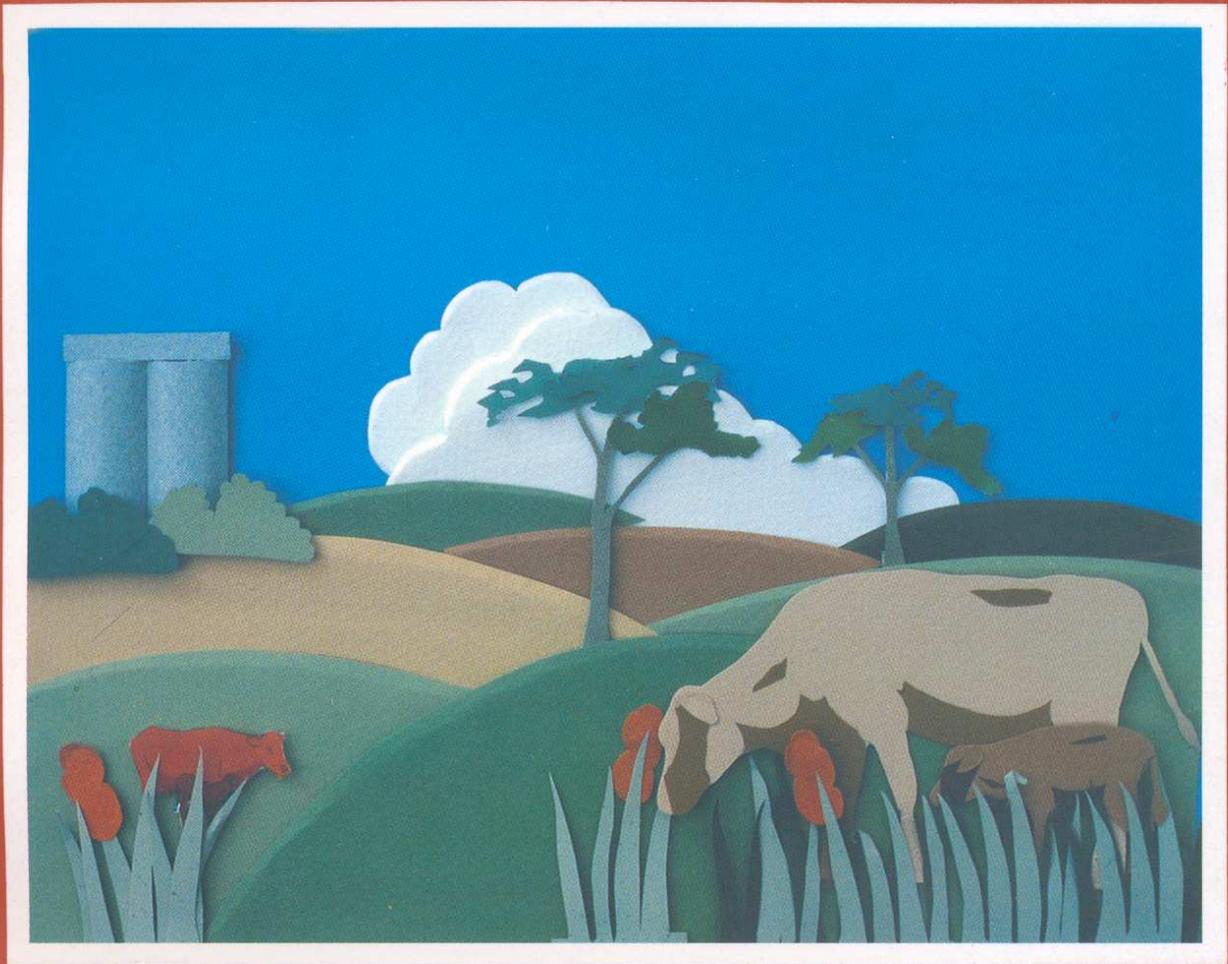


ISSN 0187-5779

TERRA

Latinoamericana

ABRIL - JUNIO DE 2005 • VOLUMEN 23 NÚMERO 2



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

TERRA *Latinoamericana*

ABRIL – JUNIO DE 2005 · VOLUMEN 23 · NÚMERO 2

<http://www.chapingo.mx/terra/>

terra@correo.chapingo.mx

TERRA *Latinoamericana* es una publicación trimestral, de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Tiene como finalidad difundir la investigación edafológica generada en el ámbito latinoamericano

TERRA *Latinoamericana* está indizada en AGRIS (FAO), AGRICOLA (USDA), CAB ABSTRACTS Y PERIODICA.

TERRA *Latinoamericana* está incluida en el Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica del CONACYT.

TERRA

Latinoamericana

COMITE EDITORIAL

EDITOR	Dr. Antonio Vázquez Alarcón
EDITORES ADJUNTOS	Dra. Carmen Gutiérrez Castorena M.C. Jorge Alvarado López M.C. Joel Pineda Pineda
EDITORES TÉCNICOS	Dr. David Cristóbal Acevedo Dr. David Espinosa Victoria Dr. Manuel Sandoval Villa Dr. Mateo Vargas Hernández Dra. Carmen Gutiérrez Castorena Dra. Edna Alvarez Sánchez Dra. Ma. del Carmen González Chávez
EDITORES DE ESTILO	Ina Aalmers de Aguilar
EDITORA DE ESTILO EN INGLES	Diane Fumiko Miyoshi Udo

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

Ina Aalmers de Aguilar
Ma. de Lourdes Sánchez Arellano
Angelina Ponce Soriano
Ricarda Torres Estrada

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

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

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

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

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

TERRA

Latinoamericana

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 2005-2007

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

DIVISIONES Y DISCIPLINAS

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

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

División II: Relación Suelo - Clima - Biota

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

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

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

División IV: Educación y Asistencia Técnica

- a) Educación
- b) Crédito y Asistencia Técnica

TERRA Latinoamericana registro en trámite.
Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Abril - Junio de 2005 Volumen 23 Número 2
ISSN 0187 - 5779

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

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

Teléfono y Fax +01(595) 952 17 21
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

TERRA

Latinoamericana

EDITORIAL COMMITTEE

EDITOR	Dr. Antonio Vázquez Alarcón
ASSOCIATE EDITORS	Dra. Carmen Gutiérrez Castorena M.C. Jorge Alvarado López M.C. Joel Pineda Pineda
TECHNICAL EDITORS	Dr. David Cristóbal Acevedo Dr. David Espinosa Victoria Dr. Manuel Sandoval Villa Dr. Mateo Vargas Hernández Dra. Carmen Gutiérrez Castorena Dra. Edna Alvarez Sánchez Dra. Ma. del Carmen González Chávez
STYLE EDITORS	Ina Aalmers de Aguilar
ENGLISH EDITOR	Diane Fumiko Miyoshi Udo
EDITORIAL STAFF	Ina Aalmers de Aguilar Ma. de Lourdes Sánchez Arellano Angelina Ponce Soriano Ricarda Torres Estrada
Cover design	Gardenia Chávez Peña
Website administrator	Moisés Gómez Díaz

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

TERRA

Latinoamericana

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

President
Vicepresident
Secretary
Treasurer
Technical Adviser
International Relations
Voters

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

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Assistance

TERRA *Latinoamericana* Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
April - June, 2005 Volume 23 Num. 2

ISSN 0187 - 5779

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

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

Telephone - Fax: +52 (595) 952 17 21
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

TERRA

Latinoamericana

ABRIL - JUNIO DE 2005 • VOLUMEN 23 • NUMERO 2
APRIL - JUNE, 2005 • VOLUME 23 • NUMBER 2

DIVISION I

- 147** Cronosecuencia de un suelo y su clasificación en un área originalmente ocupada por bosque mesófilo de montaña.
Soil chronosequence and its classification in an area originally occupied by mountain cloud forest.
Angélica Bautista-Cruz, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena, Rafael F. del Castillo-Sánchez y Jorge D. Etchevers-Barra
- 159** Zonificación agroecológica para aguacate en la zona central de Venezuela.
Agroecological zones for avocado in the central part of Venezuela.
Adriana Lelys Cortéz-Marin, Lorenzo A. Aceves-Navarro, Ramón Arteaga-Ramírez y Mario A. Vázquez-Peña
- 167** Estimación temprana del rendimiento de la cebada mediante uso de sensores remotos.
Early estimation of barley yield using remote sensing.
Paulino Ruiz-Huanca, Enrique Palacios-Vélez, Enrique Mejía-Saenz, Adolfo Exebio-García, José Luis Oropeza-Mota y Martín Bolaños-González
- 175** Contenido y distribución de las formas de hierro en algunos suelos de la Sierra Norte de Puebla, México.
Content and distribution of iron forms in some soils of the Sierra Norte of the Puebla State, Mexico.
Eloy Camacho-Díaz, Jesús Ruiz-Careaga, Mariela Deyta-Sánchez, Yoli Deyta-Sánchez y Miguel García-Gamboa
- 183** Caracterización inorgánica del agua del río Texcoco, entre épocas del año y años.
Inorganic characterization of water in the Texcoco river, among seasons and years.
Hermilio Navarro-Garza y Ma. Antonia Pérez-Olvera

TERRA

Latinoamericana

DIVISION II

191 Desarrollo de un sistema generador de modelos altimétricos para la República Mexicana.

Development of a generating system of altimetric models for the Mexican Republic.

*Felipe J.A. Pedraza-Oropeza, Enrique Mejía-Saenz,
Baltasar Cuevas-Renaud, Adolfo Exebio-García
y José Luis Oropeza-Mota*

201 Fertilización, tipos de suelo y hongos micorrízicos y endófitos radicales asociados al eucalipto.

Effect of fertilization and soil type on mycorrhizal and root endophytic fungi associated with eucalypt.

*V.M. Perea-Estrada, J. Pérez-Moreno, M.L. de la Isla-de Bauer,
M.E. Fenn, A. Trinidad-Santos y T. Hernández-Tejeda*

213 Metodología para estimar pérdidas por infiltración en canales de tierra.

Methodology to estimate losses by infiltration in soil channels.

*Adolfo Exebio-García, Enrique Palacios-Vélez,
Enrique Mejía-Saenz y Víctor Ruiz-Carmona*

NOTA DE INVESTIGACION / Research Note

225 Anillado y ácido giberélico en la producción, calidad del fruto y nivel nutrimental en mandarina 'Mónica'.

Girdling and gibberellic acid sprays in production, fruit quality and nutrient level in 'Monica' mandarin.

*Gerardo Pérez-Madrid†, Gustavo Almaguer-Vargas,
Ranferi Maldonado-Torres, Edilberto Avitia-García
y Ana María Castillo-González*

DIVISION III

233 Crecimiento y producción de zarzamora cv. Cheyenne con cubiertas orgánicas.

Growth and production of Cheyenne blackberry under organic mulching.

*Rafael A. Parra-Quezada, Gerardo F. Acosta-Rodríguez
y Jesús G. Arreola-Ávila*

TERRA

Latinoamericana

- 241** Producción de jitomate con estiércol líquido de bovino, acidulado con ácidos orgánicos e inorgánicos.
Tomato production with liquid extract of cattle manure, acidulated with organic and inorganic acids.

*Juan Capulín-Grande, Roberto Núñez-Escobar,
Prometeo Sánchez-García, Ángel Martínez-Garza
y Marcos Soto-Hernández*

- 249** Cálculo del tratamiento óptimo económico de insumos agrícolas mediante un procedimiento numérico discreto.
Calculation of the optimum economic treatment of agricultural inputs using a discrete numeric procedure.

*Ernesto Aceves-Ruiz, Antonio Turrent-Fernández,
José I. Cortés-Flores y Víctor Volke-Haller*

NOTA DE INVESTIGACION / Research Note

- 257** Rotación maíz-avena forrajera con labranza de conservación en el altiplano de San Luis Potosí, México.
Corn-forage oats rotation with conservation tillage in the plateau of San Luis Potosi, Mexico.

M.A. Martínez-Gamiño y C. Jasso-Chaverría

ENSAYO / Essay

- 265** Ciencia y tecnología en la agricultura mexicana: I. Producción y sostenibilidad.
Science and technology in Mexican agriculture: I. Food production and sustainability.

Antonio Turrent-Fernández y José Isabel Cortés-Flores

- 273** Ciencia y tecnología en la agricultura mexicana: II. Producción de alimentos.
Science and technology in Mexican agriculture: II. Food production.

Antonio Turrent-Fernández y José Isabel Cortés-Flores

CRONOSECUENCIA DE UN SUELO Y SU CLASIFICACIÓN EN UN ÁREA ORIGINALMENTE OCUPADA POR BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA

Soil Chronosequence and its Classification in an Area Originally Occupied by Mountain Cloud Forest

Angélica Bautista-Cruz^{1‡}, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena²,
Rafael F. del Castillo-Sánchez¹ y Jorge D. Etchevers-Barra²

RESUMEN

El subtropical húmedo montañoso alberga bosques mesófilos, uno de los ecosistemas más diversos y alterados por el hombre. Estos bosques comúnmente son destruidos para sembrar maíz; sin embargo, una vez agotada su fertilidad, las tierras son abandonadas y repobladas naturalmente por bosques secundarios. La influencia de estos cambios en las propiedades del suelo y en las categorías taxonómicas es desconocida. Por ello, en este trabajo se estudió una cronosecuencia ocupada originalmente por bosque mesófilo de montaña compuesta por milpa, acahual de ca. 15 años, y bosques de ca. 45, 75 y > 100 años, en El Rincón, Oaxaca, México. En cada etapa, se describió un perfil de suelo y se realizaron análisis físicos, químicos, mineralógicos y micro-morfológicos de los horizontes para su clasificación. Los suelos de bosques secundarios jóvenes iniciaron con un horizonte úmbrico y un cámbico, y terminaron con un horizonte folístico y un sómbrico (bosques secundarios maduros). La acidez y la materia orgánica del suelo incrementaron con la edad del bosque. Los tres grados de descomposición de la materia orgánica (sáprico, hémico y fíbrico) también incrementaron; dominaron los hongos, y los minerales primarios como la clorita y la moscovita se alteraron. Además, se inhibió la formación de gibbsita debido al alto contenido de materia orgánica. A pesar de estos cambios, todos los suelos de bosque estudiados se clasificaron como Inceptisols; aunque aquellos de etapas sucesionales juveniles (bosques de 15 y 45 años) fueron *Humic Dystrudepts* a diferencia de bosques más viejos

(> 75 años) que resultaron *Typic Dystrudepts*. El suelo agrícola se clasificó dentro de los Entisols como *Typic Udorthents*. Se encontraron dos horizontes de diagnóstico no contemplados dentro de los Inceptisols: el sómbrico y el folístico en el bosque de 100 años. Se propone el subgrupo *Sombric* para incluir a los Inceptisols con un horizonte sómbrico.

Palabras clave: Entisols, Inceptisols.

SUMMARY

Tropical mountain cloud forests (TMCF) are common in mountainous humid subtropical areas. These ecosystems are among the most endangered, as they are commonly cleared for cropping. After fertility decreases, the plots are abandoned and secondary forests invade the area. The role of such changes in soil taxonomy is unknown. Therefore, we studied a chronosequence originally occupied by a TMCF with five stages: corn field, and forests of ca. 15, 45, 75, and > 100 years after abandonment, at El Rincón, State of Oaxaca, Mexico. At each stage, we described a soil profile and conducted physical, chemical, mineralogical, and micro-morphological analyses of the horizons for soil classification. We detected umbric and cambic horizons, at early stages of succession, and folistic and sombric horizons, at mature stages. As the age of the forest increased, acidity and the soil organic layer, with its three degrees of decomposition (sapric, hemic, and fibric), increased, fungi dominated, and primary minerals, such as chlorite and muscovite, were altered. Finally, the build up of gibbsite was inhibited, apparently by the high content of soil organic matter. All the forest soils were in the order Inceptisols. However, soils from young forests (ca. 15 and 45 years after abandonment) were classified as *Humic Dystrudepts*. By contrast, soils of latter stages (> 75 years) were *Typic Dystrudepts*. The crop soil belongs to the order Entisols and the suborder *Typic Udorthents*. We found two diagnostic horizons not previously

¹ Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional. Hornos 1003, 71230 Xoxocotlan, Oaxaca, México.

[‡] Autor responsable (mbautistac@ipn.mx)

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

considered in the Inceptisols: a sombric horizon and a folistic horizon in the soil of > 100-year-old forest. We propose the subgroup *Sombric* to be included in Inceptisols with a sombric horizon.

Index words: *Entisols*, *Inceptisols*.

INTRODUCCIÓN

En México, grandes áreas de bosque mesófilo se han sometido a perturbaciones humanas en diferentes épocas (Williams, 1992). De 1971 a 1991 se perdieron, en una tasa promedio, 78 687 ha año⁻¹ de bosque mesófilo (Ortega y Castillo, 1996), comunidades que posteriormente fueron reemplazadas por bosques secundarios. La vegetación juega un papel importante en determinar la naturaleza y propiedades de los suelos; al cambiar ésta, se modifica la estructura y función del ecosistema, y se alteran, en particular, los ciclos biogeoquímicos del horizonte superficial (Buol, 1994). Además, pueden producirse cambios marcados en el suelo en unas cuantas décadas (Daubenmire, 1974). Las coníferas, por ejemplo, alteran el suelo como resultado de la acidificación causada por diversos mecanismos: lavado de bases, producción de ácidos orgánicos y H₂CO₃, hidrólisis ácida, nitrificación y actividad fúngica (Urrego, 1997). Esta acidificación puede producir cambios drásticos en la evolución del suelo, es decir, pasar de un epipedón móllico a un úmbrico por el hecho de reemplazar una vegetación graminoide por un solo individuo de *Pinus radiata*. (Amiotti *et al.*, 2000).

A los cambios producidos por unidad de tiempo en un conjunto de suelos que comparten una comunidad común de organismos, clima, material parental y pendiente se le denomina cronosecuencia (Brady y Weil, 1999). El método de la cronosecuencia es ampliamente usado para examinar los cambios en el suelo y el ecosistema a través del tiempo; sin embargo, la selección del sitio es una etapa crítica. Las fuentes de variación espacial deben ser mínimas, comparadas con los efectos atribuibles al tiempo (Pickett, 1989).

El bosque mesófilo del sureste de México posee, por unidad de área, la biodiversidad más alta en el país (Rzedowski, 1991). No obstante, por razones de cambio de uso del suelo, este ecosistema se está modificando rápidamente y el paisaje original (bosque) se ha convertido en un mosaico de campos de cultivo y vegetación secundaria. Este bosque se caracteriza por un material parental homogéneo de

micas esquistos, pendientes pronunciadas, clima templado húmedo, lo cual ofrece una oportunidad única en este tipo de ecosistemas para estudiar una cronosecuencia.

El propósito de este trabajo fue estudiar los cambios en las propiedades del suelo con el incremento en la edad de los bosques y cómo éstos han influido en la formación de horizontes de diagnóstico y, por ende, en las categorías taxonómicas del suelo, en un bosque mesófilo de montaña.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la región de El Rincón, de la Sierra Norte de Oaxaca, México, entre 17° 15' y 17° 30' N y 95° 15' y 96° 25' O. La topografía es montañosa, con pendientes del orden de 5 a 120% y altitudes de 800 hasta 2300 m, sin embargo, este estudio se concentra a una altitud de 1850±150 m. La precipitación media anual en la estación meteorológica más cercana de Villa Alta (*ca.* a 16 km del sitio de estudio) es de 1719 mm año⁻¹. La temporada lluviosa es en verano y la seca en invierno. La temperatura media anual varía entre 20 y 22 °C (INEGI, 1999).

El clima es templado húmedo a subhúmedo (CONABIO, 2002). El régimen de humedad del suelo es údico (Van Wambeke, 1987). La geología se constituye principalmente por rocas metamórficas que consisten en esquistos del Complejo Mazateco, del Mesozoico (CRM, 1996).

