los servicios que ofrecen, sus objetivos, etc.

Contacto con Extensionistas

Sobre la relación de los productores con los extensionistas y/o agentes de cambio, se determinó que durante 1997 y el primer semestre de 1998, un alto porcentaje tuvo algún contacto con éstos (Cuadro 1); lo anterior fue principalmente con los de la SAGAR y del Programa Elemental de Asistencia Técnica (PEAT). La mayor relación se dio en los DDR de Tlaltenango, Río Grande y Jalpa.

Sobre el número de veces que los productores platicaron con los agentes de cambio, la media aritmética para cada uno de los DDR, fue: 5.1 (Fresnillo), 10.4 (Jalpa), 4.3 (Ojocaliente), 7.6 (Río Grande), 7.0 (Tlaltenango) y 4.8 (Zacatecas). Los principales temas que trataron los entrevistados con los extensionistas fueron PROCAMPO, sanidad animal, plagas en los cultivos, fertilización, variedades de frijol, riego, enfermedades, Alianza para el Campo, variedades de maíz, fechas de siembra y cultivo de cereales.

Sobre la eficiencia de este servicio en Zacatecas, Galindo (1992a) indicó que entre los principales factores limitativos que tenían los extensionistas destacan falta de material didáctico, escaso apoyo económico, y que no cuentan con vehículo; por su parte, Gómez (1999) encontró los siguientes factores limitativos: falta de interés de los productores y de credibilidad hacia los extensionistas, falta de organización en el campo, baja escolaridad en el medio rural, los productores no viven en las comunidades, y fuerte arraigo a las tecnologías tradicionales, principalmente.

Finalmente, es importante destacar que algunos autores (Wilson y Gallup, 1964; Reyna *et al.*, 1981; Galindo, 1995) afirmaron que la relación de los productores con los agentes de cambio influyen en la adopción de nuevas tecnologías.

Cuadro 1. Relación de los productores con extensionistas durante 1997 y el primer semestre de 1998.

Distrito de Desarrollo Rural	Si se relacionó		No se relacionó	
	Frecuencia	%	Frecuencia	%
Fresnillo	57	57.6 [†]	42	42.4
Jalpa	71	71.7	28	28.3
Ojocaliente	55	55.6	44	44.4
Río Grande	72	72.7	27	27.3
Tlaltenango	88	88.9	11	11.1
Zacatecas	26	26.3	73	73.7
Total	369	62.1 [‡]	225	37.9

[†] Porcentaje con relación a n = 99.

[‡] Porcentaje con relación a n = 594.

Escolaridad

En el Cuadro 2 se observa que 12.3% de la población total no asistió a ningún plantel de enseñanza formal, y que 48.7% sólo hasta el tercer grado de educación primaria, lo cual limita a los productores para que hagan uso de los medios de comunicación escrita. El mayor grado de analfabetismo se presentó en el DDR de Ojocaliente.

Autores como Alvarez *et al.* (1985), así como Mendoza (1979), determinaron que el grado de escolaridad influye sobre el uso de tecnología; además, Gaytán (1970) comentó que al aumentar la escolaridad disminuye la edad y aumenta el ingreso económico. Sobre el mismo tema, Galindo (1994) encontró en la región central de Zacatecas correlación entre el grado de escolaridad y las siguientes variables: exposición a medios de comunicación, relación con agentes de cambio, contacto con casas comerciales y cosmopolitismo.

Relación con Medios de Comunicación

Periódicos. Se observó que 21.2% de los entrevistados se exponen a este medio de comunicación, destacando los que habitan en los DDR de Río Grande, Jalpa y Zacatecas. Este porcentaje es bajo si se compara con la región central del estado de Veracruz, donde se ha determinado que 93% de los productores leen periódicos (Ugalde *et al.*, 1989). Es posible que el grado de cosmopolitismo que existe entre los habitantes del medio rural influya en la exposición a este medio.

De 21.2% de los lectores que leen periódicos, 0.2% lo hace diariamente, 3.0% dos veces por semana, 1.0% tres veces, y de vez en cuando 17.0%; estos

Cuadro 2. Grado de escolaridad de los productores.

Escolaridad	DDR						Total
	Fresnillo	Jalpa	Ojocaliente	Río Grande	Tlaltenango	Zacatecas	
1	7 (7.1) [†]	17 (17.2)	23 (23.2)	6 (6.1)	13 (13.1)	7 (7.1)	73 (12.3)
2	6 (6.1)	11 (11.1)	23 (23.2)	11 (11.1)	3 (3.0)	9 (9.1)	63 (10.6)
3	22 (22.2)	5 (5.1)	18 (18.2)	18 (18.2)	17 (17.2)	13 (13.1)	93 (15.6)
4	25 (25.5)	28 (28.3)	18 (18.2)	18 (18.2)	25 (25.2)	20 (20.2)	134 (22.5)
5	8 (8.1)	13 (13.1)	7 (7.1)	9 (9.1)	14 (14.1)	12 (12.1)	63 (10.6)
6	7 (7.1)	2 (2.0)	6 (6.1)	5 (5.0)	7 (7.1)	8 (8.1)	35 (5.9)
7	18 (18.2)	15 (15.1)	2 (2.0)	16 (16.2)	15 (15.1)	23 (23.2)	89 (14.9)
8		2 (2.0)		3 (3.0)	1 (1.0)		6 (1.0)
9	1 (1.0)		1 (1.0)	1 (1.0)			3 (0.5)
10	2 (2.0)	1 (1.0)	1 (1.0)	4 (4.0)	2 (2.0)	5 (5.0)	15 (2.5)
11	1 (1.0)	1 (1.0)		1 (1.0)	1 (1.0)	1 (1.0)	5 (0.8)
12	1 (1.0)			5 (5.0)	1 (1.0)		7 (1.2)
13		1 (1.0)				1 (1.0)	2 (0.3)
14	1 (1.0)	3 (3.0)		2 (2.0)			6 (1.0)
Total	99 (16.7) [‡]	99 (16.7)	99 (16.7)	99 (16.7)	99 (16.7)	99 (16.7)	594 (100)

Claves: no asistió a la escuela (1), 1° de primaria (2), 2° de primaria (3), 3° de primaria (4), 4° de primaria (5), 5° de primaria (6), 6° de primaria (7), 1° de secundaria (8), 2° de secundaria (9), 3° de secundaria (10), carrera técnica terminada (11), 1° de preparatoria (12), normal superior terminada (13); licenciatura (14).

[†] Porcentaje con relación a n' = 99

[‡] Porcentaje con relación a n = 594

porcentajes son bajos si se comparan con los agricultores del estado de Durango, donde se determinó que 37.3% de los productores leen el periódico semanalmente, y de dos a cinco veces 16.0% (Gutiérrez, 1989).

Entre las razones por las cuales 78.8% de los entrevistados no se exponen a periódicos destacaron las siguientes: no saben donde se consiguen (7.9%), falta de tiempo (10.9%), no cuentan con dinero para comprarlos (5.5%), no les gusta (14.8%) y otras (no sabe leer, no se distribuyen en su comunidad, no puede leer, y son de poco interés).

En cuanto a la Sección Agropecuaria que publica semanalmente el personal del CECAL en el periódico Momento de la ciudad de Zacatecas, Zac., sólo 5.9% de los entrevistados señalaron haberla leído, lo cual se puede deber a que este diario circula principalmente en las ciudades de Zacatecas y Fresnillo. Para incrementar la lectoría de esta página agrícola, es necesario colocarla en lugares visibles (en diferentes comunidades), con el propósito de que la información publicada puede ser leída por un mayor número de personas.

Sobre este medio Frías *et al.* (1966) afirmaron que los productores que se exponen a los diarios son los que tienen un nivel de escolaridad más alto, mejor nivel social y económico, son los más influyentes, y los que pueden multiplicar los mensajes, ya que en muchas ocasiones ejercen influencia sobre la condición de los demás.

Folletos y revistas. Se determinó que del total de entrevistados, solamente 23.4% se exponen a folletos y revistas agropecuarias; de este total, 33.1% recordó el nombre de las revistas a las cuales se exponen y 66.9% no lo hicieron; estos resultados concuerdan con los encontrados por Carbonell (1978), Pardo (1980) y Gutiérrez (1989).