Después de un recorrido exhaustivo de la zona, se encontró una cronosecuencia donde el material parental, el relieve y el clima son idénticos, condición muy difícil de encontrar pues los factores de formación en un ambiente escarpado varían en metros. En esta cronosecuencia se encontró que el sistema tiene cinco periodos: campo de cultivo (0 años), acahual (15 años), bosques secundarios (45 y 75 años) y bosque maduro (≥ 100 años) a partir del abandono.

La edad de los bosques se determinó con base en el conteo de anillos de crecimiento en virutas de madera de *Pinus chiapensis*, extraídas con taladro Pressler a 130 cm de altura sobre el nivel del suelo. En las parcelas donde esta especie no estuvo presente no fue posible estimar la edad del bosque, pero la ausencia de *P. chiapensis* y la presencia de especies de Lauraceae y Podocarpaceae, típicas de bosques primarios, sugirió una edad superior a 100 años.

En el campo de cultivo, las especies representativas fueron *Zea mays* L., especies de los géneros *Pteridium* y *Smilax*; en el acahual, *Pinus chiapensis*, *Quercus sapotifolia*; en el bosque de 45 años, *Phyllonoma laticuspis*, *Bejaria mexicana*; en el bosque de 75 años, *Clethra kenoyeri*, *Phyllonoma laticuspis*; en el bosque maduro, *Ternstroemia hemsleyi*, *Bejaria mexicana*, *Ilex pringlei*.

Muestreo de Suelos

En cada etapa sucesional, se delimitó una parcela de 0.4 ha. En el centro de la parcela se excavó un pozo para observar el perfil. Los perfiles se describieron de acuerdo con Food and Agricultural Organization (FAO-ISRIC, 1990) y los horizontes genéticos se designaron de acuerdo con Soil Survey Staff (1999). Se colectaron muestras alteradas de suelo para los análisis físicos, químicos y mineralógicos, y muestras inalteradas para los análisis micro-morfológicos de cada capa y horizonte identificado en campo.

Análisis de Suelos

Los métodos empleados para determinar las propiedades físicas y químicas de cada horizonte se encuentran en Soil Survey Laboratory (1996) y fueron: textura (método de la pipeta); densidad aparente (método del terrón y parafina); pH en agua (relación 1:2); carbono orgánico total (combustión seca en un autoanalizador de carbono Shimadzu TOC-5050A); bases intercambiables (extraídas con acetato de amonio 1 N pH 7.00 y analizadas por espectrofotometría de absorción atómica); acidez y aluminio intercambiable (extraídas con KCl 1 N y tituladas con NaOH); capacidad de intercambio catiónico (método del acetato de amonio 1 N pH 7.00); capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) (estimada de la suma de las bases intercambiables con la acidez intercambiable); porcentaje de saturación de bases (del cociente de la suma de las bases intercambiables y la CICE); porcentaje de humedad en campo (gravimétrico) y color del suelo en húmedo y en seco (carta de colores Munsell).

El análisis mineralógico consistió en determinar los minerales resistentes e intemperizables de la fracción gruesa. La fracción fina se estudió en todos los horizontes de los suelos estudiados. Las dos

fracciones se obtuvieron a partir del análisis mecánico de las partículas del suelo; los agentes cementantes, como la materia orgánica y los óxidos de hierro, se eliminaron con H₂O₂ a 30% y ditionito citrato bicarbonato. Las arenas medias se secaron, se montaron en un portaobjetos y se cuantificaron 100 granos minerales por conteo de líneas. La fracción arcillosa se identificó por difracción de rayos X, utilizando los tratamientos de rutina (calentamientos y saturaciones), metodologías extraídas del manual de Van Reeuwijk (1995).

Para el análisis micro-morfológico, los bloques de suelo inalterados se secaron a temperatura ambiente, se impregnaron con resina poliéster insaturada diluida con monómero estireno (relación 7:3) y se dejaron curar. Las secciones delgadas se describieron de acuerdo con Bullock *et al.* (1985).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Morfología

Las características morfológicas se resumen en el Cuadro 1. Los grados de descomposición de la materia orgánica estuvieron relacionados con la edad del bosque: mayor diferenciación cuando más maduro y menor alteración cuando más joven. En el bosque de 100 años se presentaron los tres grados de descomposición, (pobre Oi, moderado Oe y fuerte Oa) incluso en éste ocurrió la mayor acumulación de materia orgánica fuertemente descompuesta (Oa de 5 cm); en el bosque de 75 años esta última disminuyó (Oa de 1.5 cm) hasta desaparecer en los bosques de 45 y 15 años. Por otro lado, en los bosques de 45 y 15 años se incrementó la materia orgánica poco descompuesta debido a su reciente incorporación. El suelo agrícola ya no presentó el horizonte O.

El horizonte A también estuvo relacionado con el tipo de vegetación presente y con la edad del bosque. En los suelos con bosque maduro, el material orgánico está humificado fuertemente, y se ha lixiviado y acumulado para formar un horizonte Bh, sin pasar por un horizonte A (Figura 1). Este fenómeno fue descrito por Duchaufour (1984), quien mencionó que, en ambientes extremadamente ácidos, el horizonte orgánico tiene bastante espesor y el horizonte A1 no existe o presenta escaso espesor y ningún agregado húmico-arcilloso. En las demás etapas sucesionales, el horizonte A varió en espesor, siendo el mayor el del

Cuadro 1. Características morfológicas de los suelos estudiados en la región de El Rincón, Sierra Norte, Oaxaca, México.

Horizonte	Profundidad	Color [†]	Estructura	Consistencia en húmedo	Transición
	cm				
Cultivo					
Ap	0 a 15	10YR3/2	Migajosa con bloques subangulares	Friable	Ondulada y abrupta
C	15+	10YR2/2	Bloques subangulares	Friable	-
Bosque de 15 años					
O	9 a 0	10YR4/3	-	-	-
A	0 a 20	10YR3/2	Migajosa	Friable	Horizontal y difusa
C	20 a 52	10YR2/1	Bloques subangulares	Friable	Ondulada y abrupta
ABb	52+	10YR3/4	Bloques subangulares	Friable	-
Bosque de 45 años					
O	20 a 0	10YR4/4	-	-	-
A	0 a 29	10YR3/2	Bloques subangulares	Friable	Ondulada y abrupta
BC	29 a 50+	10YR3/6	Bloques subangulares	Friable	-
Bosque de 75 años					
O	10 a 0	10YR2/1	-	-	-
A1	0 a 8	10YR2/2	Granular	Friable	Horizontal y difusa
A2	8 a 23	10YR4/3	Bloques subangulares	Friable	Ondulada y abrupta
Bsw	23 a 44	10YR6/8	Bloques subangulares	Firme	Ondulada y difusa
Bsw2	44 a 68	10YR5/8	Bloques subangulares	Firme	Horizontal y difusa
Bsw3	68 a 96	10YR6/8	Bloques subangulares	Firme	Horizontal y difusa
Bsw4	96 a 121+	10YR5/6	Bloques subangulares	Firme	-
Bosque maduro					
O	15 a 0	10YR2/2	-	-	-
Bh	0 a 15	10YR4/2	Bloques subangulares	Friable	Ondulada y abrupta
Bs	15 a 49	10YR7/6	Bloques subangulares	Firme	Ondulada y difusa
CB	49 a 85+	10YR5/8	Bloques subangulares	Firme	-

[†] color en húmedo. - = no se determinó.

bosque de 45 años. En el suelo cultivado, el horizonte A tuvo más de 15 cm debido a su reciente cambio de uso del suelo, el cual conserva todavía propiedades del bosque nativo.

Por medio de la micromorfología, se observó que el bosque más viejo tuvo más actividad de hongos y los bosques más jóvenes, más actividad de fauna edáfica. La fauna del suelo ha modificado la estructura del horizonte A de bloques subangulares a migajosa. Esta última ocupó hasta 50% del volumen en el suelo del acahual (Figura 2), aunque su frecuencia disminuyó drásticamente conforme aumentó la edad del bosque. Se ha reportado que cuando el ambiente se hace más ácido, como ocurre en este caso, sólo sobreviven los hongos (Alexander, 1994). Estos microorganismos pueden tener una función de agregación de partículas (Tisdall y Oades, 1982), sin embargo, en el bosque maduro estudiado, los hongos desempeñan más una función de degradación de la materia orgánica que de formación de agregados esferoidales (Figura 3).

La transición entre capas es otra propiedad morfológica que proporciona información de los

cambios que han sufrido estos suelos. El suelo agrícola y el suelo del acahual presentaron transiciones onduladas y abruptas como resultado de depositaciones de materiales coluviales. Las fuertes pendientes han provocado movimiento de materiales y enterramiento de suelos (hasta 60%), sin embargo, cuando ya se establece el bosque, el sistema vuelve a recuperar su estabilidad (bosque de 45 años). En los bosques con un desarrollo más avanzado (75 y 100 años), la transición ondulada y abrupta es originada por la acumulación de materia orgánica descompuesta que se entremezcla con el material inorgánico.

También se encontró que la consistencia del suelo varía con la edad del bosque. El material fue más firme en las etapas sucesionales maduras (75 y 100 años), mientras que fue muy friable en las etapas más jóvenes. La firmeza del material posiblemente esté relacionada con una acumulación de arcillas y óxidos, mientras que la friabilidad con la mica esquistosa y con el alto contenido de humedad.

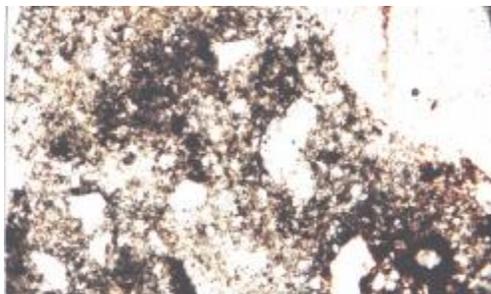


Figura 1. Humus iluvial en el horizonte Bh de un bosque mesófilo de 100 años en la región de El Rincón, Sierra Norte, Oaxaca, México. LPP. Longitud del marco 2.9 mm.

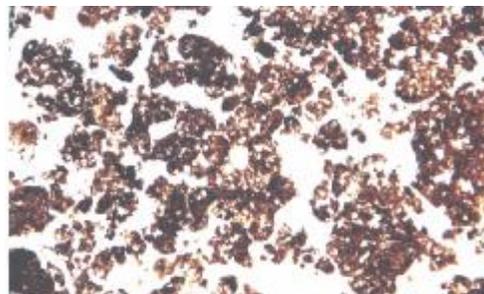


Figura 2. Agregados migajosos en el horizonte A de un acahual en la región de El Rincón, Sierra Norte, Oaxaca, México. LPP. Longitud del marco 2.9 mm.

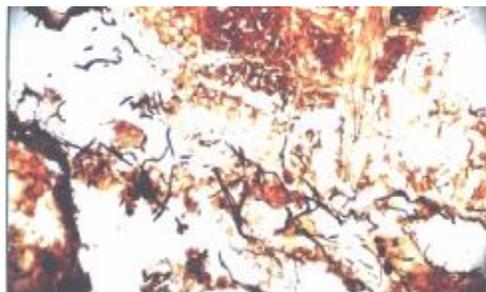


Figura 3. Hifas de hongos en el horizonte O de un bosque mesófilo de ca. 100 años en la región de El Rincón, Sierra Norte, Oaxaca, México. LPP. Longitud del marco 1 mm.



Figura 4. Caolinita en el horizonte Bsw3 del suelo de un bosque de ca. 75 años en la región de El Rincón, Sierra Norte, Oaxaca, México. LPC. Longitud del marco 450 mm.

Propiedades Físicas

En general, los suelos presentaron texturas franco arcillosas en materiales muy intemperizados, franco limosas en materiales moderadamente alterados y franco arenosas en materiales poco alterados donde domina la mica esquisto (Cuadro 2). La textura es una de las propiedades del suelo que no cambia por el manejo del mismo (Brady y Weil, 1999); sin embargo, en un proceso de deforestación, como en este caso, los horizontes se pueden perder por erosión y, en algunos casos, los horizontes B ricos en materiales arcillosos pueden aflorar o aún más la regolita o la roca.

Todos los suelos presentaron un material de moderado a fuertemente descompuesto de acuerdo con su composición mineralógica (Cuadro 4). Esto significa que aunque se dio un proceso de rejuvenecimiento, debido a la erosión, el material expuesto presentó un estado avanzado de alteración.

El suelo que probablemente perdió menos material durante el cambio de vegetación fue el del bosque maduro, como lo reveló el incremento de arcilla con la profundidad. La intensa lixiviación del área y el

tiempo han provocado que la arcilla y la materia orgánica se muevan y se estén formando horizontes como un E incipiente (granos de cuarzo) y un B cámbico.

En los suelos de los bosques de 45 y 75 años afloraron los horizontes B y de ahí comenzó su formación; estos suelos presentaron un alto contenido de arcilla en la superficie y revestimientos arcillosos característicos de los suelos truncados. El suelo del acahual (15 años) está formado por 50 cm de materiales coluviales que sepultaron a un suelo arcilloso; el ordenamiento de las partículas es pobre y las discontinuidades litológicas son evidentes por el cambio brusco de textura. Finalmente, el suelo cultivado, por sus pendientes pronunciadas (64%), está perdiendo material, de ahí que sea un suelo somero. Sin embargo, presentó un alto contenido de materia orgánica debido a su reciente incorporación a la agricultura.

La retención de humedad es otra propiedad del suelo que estuvo relacionada con la edad del bosque. Los horizontes orgánicos de los bosques maduros retuvieron mayor contenido de humedad que los

Cuadro 2. Propiedades físicas de los suelos estudiados en la región de El Rincón, Sierra Norte, Oaxaca, México.

Horizonte	Profundidad cm	Arcilla %	Arena %	Limo %	Humedad
Cultivo					
Ap	0 a 15	39.93	13.48	46.59	28.70
C	15+	44.37	11.26	44.37	31.11
Bosque de 15 años					
O	9 a 0	30.65	23.37	45.98	48.57
A	0 a 20	37.16	14.75	48.09	24.80
C	20 a 52	40.82	18.37	40.82	22.40
ABb	52+	33.87	20.96	45.17	28.46
Bosque de 45 años					
O	20 a 0	39.73	23.03	37.24	51.85
A	0 a 29	47.45	14.59	37.96	66.62
BC	29 a 50+	40.33	21.71	37.96	39.80
Bosque de 75 años					
O	10 a 0	-	-	-	161.27
A1	0 a 8	35.91	7.97	56.12	105.82
A2	8 a 23	30.65	23.37	45.98	48.57
Bsw	23 a 44	24.01	17.67	58.32	37.49
Bsw2	44 a 68	25.35	12.68	61.97	31.94
Bsw3	68 a 96	20.24	8.82	76.48	31.26
Bsw4	96 a 121+	8.07	3.10	88.82	30.61
Bosque maduro					
O	15 a 0	-	-	-	204
Bh	0 a 15	13.19	34.07	52.75	33.30
Bs	15 a 49	43.96	12.09	43.96	24.67
CB	49 a 85+	47.44	5.12	47.44	34.61

- = no se determinó.

bosques más jóvenes (Cuadro 2). Esta diferencia está relacionada con el grado de alteración del material orgánico previamente mencionado.

Propiedades Químicas

La reacción del suelo fue ácida en todos los sitios estudiados, con una ligera disminución al aumentar la profundidad y en las primeras etapas sucesionales (Cuadro 3). La concentración de cationes básicos intercambiables, en general, es muy baja por el ambiente que predomina en el área. En cambio, el aluminio intercambiable fue elevado en todos los suelos, pero tiende a incrementarse en las últimas etapas sucesionales. El carbono orgánico y la materia orgánica se encontraron en altas cantidades, de acuerdo con los criterios de Vázquez y Bautista (1993). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) alta está relacionada principalmente con el alto contenido de materia orgánica en los horizontes superficiales y en los horizontes subsuperficiales con la mezcla de minerales arcillosos silicatados, como la illita, la caolinita y la clorita (Cuadro 4). Cuando se

calculó la CIC sólo de la fracción arcillosa de acuerdo con Porta *et al.* (1999), para saber si la caolinita era un mineral dominante, se encontró que la CIC se incrementó de 17.40 a 40.85 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, por la presencia de otros minerales con mayor número de cargas.

Los resultados de este trabajo coinciden con los de Bruijnzeel y Proctor (1995), quienes señalaron que los suelos de bosques mesófilos de Colombia, Costa Rica y Malasia son ácidos, con pH de 3.0 a 7.0, pero con un alto contenido de carbono orgánico (1.40 a 47.4%) y con los de Meave *et al.* (1992) en los bosques mesófilos de Guerrero, México.

La fertilidad potencial de los suelos estudiados es baja, debido principalmente a la escasa presencia de cationes básicos intercambiables, así como probables problemas de toxicidad por el elevado contenido de aluminio intercambiable. Brady y Weil (1999) reportaron que las coníferas tienden a acidificar el ambiente al extraer los cationes del suelo, pero no incorporarlos nuevamente al mismo, de tal manera que los cationes van disminuyendo conforme el bosque se hace más viejo, además, la abundante lluvia y pendiente pronunciada generan condiciones de fuerte lixiviación.

Mineralogía

Los suelos están compuestos mineralógicamente por cuarzo, feldspatos sódicos y moscovita, en la fracción arenosa, y caolinita (Figura 4), esmectita, gibbsita, clorita, illita y óxidos de Fe, en la fracción fina (Cuadro 4), que indican que se presenta un ambiente de moderado a fuertemente hidrolizante (Pape y Legger, 1994). Sin embargo, la frecuencia de algunos de ellos varió con la edad del bosque.

La clorita es un mineral heredado de rocas metamórficas e inestable en ambientes ácidos (Olson *et al.*, 2000). Este comportamiento se refleja en los suelos estudiados: en el bosque maduro donde la acidez del suelo fue mayor, la presencia de este mineral fue escasa y sólo se conservó en los horizontes más profundos de los bosques de 75 y 100 años. Este mismo comportamiento lo tuvo la moscovita; es decir, en materiales recientemente expuestos se conservó y dominó en la fracción arcillosa, sin embargo, disminuyó conforme el bosque se hace más viejo. Hatton *et al.* (1987) reportaron que tres especies de coníferas causaron cambios físicos y químicos en una mica de suelos forestales; de acuerdo con Tan (1978), estos cambios se deben a la presencia

Cuadro 3. Propiedades químicas de los suelos estudiados en la región de El Rincón, Sierra Norte, Oaxaca, México.

Horizonte	Profundidad cm	pH H ₂ O 1:2	Al [†]	Al ³⁺	CICE [‡]	CIC [§]	CIC	CO [¶]	MO [#]	PSB ^{††}
			cmol _c kg ⁻¹ de suelo			cmol _c kg ⁻¹ de arcilla		%		
Cultivo										
Ap	0-15	3.95	7.2	2.64	8.20	34.40		9.38	16.17	2.91
C	15+	4.56	3.8	0.96	4.54	23.49		6.30	10.96	3.01
Bosque de 15 años										
O	9-0	4.18	7.87	4.75	11.60	46.87		20.19	34.80	31.98
A	0-20	4.85	4.32	2.64	4.65	53.21		11.27	19.42	6.88
C	20-52	4.72	3.21	1.68	3.43	23.23		0.15	0.26	5.53
ABb	52+	4.98	2.21	1.00	2.72	22.13		3.90	6.78	2.78
Bosque de 45 años										
O	20-0	3.95	3.31	1.39	11.46	76.45	19.94	11.56	19.92	10.65
A	0-29	4.34	5.92	4.87	6.33	32.84	24.71	7.51	12.96	1.25
BC	29-50+	5.11	1.39	1.00	1.76	12.07	26.95	3.87	6.67	3.06
Bosque de 75 años										
O	10-0	3.46	5.23	3.02	12.16	73.23	ND	36.42	62.78	57.03
A1	0-8	3.15	14.44	10.99	16.42	49.79	86.60	5.43	9.36	12.09
A2	8-23	3.92	9.55	6.72	10.16	24.94	20.39	5.43	9.36	24.95
Bsw	23-44	4.51	4.94	3.16	5.33	17.40	40.85	2.20	3.80	17.42
Bsw2	44-68	4.87	2.97	2.30	3.21	14.08	41.97	0.60	1.04	14.12
Bsw3	68-96	4.90	3.15	2.26	3.37	14.61	ND	0.15	0.26	6.58
Bsw4	96-121+	4.83	3.10	2.64	3.56	13.07	ND	0.15	0.26	4.71
Bosque maduro										
O	15-0	3.55	5.56	1.48	9.80	84.50	ND	43.52	75.02	43.19
Bh	0-15	3.73	5.52	3.12	5.87	13.78	23.42	4.90	8.45	14.12
Bs	15-49	4.12	8.73	6.24	8.83	20.22	39.74	0.79	1.37	17.55
CB	49-85+	4.59	2.92	2.11	3.14	17.80	ND	1.43	2.48	17.00

† Acidez intercambiable; ‡ Capacidad de intercambio catiónico efectiva; § Capacidad de intercambio catiónico; ¶ Carbono orgánico; # Materia orgánica; †† Porcentaje de saturación de bases; ND = no disponible.

de ácidos fúlvicos y húmicos, cuyo poder de quelatación remueve al Fe, Al, Mg, K y Si de la solución aumentando la disolución del mineral. En el horizonte Bh del bosque maduro, donde el material está muy humificado, ni siquiera se presentó este mineral.

La pérdida de K de la moscovita genera la formación de illita (Brady y Weil, 1999), que es una mica pobremente cristalizada y con alto contenido de agua (Olson *et al.*, 2000). Esta mica mostró un comportamiento irregular con la edad del bosque, con mayor tendencia a producirse en los horizontes expuestos a mayor intemperismo (como los de la superficie).

La pérdida de potasio de las micas también genera la formación de arcillas esmectíticas, arcillas inestables en un ambiente de lixiviación intensa y fuerte acidez (Fanning *et al.*, 1989), por lo que sólo se encontraron en el suelo del bosque de 75 años, el cual

perdió suficiente material para permitir que afloraran capas menos alteradas.

La pérdida de cationes, la extracción de sílice o desilificación de los minerales primarios y secundarios, favorecida por la acidez del suelo, parece ser uno de los principales factores en determinar la mineralogía de los suelos estudiados. En particular, la caolinita es el resultado de la desilificación de los minerales primarios, la abundancia de este mineral puede ser atribuida al bajo pH del suelo (Cuadro 3). Un fuerte proceso de desilificación origina la gibbsita, otro mineral encontrado en los suelos estudiados (Curi y Franzmeier, 1984). Se esperaría que este mineral fuera más abundante en suelos más ácidos, como los del bosque maduro (Kampf *et al.*, 2000). Sin embargo, en el presente estudio se encontró que la gibbsita fue menos frecuente precisamente en estas parcelas. El alto contenido de materia orgánica en estas parcelas puede ayudar a explicar este resultado, ya que la cristalización de este mineral es inhibida por la materia orgánica (Singer y Huang, 1990).

Cuadro 4. Análisis mineralógico de la fracción arcillosa de los suelos estudiados en la región de El Rincón, Sierra Norte, Oaxaca, México.

Horizonte	Profundidad	Es [†]	Ka	Mu	Gb	Bo	Cl	Ill	He	Go
cm										
Cultivo										
Ap	0 a 15	-	XX [‡]	XXX	XX	-	-	X	-	X
C	15+	-	XX	XXX	XX	-	X	XX	X	X
Bosque de 15 años										
O	9 a 0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	0 a 20	-	XX	XX	XX	-	X	XX	X	X
C	20 a 52	-	XX	XX	XX	-	X	XX	X	X
ABb	52+	-	X	X	X	-	X	XX	X	X
Bosque de 45 años										
O	20 a 0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	0 a 29	-	X	X	XX	-	-	X	X	X
BC	29 a 50+	-	X	XX	XX	-	X	XX	X	X
Bosque de 75 años										
O	10 a 0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A1	0 a 8	XX	XX	X	X	X	-	XX	X	X
A2	8 a 23	XX	XXX	X	X	X	-	XX	-	-
Bsw	23 a 44	XX	XXX	X	X	-	-	XX	X	X
Bsw2	44 a 68	X	X	-	X	-	-	X	*	*
Bsw3	68 a 96 ¹	X	XXX	X	X	-	+	X	*	*
	²	-	XXX	X	X	-	+	X	-	-
	³	-	XX	X	X	-	+	X	-	-
Bsw4	96 a 121+	-	XX	X	X	-	+	X	-	-
Bosque maduro										
O	15 a 0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bh	0 a 15	-	X	-	X	-	-	XX	X	-
Bs	15 a 49	-	XX	X	X	-	-	XX	X	XX
CB	49 a 85+	-	XX	X	X	-	+	X	X	XX

[†] Es = esmectita; Ka = caolinita; Mu = moscovita; Gb = gibbsita; Bo = bohemita; Cl = clorita; Ill = illita; He = hematita; Go = goethita. [‡] X = escaso, XX = moderado, XXX = abundante, + = reflexión débil. 1 manchas blancas; 2 manchas rojas; 3 manchas rosas.

* La hematita y la goethita aunque presentes se destruyeron cuando se removieron los óxidos de Fe con el oxalato y el ditionito citrato bicarbonato. Sin embargo, algunas se conservaron y dieron una reflexión baja.

Clasificación de los Suelos del Bosque Mesófilo

Todos los suelos con bosque se clasificaron como Inceptisoles, húmedos y sin bases (*Dystrudepts*) (Cuadro 5); suelos que están directamente relacionados con un horizonte B de alteración principalmente química (horizonte cámbico) por incremento de arcilla y de color. A escala de subgrupo, se encontraron las diferencias en estos suelos: los de etapas serales juveniles (bosques de 15 y 45 años) se clasificaron como *Humic Dystrudepts*. En cambio, los suelos de bosques más viejos (75 años o más) como *Typic Dystrudepts*.

Se han reportado Inceptisoles en las mismas condiciones ecológicas de este estudio, es decir, bosques templados, con precipitaciones altas y pendientes pronunciadas donde la erosión es igual o mayor que la tasa de formación del suelo (Hudnall *et al.*, 2000).

Los *Typic Dystrudepts* se han reportado en materiales parentales ácidos y de micas esquistos, donde los clastos pre-intemperizados son muy resistentes a una futura descomposición, lo que limita el desarrollo del perfil. En este caso, los suelos presentaron diferentes grados de alteración y su truncamiento fue originado primero por el hombre, después algunos horizontes superficiales se perdieron por erosión y otros se formaron por la acumulación de materiales coluviales.

Todos los suelos forestales estudiados han acumulado restos vegetales en su superficie por lo que presentaron un horizonte O, pero sólo el suelo con bosque maduro es el que alcanzó a reunir los requerimientos de un horizonte folístico. Los demás no tuvieron el espesor o el porcentaje de carbono orgánico requerido. El horizonte folístico es común en zonas con clima frío y húmedo (Soil Survey Staff, 1999), pero no en condiciones húmedas calientes cuando la mineralización es más intensa.

Cuadro 5. Clasificación de los suelos estudiados en la región de El Rincón, Sierra Norte, Oaxaca, México.

Edad del bosque	Clasificación de suelos (Soil Survey Staff, 1999)	Horizontes de diagnóstico
años		
0	<i>Typic Udorthents</i> esquelética fina mezclada térmica	Úmbrico de 10 cm porque está sobre un contacto paralítico
15	<i>Humic Dystrudepts</i> migajón arcillo arenoso mezclada térmica	Úmbrico, cámbico
45	<i>Humic Dystrudepts</i> migajón arcilloso mezclada térmica	Úmbrico, cámbico
75	<i>Typic Dystrudepts</i> migajón limoso mezclada térmica	Cámbico y proceso incipiente de eluviación
100	<i>Typic Dystrudepts</i> migajón limoso mezclada térmica	Folístico, sómbrico y cámbico. Cambio textural abrupto

Los suelos que sustentan bosques más recientes (15 y 45 años) presentaron un epipedón úmbrico.

En la literatura se reporta que el bosque de pino tiende a acidificar el suelo (Brady y Weil, 1999); además, el clima y la intensa precipitación generan condiciones de fuerte lixiviación y, como consecuencia, los cationes básicos se pierden. Este proceso ocurrió en el bosque de 45 años, pero no en el de 15 años, donde la materia orgánica ácida fue heredada del material coluvial. El suelo con bosque de 75 años presentó una serie de procesos pedogenéticos interrumpidos; por ejemplo, tuvo una acumulación de materiales orgánicos en la superficie, pero no lo suficiente para formar un epipedón folístico; tuvo todas las características de un epipedón úmbrico, pero no alcanzó la profundidad requerida; presentó procesos de eluviación y formación de revestimientos arcillosos, pero no se reflejaron en el incremento de arcilla con la profundidad; tuvo procesos de eluviación evidentes por el alto contenido de cuarzo y zonas de empobrecimiento. También, se apreciaron granos de limo sobre los agregados, pero éstos no formaron interdigitaciones álbicas y no reunió el requisito de color para un horizonte álbico; y finalmente, no formó un horizonte kándico debido a la alta CIC que presentó, a pesar de tener caolinita. Por todas sus características físicas, químicas y mineralógicas, este suelo pudo haberse formado a partir del truncamiento de un Ultisol.

En el bosque maduro, la vegetación ha permanecido estable y perdió menos material por el

cambio de uso del suelo, por lo que en menos de 100 años se acumuló suficiente materia orgánica como para formar un epipedón folístico. Las condiciones ambientales y el alto grado de descomposición provocaron que la materia orgánica humificada emigrara y rellenara los espacios porosos para formar un horizonte sómbrico. Este suelo no pasó por un epipedón A, sin embargo, presentó un límite difuso entre los horizontes O y Bh y un cambio textural abrupto entre los horizontes Bh y Bw, lo que indica una intensa lixiviación.

La Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1999) incluyó al horizonte sómbrico como parte de los Inceptisoles, sin embargo, no lo contempla a niveles inferiores. Porta *et al.* (1999) han reportado que este horizonte no se ha incorporado a las nuevas versiones de este sistema de clasificación porque falta estudiarlo mucho todavía, sobre todo en los suelos de regiones subtropicales. Se propone el subgrupo *Sombric* para Inceptisols tropicales.

El suelo cultivado se clasificó como un *Typic Udorthents*. Un Entisol somero con 15 cm de espesor, pero con un epipedón úmbrico. Este suelo fue difícil de clasificar de acuerdo con los criterios establecidos en la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1999), pues si se considera al horizonte CA como tal, se clasifica como Inceptisol, debido a que tiene un valor *n* menor que 0.7, pero si se considera como un contacto paralítico por el alto porcentaje de fragmentos de mica esquisto, se clasifica como Entisol. Este suelo presentó micas esquisto muy alteradas con arcillas resistentes al intemperismo, tuvo un alto porcentaje de materia orgánica, densidad aparente baja y drenaje eficiente para considerarlo como suelo, sin embargo, la estructura de roca todavía se conserva en 80%.

A nivel de familia, se observó una tendencia a modificarse la textura de la sección control con el tiempo y con el tipo de exposición del material parental. Por ejemplo, en el suelo cultivado, la textura fue esquelética arcillosa, avanzó a migajón arcillo arenosa en el suelo del acahual, migajón arcillosa en el suelo del bosque de 45 años y terminó con migajón limoso en los suelos de los bosques más viejos (≥ 75 años).

De los cinco factores que intervienen en la formación del suelo: material parental, clima, relieve, tiempo y biota (Jenny, 1941), los que probablemente contribuyan en mayor grado a explicar los cambios observados son la biota y el tiempo. La vegetación incorpora la materia orgánica y el tiempo influye en la

diferenciación de horizontes orgánicos de acuerdo con el grado de descomposición.

Amiotti *et al.* (2000) encontraron que el reemplazo de vegetación graminoide por un solo individuo de *P. radiata* incrementó el grado de heterogeneidad pedológica, de tal manera que los epipedones mólicos cambiaron a epipedones úmbricos debido al incremento en la acidez del suelo. En el presente estudio, se encontró que la mayor heterogeneidad pedológica se da conforme el bosque madura; es decir, durante el proceso sucesional del bosque mesófilo se formó un horizonte O en las primeras etapas sucesionales (15 años) hasta llegar a horizontes más evolucionados, como el folístico y el sómbrico en bosques de 100 años. No obstante, esta heterogeneidad no se refleja en las categorías más altas de la taxonomía de suelos, a menos que la deforestación total del bosque y la erosión inicien el proceso pedogenético de nuevo, formando Entisols.

El rejuvenecimiento de estos suelos, a pesar del poco tiempo transcurrido desde la última perturbación, ≥ 100 años, ha sido muy rápido. La formación de horizontes B con alteraciones en color y estructura requiere de siglos (Brady y Weil, 1999), aproximadamente > 1000 años según Porta *et al.* (1999). Sin embargo, en el presente estudio, el desarrollo del horizonte B (cámbico) dependió más del material parental con avanzados procesos de alteración que del tipo de vegetación y de los horizontes humíferos (Duchaufour, 1984), de ahí que en menos de 100 años este horizonte esté presente.

El elevado espesor del horizonte orgánico en el suelo de los bosques estudiados indica una considerable acumulación de materia orgánica, lo que sugiere que estos bosques son importantes reservorios de carbono, no sólo por su elevada biomasa vegetal, sino también por sus suelos.

CONCLUSIONES

- La vegetación y el tiempo juegan un papel importante en la diferenciación de horizontes y propiedades de los suelos, en particular en la rápida formación de horizontes B y el desarrollo de horizontes O. La heterogeneidad pedológica incrementó con la edad del bosque. En las primeras etapas sucesionales se formaron horizontes O hasta llegar a horizontes más evolucionados, como el folístico y el sómbrico en las últimas etapas de la sucesión.

- Al aumentar la edad del bosque, los suelos se volvieron más ácidos, con dominancia de Al intercambiable, se incrementó el contenido de materia orgánica, se presentaron los tres grados de descomposición del material orgánico (Oi, Oe, Oa), se incrementó la retención de humedad, dominaron los hongos, se alteraron los minerales primarios como la clorita y la moscovita y se inhibió la formación de gibbsita por el alto contenido de materia orgánica.

- A pesar de los cambios en los horizontes y propiedades, los suelos con bosque se clasificaron dentro del mismo orden: Inceptisoles. Las diferencias en los suelos estudiados se encontraron a nivel de subgrupo, de manera que los suelos de bosques secundarios jóvenes fueron *Humic Dystrudepts*. En cambio, los suelos de bosques secundarios maduros resultaron *Typic Dystrudepts*. Los horizontes de diagnóstico como el folístico y el sómbrico encontrados en los suelos estudiados sugieren que hay que profundizar en la génesis de los Inceptisols, con el propósito de incluirlos en las nuevas versiones de la Taxonomía.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos A. Ortiz Solorio por los valiosos comentarios hechos al manuscrito. Al Q.B. Javier P. González Cruz, por su valioso apoyo en el trabajo editorial y de campo. A Raúl Rivera García, por su invaluable ayuda en el trabajo de campo. Dos revisores anónimos ofrecieron valiosas sugerencias para el enriquecimiento del trabajo. La primera autora gozó de una beca otorgada por el CONACYT durante la realización de sus estudios de Postgrado. Esta investigación fue financiada por The Darwin Initiative for the Survival of Species (United Kingdom), por el CONACYT, por el Sistema de Investigación Benito Juárez y por el Instituto Politécnico Nacional.

LITERATURA CITADA

- Alexander, M. 1994. Introducción a la microbiología del suelo. AGT Editor. México. D.F.
- Amiotti, N.M., P. Zalba, L.F. Sánchez y N. Peinemann. 2000. The impact of single trees on properties of loess-derived grassland soils in Argentina. *Ecology* 81(12): 3283-3290.
- Brady, C.N. y R.R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- Bruijnzeel, A.L. y J. Proctor. 1995. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forest: What do we really know? pp. 38-78. *In*: Hamilton, L.S., J.O. Juvik y F.N. Scatena (eds.). Tropical montane cloud forests. Ecological Studies 110. Springer-Verlag. New York.

- Bullock, P., N. Federoff, A. Jongerijs, G. Stoops y T. Tursina. 1985. Handbook for soil thin section description. Waine Research Publications. Wolverhampton, UK.
- Buol, S.W. 1994. Environmental consequences: Soils. pp. 211-229. *In:* Meyer, W.B. y B.L. Turner (eds.). Changes in land use and land cover: A global perspective. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- CONABIO (Comisión Nacional de Biodiversidad). 2002. <http://www.conabioweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl> (Consultado 28 mayo 2002).
- CRM (Consejo de Recursos Minerales). 1996. Monografía Geológico Minera del Estado de Oaxaca. F. Castillo N., J. Castro M. (eds.). Secretaría de Comercio y Finanzas. México. p. 161.
- Curi, N. y D.P. Franzmeier. 1984. Toposequence of Oxisols from the central Plateau of Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 341-346.
- Daubenmire, R.F. 1974. Plants and environment. 3rd edition. John Wiley. New York.
- Duchaufour, P. 1984. Edafogénesis y clasificación. Trad. al español por Ma. T. Carvallas-Fernández y M. Carballas Fernández. Masson, S.A. Barcelona, España.
- Fanning, D.S., V.Z. Keramidas y M.A. El-Desoky. 1989. Micas. pp. 551-634. *In:* Dixon, J.B. y S.B. Weed (eds.). Minerals and soil environments. 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- FAO-ISRIC (Food and Agriculture Organization of the United Nations-International Soil Reference and Information Centre). 1990. Guidelines for soil profile description. 3rd ed. Rome, Italy.
- Hatton, A., J. Ranger, M. Roberth, C. Nys y P. Bonnaud. 1987. Weathering of a mica introduced into four acidic forest soils. *J. Soil Sci.* 38: 179-190.
- Hudnall, W.H., L.M. West, E.C. Benham y L.P. Wilding. 2000. Inceptisols. pp. E-242-255. *In:* Sumner, M.E. (ed.). Handbook of Soil Science. CRC Press. Boca Raton, FL.
- INEGI (Instituto Nacional de Geografía e Informática). 1999. Anuario Estadístico del Estado de Oaxaca. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. McGraw-Hill. New York.
- Kampf, N., A.C. Scheinost y D.G. Schulze. 2000. Oxide minerals. pp. F125-168. *In:* Sumner, M.E. (ed.). Handbook of soil science. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Meave, J., M.A. Soto, L.M. Calvo, H. Paz y S. Valencia. 1992. Análisis sinecológico del bosque mesófilo de montaña de Omiltemi, Guerrero. *Bol. Soc. Bot. México* 52: 31-77.
- Olson, C.G., M.L. Thompson y M.A. Wilson. 2000. Phyllosilicates. pp. F-77-123. *In:* Sumner, M.E. (ed.). Handbook of soil science. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Ortega-Escalona, F. y G. Castillo-Campos. 1996. El bosque mesófilo de montaña y su importancia forestal. *Ciencias (UNAM)* 43: 32-39.
- Pape, Th. y D. Legger. 1994. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science Geology. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Pickett, S.T.A. 1989. Space for time substitution as an alternative to long term studies. pp. 110-135.3. *In:* Likens, G.E. (ed.). Long term studies in ecology: Approaches and alternatives. Springer Verlag. New York.
- Porta-Casanellas, J., M. López-Acevedo y C. Roquero-de Laburu. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2da. edición. Mundi-Prensa. Bilbao, España.
- Rzedowski, J. 1991. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana* 14: 3-22.
- Singer, A. y P.M. Huang. 1990. Effects of humic acids on the crystallization of aluminum hydroxides. *Clays Clay Miner.* 38: 47-52
- Soil Survey Laboratory. 1996. Methods Manual. Soil Survey Investigations Report 42, Ver. 3.0. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. 2nd edition. US Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.
- Tan, K.H. 1978. Effects of fulvic and humic acids on release of fixed potassium. *Geoderma* 21: 67-74.
- Tisdall, J.M. y J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Urrego, B. 1997. La reforestación con coníferas y sus efectos sobre la acidificación, podsolización y pérdida de fertilidad de los suelos. *Informaciones Agronómicas* 28: 6-12. Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS). Quito, Ecuador.
- Van Reeuwijk, L.P. 1995. Procedures for soil analysis. Technical Paper 9. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Van Wambeke, A.R. 1987. Soil moisture and temperature regimes of Central America Caribbean, Mexico. Technical Monograph 16. Soil Conservation Service, US Department of Agriculture. New York.
- Vázquez-Alarcón, A. y N. Bautista-Aroche. 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y planta. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Williams, L.G. 1992. Ecología del paisaje y el bosque mesófilo en el centro de Veracruz. *Ciencia y Desarrollo* 105: 133-138.

ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA PARA AGUACATE EN LA ZONA CENTRAL DE VENEZUELA

Agroecological Zones for Avocado in the Central Part of Venezuela

Adriana Lelys Cortéz-Marin^{1‡}, Lorenzo A. Aceves-Navarro², Ramón Arteaga-Ramírez³ y Mario A. Vázquez-Peña³

RESUMEN

En el presente estudio, se desarrolló una metodología de evaluación de aptitud de la tierra para el aguacate, basado en el régimen térmico e hídrico, en los requerimientos agroecológicos del aguacate y en algunas propiedades del suelo, como salinidad, pH y textura. El régimen térmico se calculó con datos por décadas y mensuales de temperatura máxima y mínima del aire, precipitación y evaporación, y el régimen hídrico mediante balances por décadas para cada año y en cada una de las estaciones climatológicas localizadas en el área de estudio. Con esta información se generaron las deficiencias y los excesos de agua en el suelo. Del estudio se determinó que el suelo no fue el factor limitativo para la adaptabilidad agroecológica del cultivo del aguacate, aunque en algunas áreas con suelos ligeramente ácidos es posible mejorar la adaptabilidad del cultivo mediante prácticas agrícolas como encalado. Del análisis agroclimático se detectó que temperaturas mayores que 35 °C y menores que 6 °C son factores limitativos para el desarrollo del cultivo: en el área de estudio el factor que más limita el desarrollo del cultivo es la temperatura máxima superior a 35 °C, ya que causa serios daños a la fecundación y al cuajado del fruto. También fue posible la determinación de la eficiencia térmica, cuyos valores oscilaron entre 95 y 45%, sólo las estaciones Los Aguacates y Manuare no llenaron los requerimientos térmicos para el desarrollo normal del cultivo. Finalmente, en la región resultaron cuatro clases de aptitudes para el aguacate, siendo la

zona apta la de mayor superficie con 49% del área total de estudio (11 834 km²) y sólo 9% resultaron no apta (1010.91 km²)

Palabras clave: *Persea americana Mill., regionalización, elementos climáticos.*

SUMMARY

In this study we developed a methodology to evaluate the aptitude of the land for avocado cultivation based on the thermal and hydric regimes, agroecological requirements of avocado, and some soil properties, such as salinity, pH, and soil texture. The thermal regime was estimated from 10-day and monthly data of maximum and minimum air temperature, rain, and evapotranspiration, and the hydric regime from 10-day balances each year and in the meteorological stations of the area under study. From this analysis we were able to obtain deficits and excesses of soil water. We found that the soil was not a limiting factor for avocado, although there were some areas with low pH values where crop development could be improved with management practices, such as liming. Furthermore, we found that air temperatures higher than 35 °C and lower than 6 °C can limit crop development: in this area temperatures higher than 35 °C are the main factor affecting the crop, due to its effect on crop fecundation and fruit set. It was also possible to determine thermal efficiency whose values oscillate between 95 and 45%. Only the stations Los Aguacates and Manuare did not meet the thermal requirements for the normal development of avocado. Finally, in this region there were four classes of aptitudes for avocado, the optimum area being the largest with 49% of the total area of study (11 834 km²) and only 9% (1010.91 km²) was not apt.

Index words: *Persea americana Mill., regional analysis, climatic elements.*

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Apartado postal 4846, Maracay, Venezuela.

[‡] Autor responsable (acortez@inia.gov.ve)

² Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

³ Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

INTRODUCCIÓN

Una zonificación agrícola de una región debe ser constantemente actualizada, procurando obtener mayor información sobre las condiciones climáticas de los cultivos seleccionados y sobre todo proporcionar una planificación a mediano y a largo plazo a los productores (Sediyama-Chohaku *et al.*, 2001). La zonificación agrícola permite, a partir del conocimiento de las variables climáticas (como precipitación y evapotranspiración de referencia) y de su espacialización regional por medio de los sistemas de información geográficos (SIG), definir regiones de aptitud climática y épocas más adecuadas de siembras como forma de disminuir los efectos causados por la distribución de las lluvias (Da Silva y Azevedo, 2000). Sánchez-Carrillo (1999) expuso que la zonificación es una herramienta útil para la programación de nuevas tierras que van a estar bajo cultivo y también para mejorar el uso de las tierras ya cultivadas, y que la evaluación de los recursos agroclimáticos es un requerimiento fundamental, previo a las proyecciones de las tierras. Rojas (1985) indicó que, en la planeación de cualquier programa de desarrollo agrícola, es indispensable definir las zonas más propicias para el establecimiento de cultivos, ya que esto permitirá realizar una explotación racional, de acuerdo con la capacidad productiva de los recursos naturales y conservación de los ecosistemas. El aguacate (*Persea americana* Mill.) es una de las frutas más populares y de consumo generalizado en Venezuela, con grandes perspectivas para ubicarse entre los principales productos no tradicionales de exportación dadas las ventajas de los precios y la demanda del mercado internacional (Barbeau, 1992). En Venezuela, a diferencia de otros países, la producción de aguacate es deficitaria; una estimación del área cosechada de 5611 ha, con una producción de 41 467 toneladas y una productividad media de 7390 kg ha⁻¹; durante los últimos cinco años (Ministerio de Producción y Comercio, 1999). La superficie dedicada a este cultivo ha permanecido más o menos estable en los últimos 25 años, por lo que algunos problemas agronómicos no se han resuelto, en especial los referentes a zonificación (Avílan *et al.*, 1997). En la actualidad, en Venezuela existen 13 398 ha dedicadas al cultivo de aguacate. Este rubro constituye un renglón muy importante dentro del sector agrícola, aportando 0.17% de la producción agrícola nacional. Dada la importancia del cultivo de los frutales, en el caso particular del

aguacate se realizó la zonificación agroecológica para la producción del mismo en la zona central de Venezuela. Se espera que la información que se genere sirva para la planeación y apertura de nuevas áreas para este cultivo, así como reubicarlo de las zonas donde ya se encuentra establecido y obtener un mejor aprovechamiento de los zonificación agroecológica para el aguacate en la zona central de Venezuela por medio de mapas temáticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en la superficie estatal de Aragua y Carabobo, la cual se encuentra ubicada en la zona central de la República de Venezuela, entre 9° 30' 33" y 10° 34' 48" N y entre 66° 33' 11" y 68° 26' 28" O. Se utilizó la metodología de zonificación agroecológica de cultivos, adoptado por el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (Rojas, 1985). De la revisión bibliográfica consultada se determinaron los requerimientos climáticos del cultivo, considerando temperatura, precipitación, humedad relativa, altitud, además los factores edáficos para cada etapa de desarrollo del cultivo de aguacate. El tipo de aguacate utilizado fue el cultivar Choquette, un híbrido entre el guatemalteco y antillano. Se definieron las áreas que presentaron características climáticas favorables para el establecimiento y desarrollo del cultivo del aguacate. Se analizaron datos por décadas de temperaturas máxima y mínima de las 14 estaciones meteorológicas comparándolos con los requerimientos climáticos del cultivo. Éstos indican que temperaturas altas mayores que 35 °C afectan la floración y la fructificación provocando daños en la fecundación, polinización y desprendimiento del fruto. Las temperaturas bajas menores que 13 °C causan daños a la planta retardando la apertura y cierre de las flores, las precipitaciones están bien distribuidas durante todo el año. El período más crítico en el que la planta debe disponer de suficiente agua es desde el cuajado hasta la recolección; pero éste, a su vez, es muy sensible al encharcamiento, lo que produce asfisia radicular y formación de hongos que provocan la pudrición de la raíz como es el caso del hongo *Phytophthora cinamomi*. El aguacate se puede cultivar sin riesgos en zonas con precipitaciones entre 665 y 2000 mm año⁻¹. La humedad relativa alta induce a la proliferación en hojas, tallos y frutos de antracnosis y cánceres. Se considera una humedad relativa óptima aquella que se encuentra entre 60 y 70%.

Para dicho análisis se efectuó una evaluación agroclimática de temperatura, la cual se determinó conociendo la temperatura del mes más caliente y la del mes más frío. Para conocer en qué porcentaje el cultivo satisface sus requerimientos térmicos en las regiones bajo estudio se determinó la eficiencia térmica utilizando la metodología de Boshel y Neild (1976). En la generación del índice térmico se consideró como intervalo óptimo para el desarrollo de todo el ciclo del cultivo la temperatura de 30 °C como máxima y 18 °C como mínima, designándose calificaciones a las temperaturas máxima y mínima mensuales a una escala de 0 a 5, como se muestra en el Cuadro 1.

El pH de 6.5 es aceptable, ya que habrá una buena absorción de nutrimentos; la textura del suelo más recomendada es la franca ya que texturas arcillosas

Cuadro 1. Valoración agroclimática de la temperatura para el aguacate.

Intervalos de temperatura máxima	Calificación por temperatura máxima	Intervalos de temperatura mínima	Calificación por temperatura mínima
°C		°C	
> 38	0	> 22	0
36 a 37.9	1	21 a 21.9	1
34 a 35.9	2	20 a 20.9	3
32 a 33.9	4	19 a 19.9	4
29 a 31.9	5	17 a 18.9	5
27 a 28.9	4	16 a 16.9	4
24 a 26.9	3	15 a 15.9	3
21 a 23.9	2	12 a 14.9	2
18 a 20.9	1	< 12	1
<18	0		

Cuadro 2. Criterios para la clasificación de áreas de acuerdo con eficiencia térmica (ET).

ET (intervalo)	Aptitud agroclimática	Categoría
%		
< 25	No apta	Marginal
25 a 50	Marginalmente apta	Regular
50 a 75	Apta	Buena
> 75	Muy apta	Excelente

tienden al encharcamiento. La salinidad no debe ser mayor que 3 dS m⁻¹, ya que de lo contrario ocurrirán efectos tóxicos de cloruro de sodio y magnesio, produciendo quemaduras en las puntas de las hojas.

Para definir la adaptabilidad de los cultivos respecto a la eficiencia térmica, se utilizó el criterio presentado por Perales y Fregoso (1994) (Cuadro 2).

Cuando se obtuvo la eficiencia térmica para cada estación (Cuadro 3), se definió la adaptabilidad y se procedió a trazar sobre el mapa las isolíneas de probabilidad de la temperatura del mes más caliente.

La evaluación agroclimática por precipitación se efectuó a través de balances hídricos considerando las deficiencias y excesos de agua en el suelo. (Avílan *et al.*, 1997) observaron que excesos de precipitación durante el período de floración y fructificación reducen la producción y calidad de los frutos.

El balance hídrico agrícola seriado se realizó para todas las estaciones, utilizando la precipitación total por década, la evapotranspiración máxima de cada década y la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo. Para el inicio de cada balance hídrico, es

Cuadro 3. Índice térmico total para el aguacate 'Choquette' en 14 estaciones de la zona central de Venezuela.

Orden	Nombre	Altitud	PTmax	PTmin	PTAnual	ET
		m				%
1	Embalse de Camatagua	330	50	24	74	61.66
2	San Casimiro	478	60	49	109	90.83
3	El Cortijo	490	58	56	114	95.00
4	Maracay	455	56	50	106	88.33
5	Ocumare de la Costa	15	47	14	61	50.83
6	La Esperanza	410	56	27	83	69.16
7	Cagua	1509	36	44	80	66.66
8	Las Minas	375	52	28	80	66.66
9	El Cambur	80	42	21	63	52.50
10	Los Aguacates	467	41	13	54	45.00
11	Valencia	470	45	22	67	55.83
12	Manuare	640	53	6	58	48.33
13	Miranda	2063	36	32	68	56.66
14	Puerto Cabello	16	49	35	84	74.00

PTmax = puntaje por temperatura máxima. PTmin = puntaje por temperatura mínima. PTAnual = puntaje por temperatura total anual. ET = eficiencia térmica.

decir en el primer año de estudio de cada estación, la humedad almacenada en el suelo se tomó como cero. Cuyo objetivo era conocer el balance hídrico, el déficit y los excesos por décadas y anuales, para determinar cuáles zonas resultaron aptas y muy aptas en cuanto a factores térmicos y edáficos para el cultivo de aguacate, necesitan aplicación de riego durante alguna época del año.

Mediante el proceso de interpolación se realizó un mapa de isolinéas de déficits y excesos hídricos totales anuales (en mm) y los excesos hídricos totales ocurridos durante el período donde ocurre la floración (décadas 20 a la 36).

De acuerdo con los valores obtenidos de excesos hídricos totales de la década 20 a la 36, se realizó la categorización (Cuadro 4).

Definido el balance, se determinaron valores de deficiencias y excesos (Cuadro 5) y se realizó la cartografía de éstos. Los grados de aptitud climática para aguacate en la zona central de Venezuela quedaron establecidas por la integración de áreas correspondientes a los mapas de eficiencia térmica, índices térmicos e índice hídrico.

Se consideraron, además de la aptitud climática, las condiciones edáficas del área de estudio, de acuerdo con las características de las unidades presentes en la zona y los requerimientos edáficos del cultivo. En el análisis fisioedáfico se consideraron las características de textura, salinidad y pH de las unidades de suelo, debido a que éstas son las que mayor influencia presentan en la adaptabilidad del

Cuadro 4. Criterios para la clasificación de áreas de acuerdo con los valores de excesos hídricos de las décadas 20 a la 36 presentadas en el área de estudio.

Excesos (intervalo) mm	Aptitud agroclimática	Categoría
150 a 300	Muy apta	Excelente
300 a 450	Apta	Buena
450 a 600	Marginalmente apta	Regular
> 600	No apta	Mala

cultivo. Se utilizó la información de muestreos de suelos generados por la Unidad de Laboratorios del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP) en el área de estudio, con relación a la metodología usada en los análisis para textura, método de Bouyoucos modificado, según lo citado por Chirinos *et al.* (1975), pH, método potenciométrico y la conductividad eléctrica, método conductímetro (De Brito *et al.*, 1990), además los estudios de suelo realizados por la FAO/UNESCO (1971), compilados en el mapa mundial de suelo. Con los datos de clima y suelo, se localizaron cartográficamente las áreas por aptitud climática y edáfica. La zonificación agroecológica resultó de sobreponer a la unidad cartográfica de probabilidad de temperatura máxima para el mes de marzo, la eficiencia térmica y los excesos para las décadas 20 a 36. Cada unidad se caracterizó a una cierta categoría de adaptabilidad por clima. Se consideró la categoría más limitativa para definir la clase de adaptabilidad final para el cultivo,

Cuadro 5. Resumen del déficit hídrico y del exceso hídrico totales anuales así como los excesos hídricos totales de las décadas 20 a la 36 para el cultivo del aguacate en 14 estaciones meteorológicas de la zona central de Venezuela.

Estación	Total déficit hídrico anual	Total exceso hídrico anual	Total exceso (década 20 a la 36)
	----- mm -----		
Embalse de Camatagua	305.7	312.6	283.4
San Casimiro	309.2	180.6	166.8
El Cortijo	242.1	173.0	138.4
Maracay	87.5	294.2	227.5
Ocumare de la Costa	176.2	575.5	455.1
La Esperanza	266.4	219.4	187.5
Cagua	0	834.9	473.7
Las Minas	2.5	1062.4	732.8
El Cambur	101.1	273.8	239.7
Los Aguacates	107.6	620.4	491.1
Valencia	169.4	355.1	300.4
Manuare	124.7	908.4	588.9
Miranda	1.7	920.4	479.6
Puerto Cabello	154.1	498.6	389.1

que al integrarlas se generó el mapa de aptitud agroecológica para aguacate en la zona central de Venezuela.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Agroclimático

En el área de estudio, el valor promedio de temperatura máxima para el mes de marzo resultó ser el más alto con 32.5 °C, fluctuando desde 25.4 °C en Cagua, hasta 36.2 °C en el Cambur. Al comparar estos valores con los índices y criterios para definir áreas de adaptación para el aguacate, puede decirse que desde el punto de vista térmico (temperatura máxima), el cultivo presentará problemas al ocurrir temperaturas mayores que 35 °C.

En cuanto a la temperatura mínima, el cultivo de aguacate se ve muy afectado cuando ésta alcanza 6 °C, por lo que en el área de estudio no se observaron problemas de este tipo ya que se presenta una temperatura mínima promedio de 19.7 °C, siendo enero el mes más frío con una temperatura promedio de 18.2 °C; la estación más fría es la de Miranda, seguida de Cagua con un promedio anual de 15.9 y 15.1 °C, respectivamente.

La eficiencia térmica (ET), calculada a partir de los datos de 14 estaciones para el cultivo de aguacate, se presenta en el Cuadro 3. Los valores obtenidos oscilan entre 95 y 45%. La mayoría de las estaciones presentan una ET mayor que 50% y sólo dos de ellas tienen valores inferiores que las definen como áreas que no llenan los requerimientos térmicos para un desarrollo normal del cultivo. Estas estaciones son Los Aguacates y Manuare.

Para definir la adaptabilidad del cultivo del aguacate respecto a la eficiencia térmica, ésta se clasificó de acuerdo con el criterio que se presenta en el Cuadro 2. En la Figura 1, se observan las isolíneas de eficiencia térmica, en el intervalo de 40 a 95%, lo que indica que en el área de estudio existen zonas donde las condiciones térmicas para el desarrollo del aguacate resultaron muy apta, apta y marginalmente apta. En dicha figura, se observa que en la parte suroeste se encuentra la zona marginalmente apta, y en toda la región central del noreste y sureste se encuentra la zona apta, observándose que en toda el área de estudio no existen partes no aptas para el cultivo del aguacate en cuanto a eficiencia térmica.

Análisis Fisiológico

Se refiere al análisis de la información fisiológica disponible y a su interpretación para categorizar a los suelos. El análisis edáfico se realizó con base en características del suelo que limitan el buen desarrollo de cultivo en estudio, considerándose así la textura, pH y salinidad.

En la zona de estudio, el pH va desde 5.7 a 8.1. Los pH más alcalinos se encuentran hacia la parte suroeste y los pH más ácidos en la parte oeste. El suelo puede mejorarse hasta llevarlo a una condición adecuada para el cultivo del aguacate a través de prácticas agrícolas, como el encalado y la fertilización con residuos ácidos según sea el caso.

En el caso de salinidad resultó que para toda la zona no existen problemas, ya que los valores van de 0.04 a 0.38 dS m⁻¹. El cultivo de aguacate es tolerante a concentraciones de salinidad hasta de 3 dS m⁻¹, por lo que obviamente la zona de estudio no presentará problemas y no fue necesario realizar la categorización.

En cuanto a las texturas, se presentan texturas francas consideradas adecuadas para el cultivo del aguacate.

Zonificación Agroecológica

Se llegaron a definir cuatro categorías de aptitud para el desarrollo del cultivo del aguacate en la zona central de Venezuela y son: Muy apta, 8%; Apta, 49%; Marginalmente apta, 34%; y No apta, 9%.