La frecuencia con que los receptores leen estos impresos son: dos veces por semana (1.4%), cada semana (5.0%), cada mes (8.6%), cada dos meses (2.2%), y de vez en cuando 82.8%. Entre las revistas que leen los productores destacaron: El Surco y Agricultura de las Américas; además, se determinó que 10 de éstos se habían expuesto a publicaciones editadas en el Campo Experimental Calera (CECAL), 22 a folletos de la SAGAR, 113 a folletos y boletines distribuidos por casas comerciales y siete a publicaciones de la Unión Regional Ganadera de Zacatecas. Tomando en consideración que el analfabetismo por parte de los productores no es un factor limitativo para que éstos reciban información agropecuaria por medio de folletos, es necesario intensificar el uso de publicaciones, tanto por el CECAL, como por las demás instituciones que enfocan su trabajo para el desarrollo rural.

Radio. Sobre la exposición al radioreceptor, se encontró que 82.5% de los entrevistados se exponen a este medio. Lo anterior confirma que en el área rural éste sigue siendo uno de los de mayor penetración, y los resultados coinciden con los encontrados por otros

autores (Victoria y Miltón, 1974; Telles, 1975; Carbonell, 1978; Rodríguez, 1987; Loaiza *et al.*, 1988).

El mayor porcentaje (83.5%) de los productores que escuchan la radio lo hacen diariamente de 30 minutos a tres horas, 15.1% de cuatro a seis, 1.0% de siete a nueve, y 0.4% lo hacen de 13 a 15 horas.

Solamente 43 productores se exponen a programas radiofónicos agropecuarios, destacando los que se localizan en los DDR de Zacatecas y Fresnillo. Dentro de los programas transmitidos destacó "Amanecer en el Campo", que transmite semanalmente el personal del CECAL, en las radiodifusoras XEYQ de la ciudad de Fresnillo, Zacatecas, y en la XHZH de la ciudad de Zacatecas, Zac.

Televisión. De los productores 87.7% se exponen a este medio de comunicación, y es similar al porcentaje de frecuencia en cada uno de los DDR; en la fecha en que se realizó el presente estudio, los entrevistados no reportaron recibir ningún tipo de mensajes enfocados al sector agropecuario, por lo cual se deben transmitir en la televisión local mensajes dirigidos a la población rural; éstos pueden ser emitidos en forma de cápsulas informativas, o bien por medio de programas estructurados.

Demostraciones. Del total de productores entrevistados, se determinó que solamente 1.2% asistieron durante 1997 y el primer semestre de 1998 a demostraciones relacionadas con temas agropecuarios, destacando los productores de los DDR de Río Grande, Jalpa, Tlaltenango y Fresnillo. Los principales temas tratados durante las demostraciones fueron: manejo de ganado bovino (40.9%), maíz (18.2%), frijol (12.1%), duraznero (6.1%), chile (6.1%), forrajes (3.0%), fertilización (3.0%), nopal tunero (3.0%), sorgo (1.5%), vid (1.5%), encalado de suelos (1.5%) y huertos familiares (1.5%). Estos eventos fueron organizados principalmente por el PEAT, casas comerciales que distribuyen equipo y maquinaria agropecuaria, y la Unión Ganadera Regional. Es importante destacar, que la adopción de innovaciones aumenta en la medida que los productores asisten a un mayor número de demostraciones (Aragón, 1966; Pérez, 1972; Carbonell, 1978).

Chávez (1987) comentó que las parcelas demostrativas son un excelente medio de comunicación grupal para difundir la tecnología generada en las instituciones de investigación; además, éstas permiten conocer cuál es el punto de vista de los productores y

técnicos sobre las nuevas tecnologías, y es un medio que ayuda a establecer confianza de los mismos hacia estas instituciones (Hijar, 1981). Por su parte, Aragón (1966), al evaluar la demostración agrícola anual del Centro de Investigaciones Agrícolas del Bajío, concluyó que ésta había influido en 20% en el incremento del nivel tecnológico en la región del Bajío; además, este autor afirmó que las demostraciones tienen un efecto educativo indiscutible, a la vez que cubren una amplia porción de los agricultores. Por lo anterior, se debe intensificar el uso de estos eventos (de métodos y resultados), como medio para acelerar el proceso de adopción de innovaciones.

Finalmente, es importante destacar, que la exposición de los productores a medios de comunicación influye en el uso de nuevas tecnologías (Martínez, 1963; Aragón, 1966; Rogers y Shoemaker, 1974; Galindo, 1992b).

Medios de Comunicación Preferidos

Las pláticas, los cursos de capacitación y la televisión resultaron ser los medios de comunicación preferidos por los productores para recibir información de tipo agropecuario; siguieron los periódicos, las revistas, los folletos, la radio y finalmente los audiovisuales (Cuadro 3).