Dichas categorías quedaron definidas por el factor climático, debido a que se consideró que el factor edáfico no limita el desarrollo del cultivo.

En la Figura 2, se muestra el mapa de zonificación agroecológica en función de las exigencias edafoclimáticas. El área muy apta para el cultivo se ubicó al Este de la zona central de Venezuela con 8% que representa 1003.59 km². Un estimado del potencial de área apta para el cultivo resultó de 49% que equivale a 5791.43 km² al Suroeste. Las zonas marginalmente apta con 34%, es decir 4030.94 km², y no apta 9%, equivalente a 1010.91 km², se ubican al Oeste. Las zonas no aptas y marginalmente aptas podrían subir de categoría si se aplicaran prácticas de drenaje, ya que dicha área está limitada por los excesos hídricos que se presentaron. De acuerdo con estas estimaciones, la zona central de Venezuela dispondría de un potencial para el aguacate de

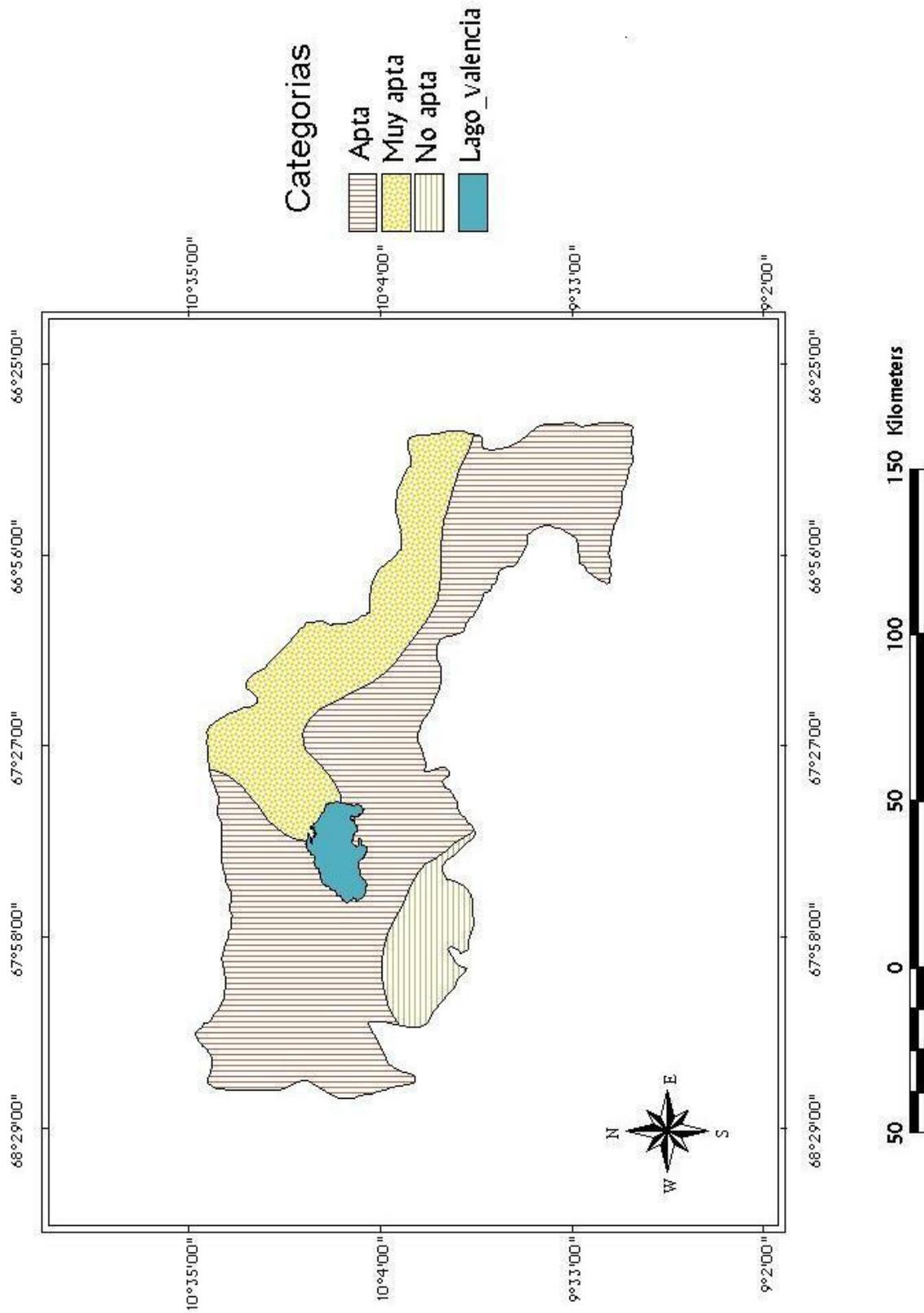


Figura 1. Mapa de categorías por eficiencia térmica para el aguacate en el área de estudio

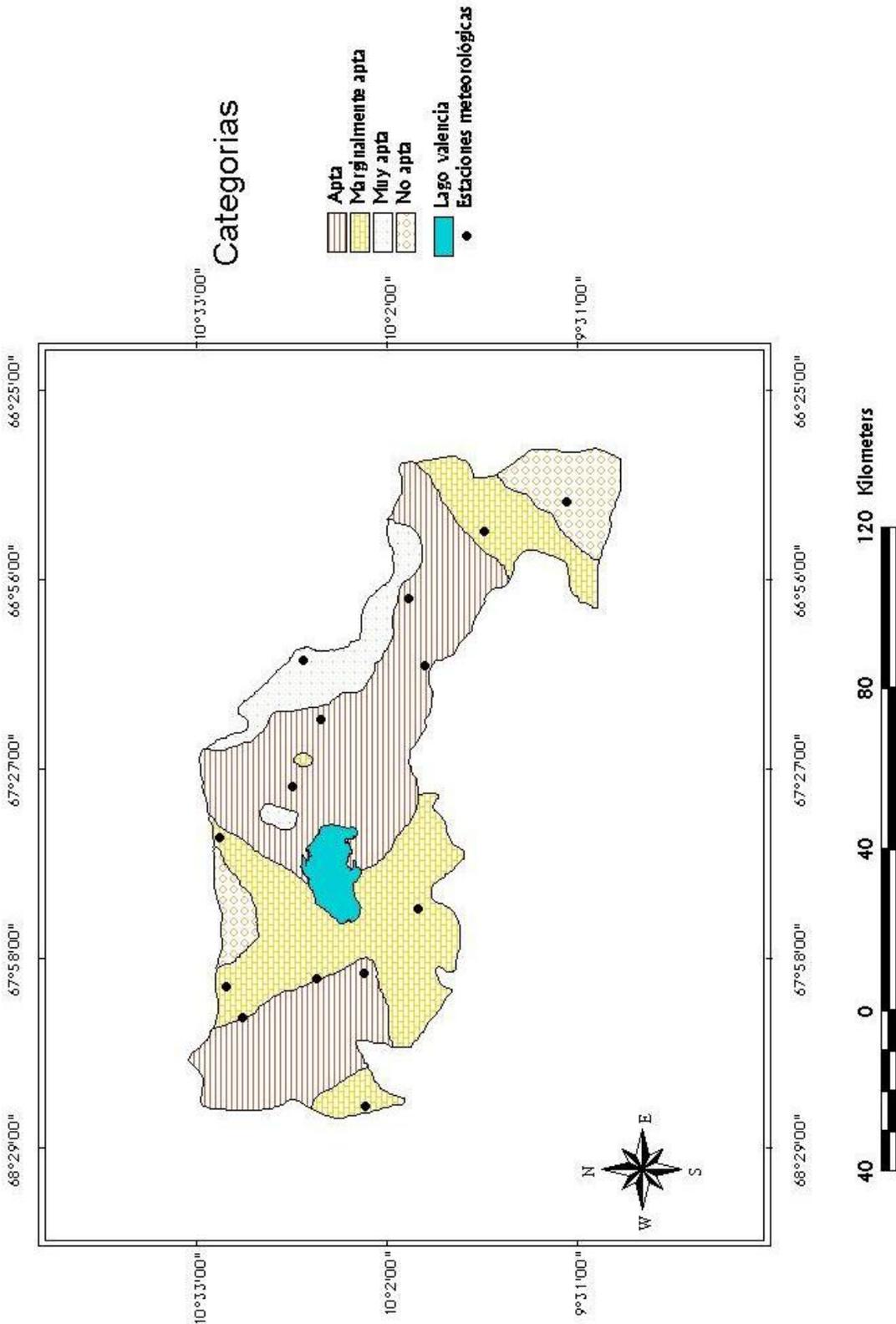


Figura 2. Mapa de zonificación agroecológica para el cultivo del aguacate en la zona central de Venezuela

10 825.96 km² de las cuales 1003.59 km² se ubican en áreas de condiciones ambientales que las hacen prioritarias para el cultivo.

CONCLUSIONES

- De los requerimientos agroecológicos para el cultivo del aguacate se destacan, dentro de los más importantes, la temperatura y la precipitación. La metodología para realizar la zonificación agroecológica se adapta a la información climática y edáfica disponible en la zona de estudio y se logró elaborar la zonificación propuesta con una precisión aceptable; sin embargo, para elevar la precisión de ésta, habrá que hacer estudios de suelo más detallados y un análisis climático en períodos más cortos. En los mapas de zonificación agroecológica elaborados fue posible diferenciar áreas con cuatro categorías de aptitud agroclimática para el cultivo del aguacate. Esta jerarquización permitió seleccionar áreas y constituye, de alguna manera, una alternativa para mejorar los programas de producción agrícola, complementados con la experiencia y con investigación de campo.

- El principal factor limitativo, desde el punto de vista climático, lo constituye el régimen térmico; principalmente las altas temperaturas ya que, como se indica, los valores de temperaturas máximas (mayores que 35 °C) causan serios daños a la fecundación y al cuajado del fruto.

LITERATURA CITADA

- Avílan, L., F. Leal y D. Bautista. 1997. El Aguacatero (Principios y Técnicas para su producción). Espasande, S.R.L. Caracas, Venezuela.
- Barbeau, G. 1992. The production and market of avocado. Tropical Fruits Newsletter 3: 8.
- Chirinos, A., I. López de Rojas y R. González. 1975. Aspectos básicos de un programa de análisis de suelo con fines de fertilidad. FONAIAP-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Maracay, Venezuela.
- Da Silva, G.B. y P.V. Azevedo. 2000. Potencial edafoclimático da "Chapada Diamantina" no estado da Bahía para cultivo de Cítrus. Rev. Brasileira de Agrometeorología 8: 133-139.
- De Brito, G., I. López de Rojas y R. Pérez de Roberti. 1990. Manual de métodos y procedimientos de referencia (Análisis de suelos para diagnósticos de fertilidad) Serie D 26. FONAIAP-Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Maracay, Venezuela.
- FAO/UNESCO (Food and Agriculture Organization). 1971. Mapa mundial de suelo. 1:5 000 000. Vol. I, Leyenda. París, Francia
- Ministerio de Producción y Comercio. 1999. Anuario Agropecuario. Dirección de Estadística. Caracas, Venezuela.
- Neild, R.E. y F. Boshell. 1976. An agroclimatic procedure and survey of the pineapple production potential of Colombia. J. Agric. Meteorology 17: 81-82.
- Perales, M. y L. Fregoso. 1994. Desarrollo sostenible de los agroecosistemas del Sur de Sinaloa. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Rojas, E. O. 1985. Esquema metodológico de zonificación agroecológica de cultivos del IICA. Separata 34. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Sánchez-Carrillo, J. 1999. Agroclimatología. Innovación Tecnológica. Caracas, Venezuela.
- Sediyama-Chohaku, G, J.C. Ferraira-Melo, A. Rosa-dos Santos, A. Ribeiro, M. Heil-Costa, P. Hamakawa, J. Nogueira-da Costa y L. Costa. 2001. Zoneamiento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. Rev. Brasileira de Agrometeorología. Passo Fundo (Número Especial Zoneamiento Agrícola) 9-3: 501-509.

ESTIMACIÓN TEMPRANA DEL RENDIMIENTO DE LA CEBADA MEDIANTE USO DE SENSORES REMOTOS

Early Estimation of Barley Yield Using Remote Sensing

Paulino Ruiz-Huanca¹, Enrique Palacios-Vélez^{1*}, Enrique Mejía-Saenz¹, Adolfo Exebio-García¹, José Luis Oropeza-Mota¹ y Martín Bolaños-González¹

RESUMEN

Uno de los problemas de la producción agrícola es el uso ineficiente de los insumos, principalmente del agua que, además, es escasa en regiones de alta productividad como el estado de Guanajuato. Por otra parte, es cada vez más importante la predicción temprana del rendimiento de los cultivos que permita una planificación de políticas agrícolas y de seguridad alimentaria en una economía de mercado globalizado. Con el propósito de calibrar una metodología para enfrentar estos problemas, la presente investigación se llevó a cabo en el módulo de riego Cortazar del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, México, en el ciclo agrícola otoño-invierno 2001-2002. El propósito de este estudio fue estimar la humedad del suelo con el uso de imágenes de satélite *Landsat 7* y MODIS, usando el índice de déficit hídrico (WDI, por sus siglas en inglés) y determinar una función matemática para conocer la predicción temprana del rendimiento de la cebada (*Hordeum vulgare* L.) con base en los índices de vegetación. De acuerdo con los resultados se concluye que el WDI (*Landsat 7*) demuestra amplia capacidad para estimar la humedad del suelo, ya que la regresión lineal presentó un coeficiente de determinación (r^2) de 0.88. El rendimiento de la cebada puede ser estimado con precisión aceptable considerando el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) e índice de vegetación mejorado (EVI), en el período de floración (promedio de 80 días después de la siembra) la regresión lineal presentó un coeficiente de determinación (r^2) de 0.88 y 0.93, respectivamente. Respecto a las imágenes MODIS, su resolución espacial de 250 m para los índices de vegetación y 1000 m para la banda termal, no permitió hacer un análisis de variables agrícolas en zonas de

agricultura intensiva, donde la superficie predial es pequeña.

Palabras clave: Predicción temprana, índice de déficit hídrico, índices de vegetación, rendimiento, *Hordeum vulgare* L.

SUMMARY

One of the problems of agricultural production is an inefficient and ineffective use of agricultural inputs, especially water which is scarce in some regions of high productivity in the state of Guanajuato, Mexico. On the other hand, an early prediction of the yield of crops that allows better planning for both agricultural and food security policies in a global market economy is becoming more important. In order to calibrate a methodology to face these problems, this study was conducted at the Cortazar irrigation module in the Irrigation District 011 Alto Rio Lerma, Guanajuato, Mexico, in the fall-winter 2001-2002 agricultural cycle. The purpose of this study was to consider the hydric deficit of the soil or water stress of the crop with the use of *Landsat 7* and MODIS satellite images, through the water deficit index (WDI) and to determine a mathematical function that allows early prediction of barley (*Hordeum vulgare* L.) yield with vegetation indexes. The WDI (*Landsat 7*) demonstrates a wide capacity for considering the moisture level of the soil: linear regression shows a determination coefficient (r^2) of 0.88. Barley yield can be estimated with acceptable precision considering the normalized difference vegetation index (NDVI) and enhanced vegetation index (EVI); during the flowering period (average of 80 days after seeding), the linear regression has a determination coefficient (r^2) of 0.88 and 0.93, respectively. With respect to the MODIS images, their space resolution of 250 m for the vegetation indexes and of 1000 m for the thermal band, did not allow, in this case, an analysis of agricultural parameters in areas with intensive agriculture, where the size of the plots is small.

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

* Autor responsable (epalacio@colpos.mx)

Index words: *Early prediction, water deficit index, vegetation index, yield, Hordeum vulgare L.*

INTRODUCCIÓN

En México, el sector agrícola es el principal consumidor de agua, ya que utiliza 76.3% (60.5 km³ de 79.4 km³) del agua disponible (CNA, 2000a), por lo que, conforme la escasez y la competencia se agudizan, se requiere hacer un uso más eficiente de este recurso en la agricultura incrementando la productividad por unidad de volumen de agua. Teniendo en cuenta estos antecedentes, resulta importante calibrar una metodología para estimar el nivel de estrés hídrico de los cultivos, con precisión y costo aceptable. Por otra parte, ante una economía globalizada es trascendental realizar una predicción temprana del rendimiento de los cultivos, aspecto que es objetivo del presente trabajo.

Para definir políticas macroeconómicas y de seguridad alimentaria, se requiere calibrar índices con el uso de imágenes de satélite, que estiman variables biofísicas que determinan el rendimiento de los cultivos. Tal es el caso del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI), cuyo uso ha sido sugerido en diversos trabajos para la predicción de rendimiento y estimación del volumen de producción (Thiruvengadachari y Sakthivadivel, 1999; Soria, 1999). Debido a las características altamente heterogéneas de los suelos es difícil medir su estado de humedad en grandes extensiones, ya que se requerirían de mucha inversión en equipos de medición y personal capacitado. Por esta razón, es necesario aplicar metodologías alternas, como el uso de sensores remotos, ya que éstos han probado ser una herramienta adecuada para estimar el estado de estrés hídrico de los cultivos y la humedad residual del suelo en tiempo real (Jackson *et al.*, 1981, 1986; Moran, 2000). Moran *et al.* (1994) desarrollaron el índice de déficit hídrico (WDI por sus siglas en inglés), el cual combina medidas de reflectancia y temperatura de la superficie terrestre, para estimar la humedad residual del suelo mediante el uso de imágenes de satélite, haciendo posible la implementación del riego en tiempo real.

Moran (2000) definió estrés hídrico como el descenso de los índices de fotosíntesis y transpiración potencial de la planta y, finalmente, decremento del rendimiento del cultivo. Por su parte, Batchelor (1998) indicó que el estrés hídrico es el estado fisiológico de la planta cuando las raíces no pueden

abastecer la cantidad suficiente de agua para satisfacer la demanda evapotranspirativa de las hojas, por lo que el estrés hídrico de la planta es función de esta última y puede ser cuantificado indirectamente midiendo la tasa de evapotranspiración actual de la planta (Eta) y la tasa de evapotranspiración potencial (Etp), es decir, está determinado por la relación Eta/Etp. Sin embargo, debido a que resulta complicado medir Eta a escala de campo (Moran, 2000), es necesaria una alternativa para el empleo del análisis de la dinámica térmica de las plantas. Cuando la vegetación está bien irrigada, el aumento de la radiación incidente implica también un incremento de la evapotranspiración (calor latente), lo que lleva a reducir el calor sensible (temperatura del aire) en zonas inmediatas. En consecuencia, la diferencia entre la temperatura del aire y la de la superficie es un buen indicador del estado hídrico de las plantas. En este principio se han apoyado varios estudios realizados con cultivos bajo riego (Jackson *et al.*, 1981, 1986; Moran *et al.*, 1994). Las imágenes de satélite pueden paliar algunos de los problemas arriba indicados, ya que, por un lado, facilitan una cobertura espacial exhaustiva, con buena frecuencia temporal, lo que asegura poder observar cualquier zona de interés y, por otro lado, la estimación es directa por que se basa en la señal reflejada/emitada por la propia planta, y no en las condiciones atmosféricas que la circundan, por lo que estaría, al menos teóricamente, mejor relacionada que éstas con el estado hídrico específico de cada masa vegetal (Chuvieco *et al.*, 2001).

Soria (1999) obtuvo una función para realizar estimaciones de rendimiento del maíz en El Bajío de Guanajuato, a través del índice de área foliar y su relación con los índices de vegetación de imágenes de los satélites NOAA 14 y *Landsat* -TM. Pastemalci *et al.*, citados por Sakthivadivel *et al.* (1997), reportaron que la regresión entre rendimiento de trigo y NDVI alcanza una correlación de 0.84. Al respecto, Sakthivadivel *et al.* (1997) obtuvieron una relación con coeficiente de correlación de 0.86 para el mismo cultivo.