Sobre los medios de comunicación Rogers y Shoemaker (1974) afirmaron que los masivos revisten mayor relevancia en la función de conocer, y los interpersonales acusan mayor importancia en la función de persuadir, dentro del proceso de decisión de innovar. Por su parte, Nava (1983) y Galindo (1992b) concluyeron que el contacto con medios de comunicación depende de las siguientes variables: edad, tamaño de la familia, escolaridad, cosmopolitismo, contacto con instituciones del sector agropecuario, ocupación, posición económica, nivel tecnológico y contacto con extensionistas.

Edad

De los productores 33.2% tienen una edad de 44 a 56 años, 26.8% de 57 a 69, 20% de 31 a 43, 12.4% de 70 a 82, 6.2% de 18 a 30, y más de 83 años 1.3%, lo cual muestra que la mayoría de la población tiene una edad avanzada. Sobre esta variable, Reyna *et al.* (1981), Rodríguez (1987) y Galindo (1995) determinaron asociación negativa entre la edad y el

Cuadro 3. Medios de comunicación que prefieren los productores para recibir información agropecuaria.[†]

Escolaridad	DDR						Total
	Fresnillo	Jalpa	Ojocaliente	Río Grande	Tlaltenango	Zacatecas	
1	22 (22.2) [‡]	24 (24.2)	40 (40.4)	39 (39.4)	40 (40.4)	42 (42.4)	207 (34.8) [§]
2	45 (45.4)	34 (34.3)	21 (21.2)	17 (17.2)	21 (21.2)	34 (34.3)	172 (28.9)
3	19 (19.2)	21 (21.2)	37 (37.4)	31 (31.3)	17 (17.2)	18 (18.2)	143 (24.1)
4	14 (14.1)	20 (20.2)	28 (28.3)	26 (26.3)	26 (26.3)	19 (19.2)	133 (22.4)
5	9 (9.1)	17 (17.2)	11 (11.1)	20 (20.2)	14 (14.1)	16 (16.2)	87 (14.6)
6	11 (11.1)	13 (13.1)	7 (7.1)	18 (18.2)	10 (10.1)	15 (15.1)	74 (12.4)
7	5 (5.0)	4 (4.0)	7 (7.1)	2 (2.0)	3 (3.0)	7 (7.1)	28 (4.7)
8	1 (1.0)	3 (3.0)		3 (3.0)	1 (1.0)	2 (2.0)	10 (1.7)

Claves: pláticas (1), cursos de capacitación (2), televisión (3), periódicos (4), revistas (5), folletos (6), radio (7), y audiovisuales (8).

[†] Algunos productores señalaron más de un medio.

[‡] Porcentaje con relación a n^o=99.

[§] Porcentaje con relación a n= 594.

uso de innovaciones, lo cual indica que al disminuir la edad de los productores aumenta el uso de éstas.

Ingreso Económico

El mayor porcentaje de los productores que proporcionaron información sobre sus ingresos reciben cantidades mensuales menores que \$ 1515, el cual se considera bajo; solamente 13.9% de éstos cuentan con ingresos mayores que la cantidad mencionada. Sobre esta variable, Becerra (1982) concluyó que los ingresos económicos de un productor son determinantes para el uso de nuevas tecnologías de producción.

Contacto con Casas Comerciales Agropecuarias

De los productores 53.8% mencionaron haber estado en relación durante 1997 y el primer semestre de 1998 con casas comerciales que distribuyen productos para el campo; el mayor porcentaje de éstos (92.0%) afirmó haber realizado de una a seis visitas, durante el período señalado. La principal razón por la cual los productores acuden, es para adquirir fertilizantes, insecticidas, herbicidas y semillas, entre otros. Es necesario que a estas empresas se les alimente con información generada en las instituciones de investigación, para asegurar que las sugerencias que éstas proporcionan sean las adecuadas. Dentro del proceso de adopción de tecnología, las casas comerciales ocupan un lugar importante en las etapas de prueba y adopción (Rogers y Beal, 1960).

Espíritu de Innovación

Semillas mejoradas. Sobre el uso de este insumo, se determinó que solamente 20.8% de los productores mencionaron haber sembrado semillas mejoradas durante el período señalado, principalmente en los DDR de Jalpa, Fresnillo y Río Grande. De la población que siembra este tipo de semillas, 64.5% tiene de uno a cinco años de hacerlo, 20.5% de seis a 10 años, y el resto más de 11 años.

Fertilizantes. Se determinó que solamente 61.1% de los entrevistados aplican fertilizantes. Los DDR donde se hace más uso de este insumo, son: Río Grande, Tlaltenango y Jalpa. Por lo que respecta al tiempo que tienen los productores de aplicar fertilizantes comerciales, 15.6% de los receptores afirmaron utilizarlos desde hace menos de siete años, de siete a 12 años 16.7%, y de 13 a 18 años 12.3%; el resto tiene más de 18 años de aplicar este insumo.

Herbicida. Se logró determinar que 32.5% de los productores aplican herbicidas en sus cultivos. Los DDR donde se utiliza con más frecuencia este insumo, son: Tlaltenango, Jalpa, Fresnillo y Río Grande. En lo que toca a los años que tienen éstos de utilizar herbicidas, 23.8% tiene menos de 11 años.

Insecticidas. De los entrevistados 42.6% mencionaron haber aplicado insecticidas. Específicamente, en el DDR de Fresnillo, 100% de los productores aplican este insumo.

Al considerar los indicadores señalados (uso de semillas mejoradas, fertilizantes, herbicidas e insecticidas) en cada uno de los productores seleccionados fue posible establecer las siguientes categorías con respecto al total de la población: bajo espíritu de innovación (43.0%), mediano (30.0%), alto

(20.0%) y muy alto (7.0%). Las dos últimas categorías las ocupan principalmente productores que siembran bajo condiciones de riego.

Tomando en consideración que el espíritu de innovación denota el grado en que un individuo se adelanta a otro dentro de su sistema social en la adopción de nuevas ideas (Rogers y Svenning, 1973), existen factores implicados en la decisión de adoptar o rechazar un procedimiento nuevo, que incluyen los valores tradicionales u otros aspectos de la cultura existente, conocimientos sobre la existencia y la naturaleza del nuevo procedimiento, las metas personales y de la familia, la influencia de otros parientes, así como de los amigos y vecinos.

Sobre los primeros en conocer una innovación Rogers y Shoemaker (1974) comentaron que éstos tienen más estudios que quienes se enteran de ella posteriormente, ocupan un nivel social elevado, están expuestos a canales interpersonales, se relacionan con los extensionistas, despliegan participación social y son cosmopolitas. Los agricultores que desarrollan una agricultura tradicional no son candidatos para que adopten nuevas innovaciones aunque éstas sean apropiadas y accesibles, puesto que no pueden afrontar el riesgo inherente a ellas (Zuloaga, 1985).

Empatía

En lo que se refiere a esta variable, se definieron tres categorías: baja empatía, regular y alta; dentro de la primera se ubicó 32% de la población, en la segunda 48.0%, y en la tercera 20%. A esta variable se le considera como la capacidad de un individuo para imaginarse el mismo en el papel de otra persona, y que esta otra pueda representar un papel nuevo y desconocido, aunque no necesariamente (Rogers y Svenning, 1973). Navoa (1972), Chávez (1987) y Galindo (1995) señalaron que la empatía influye en la adopción de la tecnología.

Nivel de Vida

Se determinó que 51.1% de los productores entrevistados no cuentan en sus casas con paredes revestidas, 47.8% con techos de loza, 21.7% con agua potable, 6.2% con luz eléctrica, y 11.1% no dispone de gas doméstico. En términos generales, el nivel de vida más bajo se observa en el DDR de Ojocaliente.

Martínez (1963), Wilson y Gallup (1964), Rogers y Shoemaker (1974), así como Rodríguez (1987), asentaron que los productores que tenían un nivel de

vida mayor que el resto de los demás, son los que usan más tecnología en sus procesos de producción.

Tenencia de la Tierra

El tipo de tenencia que predomina es el ejidal (63.8%), y le sigue la pequeña propiedad (39.4%); otros tipos de tenencia que se presentan, son rentada (5.6%), comunal (22.4%) y a medias (2.0%).