Basado en los antecedentes anteriormente citados, el presente estudio se realizó con el propósito de calibrar una metodología que relacione variables biofísicas del cultivo de cebada con otras variables, como el grado de humedad del suelo y los índices de vegetación NDVI y EVI para predicción temprana del rendimiento. El segundo objetivo fue estimar la humedad del suelo a través del WDI, con el uso de imágenes de satélite *Landsat* 7 y MODIS, en el

módulo de riego Cortazar del DR 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

El trabajo se realizó durante el ciclo otoño-invierno 2001-2002, en el módulo de riego Cortazar del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, estado de Guanajuato, México. Dicho módulo tiene una superficie de 18 444 ha y cuenta con 2990 usuarios. La zona de estudio se localiza entre 20°39'52" y 20°16'56" N y entre 101°15'10" y 100°98'11" O y se ubica en la imagen 048/046 (path/row) del *Landsat 7*. Los suelos son homogéneos de textura arcillosa (Mejía, 1999; Soria, 1999). El clima que predomina en la región es Cwah denominado clima templado sub-húmedo con lluvias en verano, media anual mayor de 620 mm, y la temperatura media mensual oscila entre 18 y 20 °C (García, 1987).

Materiales

Los materiales que se utilizaron son: termómetro de infrarrojo (TIR), ceptómetro, integrador de área foliar, equipo de medición de humedad gravimétrica del suelo y GPS (*global positioning system*). Se utilizó una imagen de satélite *Landsat 7 ETM+* de fecha 9 de marzo de 2002, la cual consta de ocho bandas con una resolución espacial de 30 m para las seis bandas reflectivas (1 a 5 y 7), 15 m para la banda pancromática (8) y 60 m para la banda térmica (6). Asimismo, se utilizaron cinco imágenes MODIS (composición de 16 días), de fechas de 27 de febrero a 14 de marzo, las cuales incluían las bandas roja e infrarroja, índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI, por sus siglas en inglés) e índice de vegetación mejorado (EVI, por sus siglas en inglés), así como una imagen de temperatura de la superficie. Para el ensayo se eligieron 12 parcelas de control con cultivo de cebada y seis con trigo, las cuales se localizan en la parte media del módulo de riego Cortazar. Además, se contó con información climatológica para los mismos días en que se adquirieron las imágenes de satélite de la estación meteorológica de Villadiego, Guanajuato (Fundación Guanajuato Produce, A.C.).

Metodología

Clasificación temática. Se realizó una clasificación supervisada de características terrestres con la finalidad de estimar la superficie cultivada de cebada y trigo dentro del módulo de riego. Previo a la clasificación de las imágenes de satélite se ubicaron, con ayuda del plano catastral del módulo de riego y equipo GPS, parcelas con diferentes cultivos establecidos en cada una de ellas (trigo, cebada, alfalfa, cebolla, espárrago, avena, lechuga y brócoli). El mayor número de parcelas ubicadas fueron de trigo y cebada, puesto que éstos fueron los cultivos de interés en el presente estudio. Posteriormente, se asignaron cada uno de los píxeles de la imagen de satélite a cada una de las clases previamente establecidas, utilizando el método de máxima verosimilitud (*maximum likelihood*), para lo cual se usaron las bandas visibles e infrarrojas reflectivas del espectro electromagnético (Bandas 1 a 5 y 7 del *Landsat 7*).

Índices de vegetación. Para el cálculo del porcentaje de cobertura vegetal se utilizó el NDVI, ya que ha demostrado una relación lineal con el grado de cobertura vegetal ($r^2 > 0.9$) (Thiruvengadachari y Sakthivadivel, 1999; Huete *et al.*, 1999). Este índice se calcula mediante la Ecuación 1 (Huete *et al.*, 1999).

$$NDVI = \frac{r_{NIR} - r_{red}}{r_{NIR} + r_{red}} \quad (1)$$

donde: ρ_{NIR} y ρ_{red} son fracciones de la reflectancia en las bandas infrarroja cercana (*near infrared*, de 0.78 a 0.90 μm) y roja (0.63 a 0.69 μm). Para el caso de las imágenes de satélite *Landsat 7*, éstas corresponden a las Bandas 4 y 3, respectivamente; y en el caso de las imágenes MODIS a las Bandas 2 y 1. Es importante señalar que el NDVI puede adquirir valores de -1 a 1, correspondiendo un valor de cero cuando no existe vegetación y 1 cuando la cobertura de vegetación es máxima. Algunas coberturas, como agua, pueden dar valores negativos en el cálculo del NDVI, debido a que su reflectancia en la banda roja es mayor que en la NIR (Huete *et al.*, 1999).

Debido a que el NDVI se satura considerablemente ante un índice de área foliar (IAF) mayor que 2 ó 3, por su comportamiento no lineal asintótico, Huete *et al.* (1999) recomendaron el uso de un índice de

vegetación mejorado (EVI, *enhanced vegetation index*) que optimiza la representación de la vegetación, reduciendo al mínimo el ruido inherente al fondo del follaje, influencias atmosféricas y no se satura con valores altos de IAF (Ecuación 2).

$$EVI = 2.5 * \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{L + \rho_{NIR} + C_1 \rho_{RED} - C_2 \rho_{BLUE}} \right) \quad (2)$$

donde: L es la corrección al efecto del fondo del follaje y C₁ y C₂ son coeficientes para la corrección del efecto del aerosol en las bandas rojo y azul. Los coeficientes usados en este estudio son L = 1, C₁ = 6 y C₂ = 7.5 (Huete *et al.*, 1999). Las imágenes del MODIS de ambos índices se obtuvieron directamente a través del *File Transference Protocol* (FTP).

T_s-T_a e índice de déficit hídrico (WDI). En la imagen *Landsat 7*, a partir de la Banda 6.2 (10.4 a 12.5 μm) se calcularon los valores de temperatura de la superficie, siguiendo el procedimiento descrito en el manual del usuario de *Landsat 7 (Landsat 7 Science Data Users Handbook)*. En el caso del MODIS, se utilizó una imagen termal de la superficie, de tal forma que con ambas imágenes termales y el valor de la temperatura ambiental obtenido de la estación meteorológica de Villadiego se calculó la imagen de T_s-T_a. Operacionalmente, WDI se define como el cociente de las distancias de AC a AB de un determinado píxel (Figura 1, Ecuación 3) y toma valores de 0 (condiciones óptimas de humedad) a 1 (condiciones de máximo estrés) (Moran *et al.*, 1994).

$$WDI = \frac{AC}{AB} \quad (3)$$

donde: el borde izquierdo del trapecioide índice de vegetación/temperatura (VIT) corresponde a valores T_s-T_a para superficies con índice de evapotranspiración potencial y el borde derecho corresponde a valores T_s-T_a para superficies sin evaporación. Para el trapecioide, existen cuatro posibles extremos que se pueden encontrar para una superficie con cultivo. En la práctica, se utilizó la ecuación de balance de energía de Penman-Monteith (Moran, 2000) para definir los cuatro vértices del trapecioide. Si las superficies representadas por las esquinas del trapecioide VIT están presentes en una escena de interés, es posible hacer mediciones directas de (T_s-T_a) (Clarke, 1997). En este caso, se obtuvieron

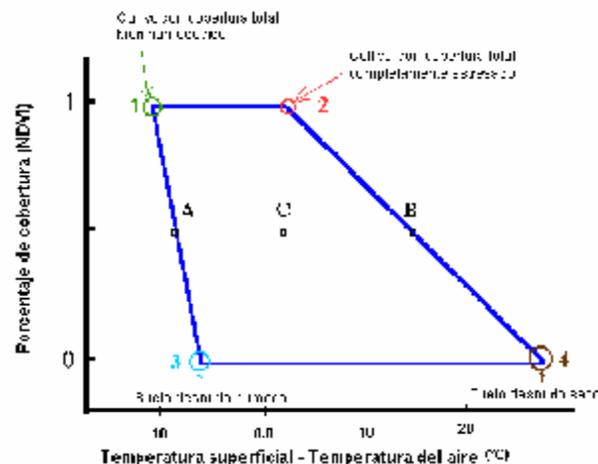


Figura 1. Trapecioide índice de vegetación/temperatura (VIT) NDVI vs T_s-T_a.

de esta manera los valores de los vértices que se asignaron para niveles de 0 y 0.8 de NDVI, los cuales se utilizaron para obtener los valores de WDI.

Actividades de campo. Las actividades que se ejecutaron fueron: selección de parcelas, las cuales se ubicaron utilizando el catastro actualizado con el que cuenta el módulo de riego, así como equipo GPS; determinación de las propiedades físicas del suelo mediante análisis de muestras de suelo en laboratorio; medición de la humedad del suelo; medición del índice de área foliar, para lo cual se utilizó un integrador de área foliar; medición de la temperatura del follaje mediante la utilización de un termómetro de infrarrojo y determinación del rendimiento.

Análisis de la información en gabinete. Con la información obtenida se realizaron análisis de regresión de las variables: NDVI vs IAF, EVI vs IAF, T_s-T_a (*Landsat 7*) vs humedad aprovechable residual (HAR), WDI vs HAR, NDVI vs rendimiento, EVI vs rendimiento y T_s-T_a (TIR) vs HAR. Con estas funciones se realizó la predicción del rendimiento de la cebada y se estimó la humedad aprovechable residual del suelo en el área de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Patrón de Cultivos Ciclo Otoño-Invierno (2001-2002)

El ciclo otoño-invierno 2001-2002 (O-I) se caracterizó por un cambio notable en el patrón de cultivos, al invertirse la superficie cultivada de cebada y trigo, de esta forma se establecieron un total 8614 ha

(60%) de cebada, 2443 ha de trigo (17%) y de otros cultivos 3246 ha (23%), como consecuencia de políticas establecidas para hacer más eficiente el uso del agua.

Clasificación Temática

Como resultado de la clasificación temática de la imagen del *Landsat 7*, se logró separar clases de cobertura superficial de cebada y trigo (juntos), otros cultivos, parcelas en barbecho, y ciudad-poblaciones, puesto que fue de interés del estudio identificar las superficies de cebada, trigo y barbecho. La superficie sembrada de trigo y cebada en el ciclo O-I en el módulo de riego Cortazar fue de 11 056 ha y la obtenida a partir de la clasificación supervisada de la imagen de satélite fue de 11 960 ha, encontrándose una diferencia de 904 ha. Se asume que el error de la clasificación temática es de 8% en la clase de interés (cebada y trigo).

Relación Índice de Vegetación e IAF

Para obtener las relaciones funcionales de los índices de vegetación estudiados en el presente trabajo, se seleccionaron únicamente los píxeles que estaban cubiertos en 100% por cultivo, es decir, se eliminaron los píxeles que estaban en el borde de cada parcela.

La Figura 2 representa la distribución de los valores de NDVI (obtenidos a partir de la imagen *Landsat 7*) e IAF, cuya función polinomial de segundo grado (Ecuación 4) presenta una correlación alta ($r^2 = 0.874$). En cambio, los valores de NDVI (obtenidos a partir de la imagen MODIS de 16 días) e IAF, relacionados mediante una función polinomial presentan una baja correlación ($r^2 = 0.186$), debido a

su resolución espacial, ya que promedian la respuesta de una superficie de 250 x 250 m, por lo que los píxeles de las imágenes MODIS no representan en su totalidad a la cobertura del cultivo en estudio.

$$NDVI_{(reflectancia)} = -0.1501 + 0.1748 * IAF - 0.0092 * IAF^2$$

$(\epsilon=0.0044) \qquad (\epsilon=0.0030)$

, $r^2 = 0.874$ (4)

La Figura 3 muestra la información de las variables EVI (calculados con valores de reflectancia del *Landsat 7*) y el IAF; estas variables presentan una mayor correlación ($r^2 = 0.784$) para una función polinomial de segundo grado (Ecuación 5). En cambio, las variables EVI (MODIS 16 días) e IAF, también para una función polinomial, presentan baja correlación ($r^2 = 0.278$).

$$EVI_{(Reflectancia)} = -0.2724 + 0.1383 * IAF - 0.0072 * IAF^2$$

$(\epsilon=0.0495) \qquad (\epsilon=0.0034)$

, $r^2 = 0.784$ (5)

Los bajos coeficientes de determinación entre los índices de vegetación del MODIS se explican por su baja resolución espacial (250 m), pues en el área del píxel se encuentran coberturas diferentes a las del cultivo, así como por su menor ancho de banda (0.05 μm en la banda roja y 0.035 μm en la banda infrarroja). Los resultados obtenidos coinciden con los reportados por Thenkabail y Smith (2001) y Huete *et al.* (1999), quienes indicaron que la función se ajusta a la exponencial y presenta una tendencia asintótica para IAF mayores que 2 y 3; puesto que los valores obtenidos, en este trabajo, son mayores que 4.5, por lo que los puntos se ubican en la parte asintótica, ajustándose mejor a una función polinomial.

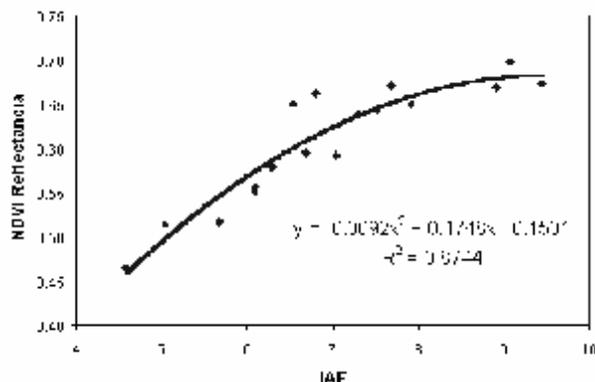


Figura 2. Relación entre las variables NDVI vs IAF.

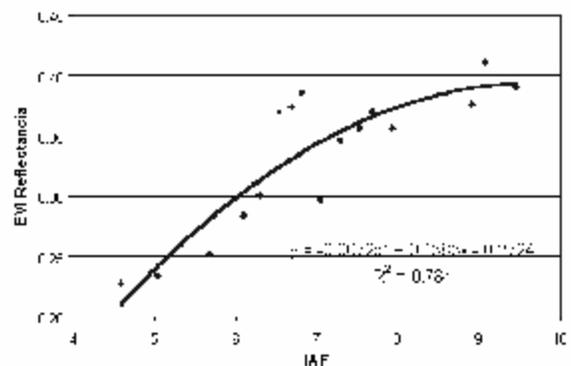


Figura 3. Relación entre las variables EVI vs IAF.

Relación T_s-T_a (Landsat 7) con la Humedad Aprovechable Residual (HAR)

Los valores T_s-T_a concuerdan con los obtenidos por Jackson *et al.* (1981) y Moran (2000), quienes indicaron que la temperatura del follaje, en un suelo con humedad óptima, baja su temperatura con respecto a la del ambiente, en 1 a 6 °C. En el presente estudio el mayor decremento de temperatura alcanzó un valor de -5.20 °C (Figura 4). La relación de las variables de HAR y T_s-T_a presenta alta correlación (Ecuación 6).

$$T_s - T_a = -0.7084 - 3.6474 * HAR, \quad r^2 = 0.709 \quad (6)$$

(e=0.6028)

Relación Humedad Aprovechable Residual del Suelo (HAR) y WDI

En la Figura 5 puede observarse que la HAR determina el valor de WDI, ya que la regresión lineal presenta una alta correlación (Ecuación 7). La mayor frecuencia se registra para un valor de WDI igual a 0.26, que corresponde a una humedad residual de 0.61, es decir, no llega al límite permisible (0.40), lo cual indica que buena parte de las parcelas de cebada y trigo contaba, el 9 de marzo de 2003, con un buen suministro de agua (evapotranspiración óptima).

$$HAR = -2.4807 * WDI + 1.2516, \quad r^2 = 0.882 \quad (7)$$

(e=0.2271)

Relación T_s-T_a (Landsat 7) y T_s-T_a (MODIS)

Los valores de T_s-T_a , calculados a partir de los valores de temperatura superficial obtenidos de la

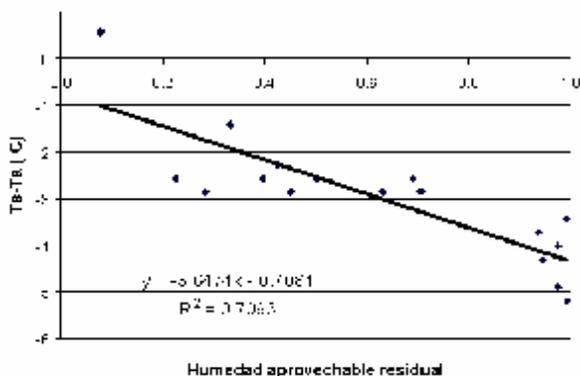


Figura 4. Relación entre las variables humedad aprovechable residual del suelo y T_s-T_a .

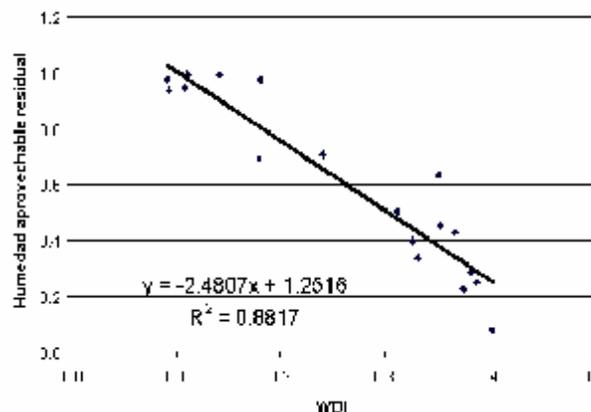


Figura 5. Relación entre índice de déficit hídrico y humedad aprovechable residual del suelo.

imagen MODIS, registran valores positivos para los puntos de control y no presentan ninguna relación con los valores de T_s-T_a Landsat 7, debido a lo cual no fue posible realizar un análisis de WDI a partir de este tipo de imágenes. Esto se explica por la baja resolución espacial que la banda termal de las imágenes MODIS tiene, ya que mientras la banda termal de las imágenes Landsat 7 permite adquirir un promedio de 60 x 60 m (3600 m²) de superficie en un píxel, la banda termal de las imágenes MODIS promedia 1000 x 1000 m (1 000 000 m²) de área. En consecuencia, la temperatura de la superficie del suelo desnudo (mayor que la temperatura ambiente, 35 a 40 °C) tendrá un efecto mayor en el promedio de temperatura calculado para cada píxel de la imagen MODIS, dependiendo principalmente del área que el suelo desnudo ocupe dentro de cada píxel.

Relación T_s-T_a (Termómetro de Infrarrojo TIR) y Humedad Aprovechable Residual

La regresión entre horas del día y los valores de T_s-T_a presenta una alta correlación ($r^2 = 0.728$) para una función lineal y permite concluir que se registran mayores diferencias de temperatura en horas de la tarde (17:00 h). Esta característica provocó interferencia en la relación de T_s-T_a con la humedad aprovechable residual, debido a que las mediciones de temperatura, con el termómetro de infrarrojo se hicieron a diferentes horas del día. Para evitar lo anterior se recomienda realizar mediciones de temperatura con el TIR en horas cercanas al medio día solar (entre 11:00 y 13:00 h).