Superficie Cultivada

En el DDR de Fresnillo 91.3% de los entrevistados siembran en temporal y 44.4% en riego; bajo temporal, 11.0% cultiva menos de 4 ha, 18.1% de 4 a 7 ha, 19.0% de 8 a 11, 15.0% de 12 a 15 ha y más de 15 ha 36.9%; en riego, 34.3% cultiva menos de 7 ha. Los principales cultivos que se explotan son frijol, maíz para grano, avena, trigo, chile y maíz forrajero. En temporal, el rendimiento medio de frijol fue de 416 kg ha⁻¹, y 45.5% de los que lo siembran obtienen más de 300 kg ha⁻¹. En frijol de riego, el rendimiento medio fue de 1616 kg ha⁻¹. La producción promedio de maíz de temporal fue de 587 kg ha⁻¹ y la mayoría obtiene menos de 800 kg ha⁻¹; en riego, el rendimiento aproximado de esta gramínea fue de 1500 kg ha⁻¹; la avena cultivada bajo temporal rindió en promedio 1634 kg ha⁻¹.

En el DDR de Jalpa, el mayor porcentaje de los productores cultivan bajo condiciones de temporal; de éstas, 46.5% siembran menos de 4 ha y 29.3% de 4 a 8 ha. El cultivo que predominó fue el maíz, con un rendimiento medio de 1.4 t ha⁻¹; el rendimiento promedio de otros cultivos establecidos bajo riego fueron: frijol, 1.2 t ha⁻¹; avena, 2.8 t ha⁻¹; y sorgo 2.0 t ha⁻¹.

En el DDR de Ojocaliente, 65% de los productores siembran de 4 a 12 ha y menos de 4 ha 11.1%, y solamente 11 productores cultivan en riego. De la muestra 91.9% cultivan frijol en temporal con un rendimiento promedio de 189 kg ha⁻¹, obteniendo 40.4% de éstos menos de 100 kg ha⁻¹, y 28.3% de 101 a 200 kg ha⁻¹. El rendimiento promedio de maíz bajo temporal es de 287 kg ha⁻¹ y 55.5% obtiene menos de 300 kg ha⁻¹.

En el DDR de Río Grande, la media de la superficie cultivada fue de 40.9 ha y 40.3% de los productores cultivan anualmente más de 45 ha. El 97.9% siembra bajo temporal, y solamente 6.1% de riego. El rendimiento promedio de frijol en temporal fue de 770 kg ha⁻¹, y 43.3% cosecha entre 771 y

1000 kg ha⁻¹. En maíz de temporal el rendimiento promedio es de 935 kg ha⁻¹, y éste lo siembra 40.4% de los productores.

En el DDR de Tlaltenango, los agricultores cultivan un promedio de 6.2 ha y 41.1% siembra menos de 4 ha. El rendimiento promedio de maíz bajo temporal es de 980 kg ha⁻¹ y el mayor porcentaje obtiene menos de 2000 kg ha⁻¹; en lo que respecta al promedio de rastrojo de maíz fue de 8600 kg ha⁻¹. El rendimiento promedio de frijol bajo temporal fue de 295 kg ha⁻¹, el del sorgo de 3200 kg ha⁻¹ y el del cacahuate de 2130 kg ha⁻¹.

En el DDR de Zacatecas, 88.7% cultiva en temporal y 30.3% en riego, con una superficie promedio de 19.6 ha y 11.9 ha, respectivamente. El rendimiento medio de frijol en temporal fue de 234 kg ha⁻¹ y el maíz de 269 kg ha⁻¹; bajo riego el rendimiento promedio de frijol fue de 1837 kg ha⁻¹ y el del maíz de 3700 kg ha⁻¹.

En los diferentes DDR es conocido, pero no practicado, que la rotación de cultivos es una de las prácticas más efectivas para la sostenibilidad de un suelo agrícola, así como la aplicación de abonos orgánicos.

En términos generales, se observa que los rendimientos que se obtienen en los cultivos establecidos tanto en riego como en temporal son bajos, en comparación con los que se pudieran obtener al aplicar la tecnología generada en el CECAL. En el CECAL se han generado tecnologías para los cultivos de riego, así como para las diferentes zonas temporales, clasificadas como de buen potencial, mediano, limitado y marginal; sin embargo, la mayoría de éstas no se aplican, ya que los productores no las conocen.

Uso de Crédito Agropecuario

De los entrevistados 12.4% afirman haber operado algún crédito durante 1997 y el primer semestre de 1998 para establecer sus cultivos. Del total de los que recibieron algún crédito, 90.5% les fue proporcionado por algún particular. Esta variable se relaciona significativamente con el uso de innovaciones (Reichart, 1976; Reyna *et al.*, 1981), así como con: relación con casas comerciales, tamaño de la unidad de producción, superficie cultivada bajo riego, y superficie cultivada bajo temporal (Galindo, 1995).