Relación Funcional entre IAF y Rendimiento

La Figura 6 representa la relación entre el rendimiento de las parcelas y el IAF medido en los puntos de control (parcelas piloto). Para una función lineal se tiene una correlación alta (Ecuación 8), lo que permite predecir el rendimiento de la cebada a partir del IAF, sin embargo, el problema puede radicar en la gran dificultad de la medición de este índice por métodos directos.

$$\text{Rendimiento}_{(\text{t ha}^{-1})} = 0,4071 * \text{IAF} + 3.1455$$

(e=0.0823)

, $r^2 = 0.753$ (8)

Ecuación Funcional entre Índice de Vegetación y Rendimiento

La regresión lineal entre el NDVI y el rendimiento, presenta una correlación alta (Ecuación 9). Se aprecia que los incrementos de valores de NDVI se manifiestan en incrementos de valores de rendimiento.

$$\text{Rendimiento}_{(\text{t ha}^{-1})} = 11,4815 * \text{NDVI} - 0.8817$$

(e=1.3826)

, $r^2 = 0.8846$ (9)

La regresión con el EVI (Ecuación 10) también presenta alta correlación.

$$\text{Rendimiento}_{(\text{t ha}^{-1})} = 12,8451 * \text{EVI} + 1.9025$$

(e=1.1229)

, $r^2 = 0.9356$ (10)

Estimación de Rendimiento

Los valores de NDVI y EVI de una parcela de control corresponden a la media de todos los píxeles incluidos dentro de la parcela, puesto que el rendimiento corresponde a la parcela completa. De esta forma se estimó, utilizando la Ecuación 9, que el rendimiento promedio en todo el módulo de riego fue de 6.22 t ha^{-1} y la producción de grano estimado para el módulo fue 74 228 toneladas. La Comisión Nacional del Agua (CNA, 2000b) indicó que el rendimiento de la cebada en el ciclo O-I del Distrito de riego 011 es de 5.5 t ha^{-1} y, en primavera-verano (P-V), éste es de 6.2 t ha^{-1} , por lo que se considera que los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango estimado por otros métodos.

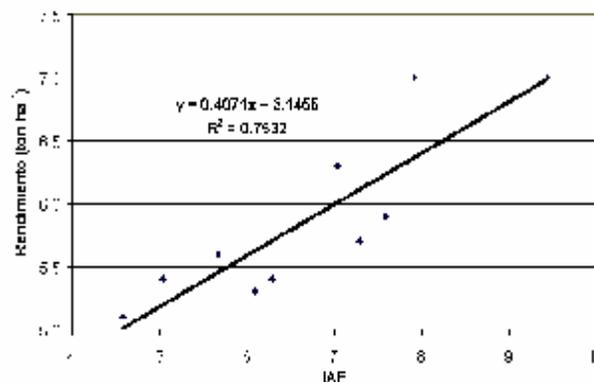


Figura 6. Relación entre rendimiento e IAF.

Estimación de la Humedad Aprovechable Residual (HAR)

En la estimación de niveles de humedad aprovechable residual, se generaron zonas con mayor humedad, las cuales se diferenciaron en la imagen de satélite *Landsat 7*. Esto se deba a la presencia de pozos dentro del módulo de riego, ya que no se aprecia una influencia clara debido a la cercanía del canal principal. Como resultado de la estimación de la HAR, se calculó que 2422 ha superaron el déficit permitido y 8264 ha fueron inferiores al déficit permitido (no presentaron estrés).

CONCLUSIONES

- La relación existente entre el IAF medido y el NDVI calculado a partir de valores de reflectancia de las bandas roja e infrarroja de la imagen de satélite *Landsat 7* presenta una correlación alta ($r^2 = 0.87$) para una función polinomial de segundo grado. De igual forma, la relación funcional obtenida entre el rendimiento y los índices de vegetación, NDVI y EVI, a los 80 días después de la siembra, presentó una correlación alta ($r^2 = 0.88$ y 0.93 , respectivamente), lo cual permite conocer una predicción temprana del rendimiento de la cebada. La metodología aplicada puede ser de gran utilidad, en el caso de este cultivo, para estimar con anticipación el rendimiento y volumen de grano cosechado, con la finalidad de llevar a cabo una mejor planeación en la comercialización de este producto.
- La estratificación por niveles de cobertura vegetal de los valores de $T_s - T_a$ con el WDI permite una mejor estimación de la humedad del suelo, ya que la relación funcional presenta una alta correlación ($r^2 = 0.88$).

Se considera que el WDI es un buen estimador de la humedad aprovechable residual del suelo, por lo que es posible la utilización de esta metodología en grandes áreas agrícolas, como un método adecuado en precisión, tiempo y costo para la estimación del grado de estrés hídrico al que están sujetos los cultivos.

- Las imágenes del MODIS, por su resolución espacial de 250 m para los índices de vegetación y 1000 m para la banda termal, no permiten hacer un análisis de variables agrícolas en una zona de agricultura intensiva y parcelas pequeñas (menores que 10 ha), como lo es el área de estudio de la presente investigación.

LITERATURA CITADA

- Batchelor, W.D. 1998. Role of water stress in yield variability. Iowa State University. Ames, IA.
<http://www.ent.iastate.edu/ipm/icm/1998/4-9-1998/yieldvar.html> (25noviembre 2002).
- Chuvieco, E., F. Salas, I. Aguado, D. Cocero y D. Riaño. 2001. Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. Madrid, España.
- Clarke, T.R. 1997. An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. *HortTechnology* 7: 9-16.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 2000a. El Agua en México: Retos y avances. México, D.F.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 2000b. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego, año agrícola 1998-1999. México, D.F.
- Fundación Guanajuato Produce. Red de estaciones meteorológicas. Celaya, Guanajuato, México.
<http://www.fundacionguanajuato.com/RedMetereologica.htm> (20 junio 2002)
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. 4ª ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Huete, A., C. Justice y W. van Leeuwen. 1999. MODIS vegetation index (mod 13) algorithm theoretical basis document. MODIS. 1999.
http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf (15 mayo 2002)
- Jackson, R.D., S.B. Idso, R.J. Reginato y P.J. Pinter. 1981. Canopy temperatures as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17: 1133-1138.
- Jackson, R.D., P.J. Pinter, R.J. Reginato y S.B. Idso. 1986. Detection and evaluation of plant stress for crop management decisions. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing* GE-24: 99-106.
- Mejía-Sáenz, E. 1999. Diagnóstico y propuesta para incrementar la productividad de los recursos en distritos y módulos de riego. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Moran, M.S. 2000. Thermal infrared measurement as an indicator of plant ecosystem health, USAD-ARS Southwest Watershed Research Center. Tucson, Arizona.
- Moran, M.S., T.R. Clark, Y. Ionue y A. Vidal. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 49: 246-263.
- Sakthivadivel, R., S. Thiruvengadachari, Upali Amerasinghe, W.G.M. Bastiaanssen y D. Molden. 1997. Performance Evaluation of the Bhakra Irrigation System, India, using remote sensing and GIS techniques. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka.
- Soria, R. J. 1999. Determinación de sitios de ocurrencia y estimación de rendimientos de maíz (*Zea mays* L.) a través de sensores remotos. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Thenkabail, P.S. y R.B. Smith. 2001. Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. Center for Earth Observation (CEO), Yale University. New Haven, Connecticut
- Thiruvengadachari, S y R. Sakthivadivel. 1999. Satellite remote sensing for assessment of irrigation system performance: A case study in India. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka.

CONTENIDO Y DISTRIBUCIÓN DE LAS FORMAS DE HIERRO EN ALGUNOS SUELOS DE LA SIERRA NORTE DE PUEBLA, MÉXICO

Content and Distribution of Iron Forms in Some Soils of the Sierra Norte of the Puebla State, Mexico

Eloy Camacho-Díaz^{1‡}, Jesús Ruiz-Careaga², Mariela Deyta-Sánchez¹, Yoli Deyta-Sánchez¹ y Miguel García-Gamboa¹

RESUMEN

Se seleccionaron diferentes perfiles de suelos de la región de la Sierra Norte de Puebla, en los cuales se práctico, por horizontes genéticos, el análisis del contenido de las formas del hierro en el suelo. A través del estudio del contenido y de la distribución de las formas del hierro, se revela que este elemento mayor del suelo es importante para el diagnóstico y la clasificación, pues permite apreciar diferencias en la intensidad del proceso de alteración de los suelos.

Palabras clave: Hierro del suelo, Fe libre, Fe amorfo, Fe cristalizado.

SUMMARY

Different soil profiles were selected in the Sierra Norte region of the state of Puebla, in which genetic horizons were analyzed for content of iron forms in soils. The study of the content of iron forms reveals that the major element (iron) is important for diagnosis and classification of soils. This allows appreciation of some differences in the intensity of the soil alteration process.

Index words: Soil iron, free iron, amorphous iron, crystal iron.

INTRODUCCIÓN

Las diversas formas del hierro ejercen una marcada influencia sobre las propiedades de los suelos, teniendo una repercusión importante en la

génesis y evolución de los mismos, también intervienen, de forma significativa, en el comportamiento de algunas propiedades de la fertilidad del suelo.

De esta manera, la cantidad de sesquióxidos presentes en los mismos dependerá de la intensidad del proceso de alteración, siendo, por consiguiente, considerado por muchos especialistas como un elemento diagnóstico de la evolución de los suelos (Blume y Schwertmann, 1969; Duchaufour y Souchier, 1978; Ross, 1980; Fitzpatrick y Schwertmann, 1982; Prost *et al.*, 1989; Singh y Gilkes, 1990; Paterson *et al.*, 1991; Sierra *et al.*, 2000).

Entre los óxidos e hidróxidos de hierro más conocidos en los suelos se encuentran: hematita, goetita, magnetita, lepidocrosita, y formas amorfas-ferrihidrita (Schwertmann, 1964; Schwertmann *et al.*, 1974).

Las diversas formas del hierro que un suelo pueda contener provienen esencialmente de la alteración de los minerales ferromagnesianos (biotitas, anfíboles y piroxenos), los cuales evolucionarán en el suelo en dependencia de los factores formadores.

En el trópico y subtropico, las formas del hierro desempeñan un papel importante en el comportamiento y en la manifestación de algunas de las propiedades del suelo, como: color, procesos óxido-reducción, estabilidad de la estructura y retención y fijación de elementos en forma no asimilable, como el fósforo y zinc (Oades, 1963; Olmedo, 1971; Vizier, 1971; Tinker, 1986; Gaviria y Faivre, 1994; Rodríguez y Adams, 1996). Igualmente, se ha comprobado que en la distribución y naturaleza de las formas del hierro, el pedoclima del suelo interviene decisivamente (Fitzpatrick y Schwertmann, 1982), por lo que sus formas constituyen morfológicamente un elemento diagnóstico del estado de oxidación del suelo y su actividad biológica.

En los suelos de México, se reportan trabajos sobre este elemento, fundamentalmente como componente de los oligoelementos. Miehlich (1978,

¹ Laboratorio de Alta Tecnología de Orizaba S.C. Norte 32 # 50 entre Colon y Ote. 5, 94300 Orizaba, Veracruz, México.

[‡] Autor responsable (eloyjunio20@yahoo.com.mx)

² Dirección Agropecuaria de la Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

1980) señaló la importancia del contenido de hierro libre en Andosoles, relacionando su contenido como parámetro que permite diferenciar etapas de desarrollo del suelo y su evolución. Etchevers (1985) resumió los resultados de las investigaciones desarrolladas en los suelos volcánicos de México y resaltó la complejidad de la formación de estos suelos y las variaciones en su composición química-mineralógica en función de sus materiales formadores.

En el presente trabajo, se evaluaron las diferentes formas del hierro, así como su distribución en suelos formados sobre materiales volcánicos de alteración avanzada de la sierra norte de Puebla y su posible influencia sobre la evolución de los mismos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los perfiles de suelos contemplados en este trabajo corresponden a un estudio de casos realizado en el marco del proyecto Agroecológico de la región de la sierra norte de Puebla. En este contexto, los perfiles se ubican en un sector geomorfológico de meseta de montaña, teniendo como características diferenciales su posición en el relieve y la vegetación predominante. Esta región se ubica en el eje volcánico transversal de formación geológica muy compleja (Cuanalo *et al.*, 1989), lo cual repercute en la formación y en las características de los suelos.

Descripción de Perfiles

La unidad geomorfológica donde se ubican los perfiles responde a una meseta de montaña, con variación sustancial altitudinalmente (400 a 1400 m), lo cual, además de tener incidencia en las características morfológicas de los suelos, influye en la manifestación de los procesos degradantes, como: la erosión y la acidificación.

Perfil 74

Ubicación: Xicotepec
Relieve: Meseta ondulada
Altitud: 490 m
Vegetación: Pasto natural
Drenaje superficial: Bueno
Material de origen: Basalto

Horizonte A (0 a 8 cm). Color pardo rojizo (2.5YR 2.5/2H; 2.5YR 3/3S), seco, compacto, poco poroso, arcillo limoso, estructura subangular mediana y pequeña, sistema radical desarrollado, transición difusa.

Horizonte AB (8 a 30 cm). Color pardo rojizo (2.5YR 2.5 2H; 2.5YR 4/4S), ligeramente húmedo, compacto, medianamente poroso, arcilloso, estructura subangular mediana, sistema radical medianamente desarrollado, transición gradual.

Horizonte B₁ (30 a 100 cm). Color rojo (2.5YR 3/6H; 2.5YR 4/6S) ligeramente húmedo, compacto, medianamente poroso, arcilloso, estructura subangular mediana, presencia de manchas rojo-amarillentas, sistema radical poco desarrollado, transición difusa.

Horizonte B₂ (100 a 140 cm). Color rojo (2.5YR 4/8H; 2.5YR 5/8S), húmedo, compacto, poco poroso, arcilloso, estructura subangular mediana con caras brillosas sobre los agregados, presencia de manchas rojo-amarillentas, sistema radical poco desarrollado, transición difusa.

Horizonte BC (140 a 154 cm). Color pardo rojizo claro (2.5YR 3/4H; 2.5YR 4/8S), húmedo, compacto, poco poroso, arcilloso, estructura subangular mediana, presencia de manchas gris-amarillentas, transición gradual al material basáltico.

Perfil 90

Ubicación: Xicotepec
Relieve: Meseta fuertemente ondulada
Altitud: 600 m
Vegetación: Bosque secundario con especies como encino rojo (*Quercus* sp.), encino blanco (*Quercus* sp.)

Drenaje superficial: Bueno

Material de origen: Basalto

Horizonte A (0 a 45 cm). Color pardo oscuro (10YR 2/2H; 10YR 3/3S), húmedo, friable, muy poroso, estructura granular pequeña, franco arenoso arcilloso, sistema radical desarrollado con raíces finas, transición gradual.

Horizonte AB (45 a 80 cm). Color pardo (7.5YR 3/4H; 7.5YR 4/4S), húmedo, medianamente compacto, poco poroso, arcillo-arenoso, estructura de bloques subangulares, sistema radical medianamente desarrollado, transición difusa.

Horizonte B₁ (80 a 130 cm). Color pardo (7.5YR 3/4H; 7.5YR 4/6S), compacto medianamente poroso, estructura de bloques subangulares, sistema radical medianamente desarrollado, transición difusa.

Horizonte B₂ (130 a 220 cm). Color pardo (7.5YR 3/4H; 7.5YR 5/4S), húmedo, compacto, poco poroso, arcilloso estructura en bloques subangulares pequeños, sistema radical poco desarrollado.

Perfil 209

Ubicación: Naupan

Relieve: Meseta ondulada

Altitud: 1300 m

Vegetación: Bosque con árboles recientes y helechos

Drenaje superficial: Bueno

Material de origen: Basalto

Horizonte A (0 a 25 cm). Color pardo rojizo (5YR 3/4H; 5YR 4/4S), húmedo, friable, muy poroso, franco arcillo arenoso, estructura granular, sistema radical desarrollado con raíces finas y medias, transición nítida.

Horizonte B₁ (25 a 75 cm). Color rojo (2.5YR 3/6H; 2.5YR 4/8S), húmedo, compacto, medianamente poroso, arcillo-limoso, estructura subangular, sistema radical desarrollado con raíces finas y medias, transición difusa.

Horizonte B₂ (75 a 103 cm). Color rojo (2.5YR 3/6H; 2.5YR 4/6S), húmedo, medianamente compactado, poco poroso, arcilloso, estructura de bloques subangulares, sistema radical medianamente desarrollado con raíces medias y gruesas, transición difusa.

Horizonte B₃ (103 a 200 cm). Color rojo (2.5YR 3/6H; 2.5YR 4/6S), húmedo, compacto, medianamente poroso, arcilloso, estructura subangular mediana con superficie brillante de los agregados, sistema radical poco desarrollado, transición difusa.

Horizonte B₄ (200 a 240 cm). Color rojo (2.5YR 4/6H; 2.5YR 5/6S), húmedo, medianamente compactado y poco poroso, arcilloso, estructura en bloques, transición difusa.

Perfil 69

Ubicación: Xicotepec

Relieve: Meseta fuertemente ondulada

Altitud: 500 m

Vegetación: Área con café de sombra

Drenaje superficial: Bueno

Material de origen: Rocas ígneas y basalto

Horizonte AB (0 a 30 cm). Color pardo rojizo (5YR 3/3H; 5YR 4/4S), húmedo, ligeramente compacto, medianamente poroso, franco arcilloso, estructura granular pequeña, sistema radical medianamente desarrollado, transición nítida.

Horizonte B (30 a 90 cm). Color rojo-amarillento (5YR 4/6H; 5YR 5/8S), ligeramente húmedo, compacto y poco poroso, arcilloso, estructura de bloques medianos, sistema radical medianamente desarrollado, transición nítida.

Horizonte BC (90 a 156 cm). Color rojo-amarillento (5YR 4/6H; 5YR 5/6S), húmedo, ligeramente compacto y medianamente poroso, arcilloso, estructura de bloques grandes, presencia de raíces finas, igualmente gravas de color gris-amarillento en avanzado estado de alteración.

Perfil 400

Ubicación: Xicotepec

Relieve: Meseta fuertemente ondulada

Altitud: 400 m

Vegetación: Bosque secundario con especies, como (*Guazuma Ulmifolia*), chaca (*Bursera Smarouba*), piñón (*Pinus Cembroides*)

Drenaje superficial: Bueno

Material de origen: Rocas ígneas y basalto

Horizonte B₁ (0 a 15 cm). Color pardo rojizo (5YR 3/4H; 5YR 4/4S), ligeramente húmedo, compacto, medianamente poroso, arcillo-arenoso, estructura de bloques subangulares medianos, sistema radical desarrollado con presencia de gravas (< 5%), transición difusa.

Horizonte B₂ (15 a 50 cm). Color rojo-amarillento (5YR 4/6H; 5YR 4/6S), ligeramente húmedo, compacto, poco poroso, arcilloso, estructura de bloques subangulares medianos y grandes, sistema radical poco desarrollado, escasas gravas, transición difusa.

Horizonte B₃ (50 a 75 cm). Color pardo rojizo (5YR 3/4H; 5YR 5/6S), medianamente húmedo, ligeramente compacto, poroso, arcilloso, estructura de bloques subangulares medianos y pequeños, sistema radical escaso, pocas gravas, transición difusa.

Horizonte BC (75 a 100 cm). Color pardo rojizo claro (5YR 3/4H; 7.5YR 4/6S), medianamente húmedo, poco compacto y medianamente poroso, arcillo-arenoso, no bien estructurado, presencia de gravas (5%) en estado de alteración, se pasa al material de roca basáltica.

Métodos Empleados

Los suelos se muestrearon a diferentes profundidades por horizontes genéticos. La metodología analítica abarcó los aspectos siguientes: el pH se determinó por potenciometría en suspensión hídrica y solución 1 N de KCl empleando una relación suelo-solución 1:2. El Δ pH expresa la diferencia entre el pH en agua y el de KCl para detectar si existen cargas positivas en el suelo. La acidez intercambiable

se extrae con solución 1 N de KCl, la acidez total y el hidrógeno intercambiable se determinan por volumetría y el aluminio intercambiable se obtiene por diferencia. Las bases cambiables por el método de lixiviación con acetato de amonio 1 N a pH 7.0, los elementos Ca, Mg, Na y K se determinaron a través de absorción atómica. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método de NH₄OAc pH 7 y Na OAc pH 8 (Aguilar-Santelises *et al.*, 1987). La materia orgánica por el método de Walkley y Black (1934). El hierro total por el método de digestión con HCl concentrado y la determinación por absorción atómica con un equipo Perkin Elmer (SAS 300). El hierro libre se realizó por el método de Aguilera y Jackson (1953) la determinación por absorción atómica, el hierro amorfo por el método de Tamm (Schwertmann, 1964). La expresión de hierro cristalizado proviene de la diferencia Fe libre-Fe amorfo. Igualmente el hierro silicatado resulta de la diferencia Fe total-Fe libre; todos los resultados se expresan en valor absoluto y en porcentaje respecto al hierro total del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento de los rasgos morfológicos y las características del complejo de absorción (Cuadro 1) expresan la manifestación del proceso de acidificación en estado avanzado. La acidificación provoca el lavado y desaturación progresiva de las bases del complejo de intercambio y su sustitución por niveles crecientes de aluminio intercambiable, lo cual incide en la expresión estrecha de la relación Δ pH, aspecto característico de suelos evolucionados con alto contenido de sesquióxidos de hierro y aluminio. En estos suelos, el proceso de acidificación y, por consiguiente, la desaturación guarda cierta relación con la posición altitudinal que ocupan los suelos en el contexto geomorfológico, lo cual está relacionado con la incidencia del factor clima que se hace más húmedo con la altitud y la vegetación que en ellos se desarrolla.