Apoyos Recibidos de la Alianza para el Campo

Solamente 13.8% del total de los productores entrevistados mencionaron haber recibido algún apoyo de la Alianza para el Campo, además del PROCAMPO. Los principales estímulos recibidos fueron asistencia técnica, avispas para el control biológico, y semillas (por medio del programa kilo x kilo). El DDR que recibió el mayor número de apoyos fue el de Tlaltenango.

Problemas que Enfrentan los Productores en sus Cultivos

En términos generales, los principales problemas que manifestaron enfrentar los productores agrícolas en sus cultivos en orden de importancia son: sequía, plagas, enfermedades, maleza, altos costos de producción, deficiente comercialización, granizo, heladas y falta de recursos económicos para invertir en el campo.

CONCLUSIONES

- Existe buena relación de los productores con el personal técnico de la SAGAR, debido principalmente al PROCAMPO. Su contacto con otras instituciones del sector es bajo, y casi nula su relación con instituciones que generan innovaciones para el medio rural. El principal apoyo que han recibido de la Alianza para el Campo es la asistencia técnica.
- La escolaridad de los receptores y la relación con periódicos, folletos, revistas y demostraciones es baja; la edad es alta, lo que limita seriamente a los productores para que reciban información por medios masivos de comunicación.
- Los ingresos económicos que reciben los productores son bajos, lo cual se relaciona con su nivel de vida. Predomina entre éstos un bajo espíritu de innovación y una mediana empatía.
- El principal tipo de tenencia de la tierra es el ejidal y los rendimientos que se obtienen son bajos, en comparación con los obtenidos al aplicar los resultados de las investigaciones realizadas en la entidad.
- Es bajo el número de productores que operan algún tipo de crédito agropecuario, y éste es proporcionado principalmente por particulares.
- El principal problema que enfrentan los productores en el campo zacatecano es la sequía.

RECONOCIMIENTO

Esta investigación se realizó en coordinación entre el Campo Experimental Calera, dependiente del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, y la Universidad Autónoma de Fresnillo, con el apoyo económico de la fundación PRODUCE Zacatecas, A. C.

LITERATURA CITADA

- Alvarez, G., G. Martínez V. y H. Díaz C. 1985. La utilización de la tecnología en dos comunidades del Plan Mixteca Alta, estado de Oaxaca; el caso de las recomendaciones para el maíz de temporal. *Agrociencia* 61: 113-123.
- Aragón V., O. 1966. Evaluación de la demostración agrícola a partir de la adopción de cinco técnicas en la población rural del área de influencia del CIAB. Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Agricultura, México.
- Becerra B., F. 1982. Factores socioeconómicos de los productores de maíz y su relación con la adopción de insumos mejorados; el caso de una zona maicera del estado de México. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, México.
- Carbonell A., M. 1978. El radio como medio de información; un caso en el municipio de Xochiamulco, Puebla. Colegio de Postgraduados, México.
- Chávez C., H. 1987. La parcela de validación; un proceso de comunicación para la tecnología agrícola. Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Atemajac, División de Ciencias Sociales y Humanidades, México.
- Frias M., H. Ramsa Y. y R. Beltrán. 1966. Extensión agrícola, principios y técnicas. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Perú.
- Galindo G., G. 1992a. Diagnóstico de la extensión agropecuaria en Zacatecas. *Fitotecnia Mexicana* 15(2): 169-177.
- Galindo G., G. 1992b. Canales de comunicación de los productores agropecuarios del centro de Zacatecas. *Ciencia* 47(4): 371-379.
- Galindo G., G. 1994. Informe de actividades del programa de divulgación técnica del CECAL. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México.
- Galindo G., G. 1995. Uso de innovaciones agrícolas en la región central de Zacatecas. *Fitotecnia Mexicana* 18(2): 140-150.
- García C., G. 1985. La adopción de innovaciones a través del uso del método del productor experimentador y sus efectos en el sector productivo regional. pp.121-122. *In: R. Pérez C. (ed.). Experiencias metodológicas de la difusión de tecnología en el INIA. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, México.*
- Gaytán E., F. 1970. Identificación de los principales problemas, líderes y medios de información actuales y preferidos del ganadero en el estado de Nuevo León. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Escuela de Agricultura y Ganadería, México.
- Gómez A., G. 1999. Análisis del sistema nacional de extensión rural y del programa elemental de asistencia técnica en Zacatecas. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Fresnillo, México.
- Gutiérrez G., R. 1989. Los medios de comunicación, su uso y preferencia por agricultores de Durango. Folleto Misceláneo No. 1. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental Valle del Guadiana, México.
- Hijar F., R. 1981. La demostración agrícola como eje de una estrategia para el desarrollo regional. pp. 177-182. *In: C. González (ed.). Experiencias metodológicas de la difusión de tecnología en el INIA. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, México.*
- Loaiza C., A. et al. 1988. Efectividad de algunos medios de comunicación en la transferencia de tecnología a la mujer rural. pp. 81-87. *In: Boletín de Investigación No. 731. Ministerio de Agricultura, Instituto Colombiano Agropecuario, Colombia.*
- Luna F., M. y G. Galindo G. 1997. La agricultura en Zacatecas; un estado mexicano. *Agrociencia* 13: 77-90.
- Martínez R., J. 1963. Difusión y adopción del maíz híbrido en cuatro municipios del estado de Guanajuato. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Agricultura, México.
- Mendoza M., S. 1979. Rendimientos de cultivos y necesidades de información técnica de ejidatarios, colonos y pequeños propietarios del Valle del Yaqui, Sonora. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, México.
- Nava V., L. 1983. La exposición a la información y factores que influyen en la percepción de problemas técnico-agrícolas en maíz por los productores del Distrito de Riego N° 18 del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, México.
- Navoa B., R. 1972. Sistema de comunicación e interacción entre técnicos y agricultores: un estudio en el Plan Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, México.
- Pardo P., R. 1980. Educación y comunicación en el medio rural: ideología dominante y texto escolar entre campesinos de Tlaxcala. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, México.
- Pérez C., C. 1972. Impacto de las demostraciones ganaderas realizadas en el rancho El Puerto, municipio de Musquiz, Coahuila. Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.
- Reichart, N. 1976. Análisis crítico de los diversos enfoques a sistemas de transferencia de tecnología agrícola en América Latina. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Uruguay.
- Reyna C., E., M. Portillo V. y J. Sánchez C. 1981. Adopción de tecnología agrícola para el impulso de la producción de maíz en el estado de Tlaxcala, México. Folleto de Investigación No. 61. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Rodríguez G., F. 1987. Caracterización de los productores de cacao en el estado de Tabasco, mediante el análisis de correspondencia. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana, Facultad de Estadística, México.
- Rogers, E. y M. Beal. 1960. The adoption of the farm practices in a central Iowa community. Ames, Iowa. Special Report No. 26.
- Rogers, M. y F. Shoemaker. 1974. Communication of innovations, a cross cultural approach. The MacMillan Co., USA.

- Rogers, M. y L. Svenning. 1973. *Modernization among peasants, the impact of communication*. Holt, Rinehart and Winston, USA.
- Sahagún C., S. y A. Méndez A. 1985. Diagnóstico de la tecnología de producción de maíz asociado con frijol en la región de Atlautla Ecatzingo estado de México. pp. 48. *In*: C. Pérez (ed.). *Experiencias metodológicas de la difusión de tecnología en el INIA*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, México.
- Tapia N., A., A. Hernández y A. Mejía. 1991. Diagnóstico de los extensionistas de las áreas maiceras en el estado de Guanajuato. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, México.
- Telles S., J. 1975. *La comunicación en el oriente Antioqueño*. Boletín de Investigación No. 34. Ministerio de Agricultura, Instituto Colombiano Agropecuario, Colombia.
- Ugalde A., J., E. Cruz P. y J. Reyes. 1989. Alcance e impacto de la página agrícola "El Campo Cotaxtla Informa", en la zona central del estado de Veracruz. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental Cotaxtla, México.
- Victoria, L. y G. Miltón. 1974. *Información básica sobre radio en el área rural del Valle del Cauca*. Ministerio de Agricultura, Instituto Colombiano Agropecuario, Colombia.
- Wilson, C. y G. Gallup. 1964. *Métodos de enseñanza en extensión, y otros factores que influyen en la adopción de prácticas agrícolas y de economía del hogar*. Centro Regional de Ayuda Técnica, México.
- Zuloaga A., A. 1985. La experiencia metodológica para validar y difundir tecnología de maíz en el CEVAMEX. pp. 263-285. *In*: C. Pérez (ed.). *Experiencias metodológicas de la difusión de tecnología en el INIA*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, México.