En estas condiciones de acidez, los óxidos de Fe y Al, y el predominio de sus formas, ya sean cristalinas o amorfas, son indudablemente como lo plantea Paterson *et al.* (1991), los componentes más reactivos de dichos suelos, provocando la manifestación de

Cuadro 1. Características generales del complejo absorbente de los suelos.

Perfil	Horizonte y profundidad cm	pH		Δ pH	Acidez intercambiable			CEIC [‡]	CIC [§]	Saturación por Al ³⁺ %
		H ₂ O	KCl		At [†]	H ⁺	Al ³⁺			
					cmol _c kg ⁻¹					
74	A (0 a 8)	5.32	5.09	-0.23	9.00	8.60	0.40	3.69	14.60	10.84
	AB (8 a 30)	5.29	5.15	-0.14	13.00	9.00	4.00	6.42	14.20	62.31
	B ₁ (30 a 100)	4.36	4.35	-0.01	10.00	0.80	9.20	11.44	13.18	80.42
	B ₂ (100 a 140)	4.06	4.31	+0.25	14.00	4.00	10.00	11.21	14.35	89.21
	BC (140 a 154)	4.31	4.43	+0.12	18.00	6.00	12.00	13.15	19.75	91.25
90	A (0 a 45)	4.28	4.16	-0.12	7.00	0.80	6.20	10.39	16.15	59.67
	AB (45 a 80)	4.44	4.06	-0.38	6.60	0.80	5.80	7.92	15.45	73.23
	B ₁ (80 a 130)	4.47	4.02	-0.45	19.00	9.00	10.00	11.47	15.78	87.18
	B ₂ (130 a 220)	4.18	4.01	-0.17	23.00	9.00	14.00	15.27	18.96	91.68
209	A (0 a 25)	4.29	3.92	-0.37	14.00	2.00	12.00	14.48	16.18	82.87
	B ₁ (25 a 75)	4.26	4.13	-0.13	15.00	1.00	14.00	15.42	16.25	90.79
	B ₂ (75 a 103)	4.44	4.21	-0.23	9.40	0.80	8.60	9.70	14.22	88.66
	B ₃ (103 a 200)	4.50	4.26	-0.24	8.00	0.80	7.20	8.31	14.60	86.64
	B ₄ (200 a 240)	4.71	4.23	-0.48	6.40	1.00	5.40	6.71	10.90	80.48
69	AB (0 a 30)	4.78	4.58	-0.20	1.20	1.20	0	2.57	10.31	0
	B (30 a 90)	4.77	4.22	-0.55	1.80	1.00	0.80	2.25	8.45	35.56
	BC (90 a 156)	4.92	4.16	-0.76	3.20	1.20	2.00	3.22	8.76	62.11
400	B ₁ (0 a 15)	4.66	4.32	-0.34	1.00	0.80	0.20	3.86	5.60	5.18
	B ₂ (15 a 50)	4.49	4.05	-0.44	2.40	1.20	1.20	2.62	4.90	45.80
	B ₃ (50 a 75)	4.39	4.06	-0.33	2.60	1.00	1.60	2.96	4.75	54.05
	BC (75 a 100)	4.42	3.96	-0.46	4.40	1.00	3.40	4.67	5.76	72.81

[†] At = acidez total. [‡] CEIC = capacidad efectiva de intercambio catiónico. [§] CIC = capacidad de intercambio catiónico.

cargas variables en los componentes mineralógicos del suelo y su incremento en la CIC.

En el suelo correspondiente al perfil 90, el contenido de hierro total (Cuadro 2) presenta su valor más bajo en el horizonte de superficie, lo cual denota la manifestación del proceso de empobrecimiento superficial. A pesar de presentar un contenido de hierro total relativamente alto en todos sus horizontes, el hierro libre representa menos que 20% del total del suelo. De acuerdo con su contenido en el perfil, los horizontes superficiales son los más evolucionados, observándose una variación bien marcada a partir de 80 cm de profundidad. Se aprecia que entre las formas del hierro libre hay contenidos muy similares de hierro amorfo y cristalizado, lo cual corrobora lo señalado por diferentes autores (Fitzpatrick y Schwertmann, 1982; Sierra *et al.*, 2000), sobre el retardo en la evolución de las formas del hierro por la acción acomplejante que tiene la materia orgánica, sobre todo para este tipo de suelo derivado de productos volcánicos donde la materia orgánica, según sus tenores, se evalúan como ricos (Vázquez-Alarcón, 1997). Sin embargo, en todo el perfil predominan las formas silicatadas del hierro, lo cual indica que el proceso de alteración del suelo es poco intenso, pues el hierro es principalmente parte de las

estructuras de los minerales primarios. La distribución de las formas del hierro evidencia en este perfil una marcada diferencia en cuanto al grado de alteración del material subyacente. Morfológicamente se aprecia una mayor intensidad de la rubefacción con el incremento de la profundidad y la disminución de la materia orgánica, lo cual se asocia con el contenido de óxidos de hierro y su naturaleza (Segalen, 1969; Camacho *et al.*, 1978, 1979; Sierra *et al.*, 2000).

En este relieve de meseta de montaña, el Perfil 74 se ubica en la base de una ondulación y está expuesto a recibir aportes de las zonas circundantes, presentando como vegetación actual pasto natural. En el relieve se constata un régimen hídrico más contrastante, así como un nivel superior de compactación de sus horizontes, aspectos que coadyuvan a la manifestación de síntomas de reducción del drenaje interno, lo cual se expresa por la presencia de manchas de color rojo-amarillentas y gris-amarillenta en la base del perfil.

Las características morfológicas del perfil, así como el contenido y la distribución de las formas del hierro suponen la existencia de una formación compleja de este suelo, donde la parte superficial hasta 30 cm, presenta propiedades químicas y componentes de los óxidos de Fe y Al diferentes al

Cuadro 2. Contenido y distribución de las formas del hierro en los suelos.

Perfil	Horizonte y profundidad cm	Fe ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃			Fe ₂ O ₃ libre	Fe ₂ O ₃			MO [†]
		total	libre	amorfo	cristalizado	silicatado		amorfo	cristalizado	silicatado	
		%									
		% del total									
74	A (0 a 8)	11.89	7.22	0.629	6.59	4.67	60.72	5.29	55.42	39.28	11.57
	AB (8 a 30)	12.46	2.72	0.436	2.28	9.74	21.83	3.50	18.30	78.17	4.02
	B ₁ (30 a 100)	15.89	1.64	0.368	1.27	14.25	10.32	2.32	7.99	89.68	1.14
	B ₂ (100 a 140)	16.15	3.00	0.300	2.70	13.15	18.58	1.86	16.72	81.42	0.70
	BC (140 a 154)	19.40	3.07	0.307	2.76	16.33	15.82	1.58	14.23	84.18	0.70
90	A (0 a 45)	6.83	1.19	0.566	0.624	5.64	17.42	8.29	9.14	82.57	14.41
	AB (45 a 80)	7.47	1.06	0.589	0.471	6.41	14.19	7.88	6.31	85.81	2.75
	B ₁ (80 a 130)	8.16	0.422	0.415	0.007	7.74	5.17	5.09	0.09	94.85	1.01
	B ₂ (130 a 220)	8.27	0.335	0.272	0.063	7.94	4.05	3.29	0.76	96.00	0.80
209	A (0 a 25)	11.96	9.37	0.405	8.97	2.59	78.34	3.39	75.00	21.66	10.42
	B ₁ (25 a 75)	14.14	4.58	0.413	4.17	9.56	32.39	2.92	29.49	67.61	1.43
	B ₂ (75 a 103)	14.82	4.79	0.429	4.36	10.03	32.32	2.89	29.42	67.68	0.76
	B ₃ (103 a 200)	14.86	3.58	0.475	3.11	11.28	24.09	3.20	20.93	75.91	0.57
	B ₄ (200 a 240)	16.15	3.07	0.448	2.62	13.08	19.00	2.77	16.22	80.99	0.51
69	AB (0 a 30)	11.40	2.54	0.347	2.19	8.86	22.28	3.04	19.21	77.72	5.75
	B (30 a 90)	11.40	2.68	0.356	2.32	8.72	23.51	3.12	20.35	76.49	1.49
	BC (90 a 156)	11.33	4.08	0.358	3.72	7.25	36.01	3.16	32.83	63.99	0.58
400	B ₁ (0 a 15)	17.80	4.22	0.485	3.74	13.58	23.71	2.72	21.01	76.29	9.16
	B ₂ (15 a 30)	16.59	3.50	0.408	3.09	13.09	21.09	2.46	18.63	78.90	1.87
	B ₃ (50 a 75)	18.16	2.75	0.337	2.41	15.41	15.14	1.86	13.27	84.86	0.52
	BC (75 a 100)	16.62	4.22	0.346	3.87	12.40	23.39	2.08	23.29	74.61	0.19

[†] MO = materia orgánica.

resto del material del perfil, denotándose en los horizontes más profundos una alteración menos intensa de los minerales expresada por el alto contenido de hierro silicatado (> 80%) existente en los mismos; sin embargo, en estos horizontes pobres en materia orgánica se resaltan más los tonos rojos y amarillos dados, probablemente, a la asociación de goetita y productos amorfos del hierro, producto cristalizado del hierro característico de ambientes más húmedos y ácidos. Es muy probable que en estas condiciones de acidez y la presencia de altos tenores de aluminio, la goetita tenga un alto grado de sustitución del hierro por el aluminio en sus estructuras (Gaviria y Faivre, 1994) haciéndolas mucho más estables.

El Perfil 209 ocupa una posición inestable y puede estar sujeto a la manifestación de procesos superficiales de empobrecimiento y erosión. Este perfil presenta un alto contenido de hierro total, resaltándose lo homogéneo del material original del suelo. El hierro libre representa hasta 78% del total del suelo, observándose dentro del perfil una evolución normal de la alteración. Las formas del hierro libre predominantes son las cristalizadas, el hierro amorfo alcanza valores menores que 3%. Estas formas, en presencia de bajos tenores de materia orgánica, imparten al suelo una coloración roja uniforme, debido a su asociación con la hematita (Camacho *et al.*, 1979). En este suelo, se alcanzan los mayores valores de saturación por el aluminio por lo que es de esperar que la goetita existente presente un alto grado de sustitución del hierro por el aluminio en las estructuras (Fitzpatrick y Schwertmann, 1982), lo cual las hace más estables en este medio.

El contenido del hierro silicatado revela un proceso de alteración y transformación más avanzado de los minerales primarios, favoreciendo el proceso de rubefacción que impera en el perfil.

El Perfil 69 ocupa una posición inestable en el relieve, además, el cambio de vegetación con la introducción del café ha conducido a la manifestación de la erosión y un empobrecimiento superficial de las reservas orgánicas del suelo. Este perfil, en comparación, tiene menos desarrollo, con presencia de gravas distribuidas a diferentes profundidades y con estadios de alteración variado; sin embargo, existe una rubefacción importante del suelo que le imparte su coloración rojo-amarillenta. En este suelo, además del empobrecimiento superficial originado por la erosión,

se denota el proceso de rejuvenecimiento de los materiales originarios característicos de los Andosoles de esta región volcánica. La rubefacción está dada fundamentalmente por la presencia de la goetita, mineral ferruginoso cristalizado característico de estos ambientes.

El suelo, representado por el Perfil 400, evidencia la manifestación del proceso de erosión, la cual ha provocado la pérdida del horizonte A y, en consecuencia, el empobrecimiento superficial. En este perfil, el contenido y la distribución de las formas del hierro revelan una formación compleja del suelo, inducida por los procesos de aportes de materiales de edades y composición diferentes. Lo anterior lo evidencian las variaciones en el estado del complejo de absorción, así como el contenido del hierro libre y silicatado en sus horizontes.

El contenido y la distribución de las formas del hierro en los suelos estudiados revelan diferencias entre ellas, asociadas con diferentes estados de alteración de los minerales, lo cual resalta la complejidad de formación de los suelos de estas regiones (Etchevers, 1985). Además, tienen una incidencia considerable los procesos degradantes como la erosión, con el consecuente empobrecimiento superficial, así como la reincorporación de materiales de edades diferentes que pueden marcar las diferencias evolutivas de los suelos. No obstante, el contenido y las formas de los sesquióxidos de hierro constituyen un elemento mayor importante para diagnosticar la evolución de los suelos, pudiéndose destacar a través de éstas la presencia de un gradiente de estados evolutivos de los suelos, que se expresa en diferente intensidad el proceso de rubefacción. De acuerdo con lo anterior, se considera la escala evolutiva siguiente: Perfil (209) > 74 > 69 > 400 > 90. En estas condiciones de meseta de montaña, se resalta como aspecto relevante que independientemente de la altitud y posición de los suelos, lo que más ha incidido en su evolución pedogenética es la homogeneidad de los materiales formadores del suelo. En este sentido, el suelo de mayor grado de alteración puede catalogarse como Ferrasol ródico y el resto, debido a la renovación de los materiales formadores e inestabilidad por la posición que ocupan, se le cataloga como Andosol con proceso de rubefacción avanzado, en los cuales ya el hierro comienza a manifestar su influencia e imparte la coloración rojiza al suelo, en función del comportamiento de las condiciones pedoclimáticas predominantes.

CONCLUSIONES

- En los suelos estudiados se constató que las formas y el contenido de los sesquióxidos de hierro están asociados con el grado de alteración de los mismos y su evolución, manifestándose una marcada influencia en su distribución con los procesos de empobrecimiento superficial preponderantes y el rejuvenecimiento característico de materiales de estas regiones volcánicas.
- La acidez que caracteriza a estos suelos, unido a las condiciones climáticas a que están expuestos, favorece la evolución de las formas cristalizadas del hierro hacia la goetita, mineral ferruginoso fundamental que imparte la rubefacción a los suelos.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Santelises, A., J.D. Etchevers-Barra y J.Z. Castellanos-Ramos. 1987. Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, estado de México.
- Aguilera, N. y M.L. Jackson. 1953. Iron oxide removal from soil and clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 17: 359-364.
- Blume, H.P. y U. Schwertmann. 1969. Genetic evaluation of profile distribution of iron, aluminium and manganese oxides. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33: 438-444.
- Camacho, E., D. Bosh y J.P. Rodríguez. 1978. Diferenciación de los suelos de una catena de región ferralítica. *Ciencias de la Agricultura* 2: 77-88.
- Camacho-Díaz, E., D. Bosh y J. Ruiz. 1979. Contenido y distribución del hierro en los suelos ferralíticos de Cuba. *Ciencias de la Agricultura* 5: 73-87.
- Cuanalo-Cerda, H., O. Trejo E., S. Ocampo y C.A. Ortiz. 1989. Provincias, regiones y subregiones terrestres de México. Colegio de Postgraduado. Chapingo, estado de México.
- Duchaufour, Ph. y B. Souchier. 1978. Roles of iron and clay in genesis of acid soils under a humid temperate climate. *Geoderma* 20: 15-26.
- Etchevers, J.D. 1985. Un cuarto de siglo de investigaciones en los suelos volcánicos de México. Serie cuadernos de Edafología 1. Colegio de Postgraduados. Chapingo, estado de México.
- Fitzpatrick, R.W. y U. Schwertmann. 1982. Al-substituted Goethite an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. *Geoderma* 27: 335-347.
- Gaviria, S. y P. Faivre. 1994. Mobilisation, ségrégation précoce du fer conduisant au cuirassement et a l'allitisation en milieu ferralitique hydromorphe. L'exemple des llanos Orientales de Colombie. pp. 196-203. *In: Vol. VIa. Trans. Congreso mundial de la Ciencia del Suelo. Acapulco México.*
- Keller, C. y F.L. Domergue. 1996. Soluble and particulate transfers of Cu, Cd, Al, Fe and some major elements in gravitational water of a podzol. *Geoderma* 71(3/4): 263-274.
- Miehlich, G. 1978. Andisoles de la Sierra Nevada. pp. 48-58. *In: Werner, G., H. Aeppli, G. Miehlich y E. Schönhals (eds.). Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores. Complemento Comunicaciones, Proyecto Puebla-Tlaxcala 6. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla, México.*
- Miehlich, G. 1980. Los suelos de la Sierra Nevada de México. Suplemento Comunicaciones Proyecto Puebla-Tlaxcala 7. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla, México.
- Oades, J.M. 1963. The nature and distribution of iron compounds in soils. *Soils Fert.* 26: 69-80.
- Olmedo, J.L. 1971. Algunos aspectos de la distribución y formas del hierro en los suelos. *An. Edafol. Agrobiol.* 30: 441-632.
- Paterson, E., B.A. Goodman y V.C. Farmer. 1991. The chemistry of aluminium, iron and manganese oxides in acid soils. pp. 97-124. *In: Ulrich, B. y M.E. Sumner (eds.). Soil acidity. Springer Verlag. Berlin-Heidelberg, Germany.*
- Prost, R., G.J. Ross y C. Wang. 1989. Effect of crystalline iron oxides on development and classification of podzol soil in western Labrador, Newfoundland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 870-875.
- Rodríguez, T. y M. Adams. 1996. Efecto del encalado y del fósforo sobre las fracciones del zinc en suelos Ultisoles y Oxisoles de los llanos de Monagas. *Agronomía Tropical* 47: 43-60.
- Ross, G.J. 1980. Mineralogical, physical and chemical characteristics of amorphous constituents in some podzolic soil from British Colombia. *Can. J. Soil Sci.* 60: 31-43.
- Schwertmann, U. 1964. The differentiation of iron oxides in soils by extraction with ammonium oxalate solution. *Z. Pflanz. Bodenk* 105: 194-202.
- Schwertmann, U., W.R. Fischer y R.M. Taylor. 1974. New aspect of iron oxides formations in soil. pp. 237-249. *In: X Congreso Internacional Soil Science, Moscú, Vol.6 (sec.1)*
- Segalen, P. 1969. Contribution a la connaissance de la couleur des sols a sesquioxides de la zone Intertropicale: Sols jaunes et sols rouges. *Cahier ORSTOM, Ser. Pedalogie* 7: 225-236.
- Sierra, C., F.J. Martínez, A. Roca, F. Mamani e I. Saura. 2000. Análisis de la materia orgánica, hierro y manganeso en los suelos del karst Sierra Gorda-Zafarraya (Granada-España). *Edafología* 7-3: 65-73.
- Singh, B. y J. Gilkes. 1990. Properties and distribution of iron oxides and their association with minor elements in the soils of South-Western Australia. *Soil Sci. Plant Nutr.* 41: 165-181.
- Tinker, P.B. 1986. Trace elements in arable agriculture. *J. Soil Sci.* 37: 587-601.
- Vázquez-Alarcón, A. 1997. Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Vizier, J.F. 1971. Étude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes. *Cahier ORSTOM, ser. Pedalogie* 9: 373.
- Walkley, A. y C.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.

CARACTERIZACIÓN INORGÁNICA DEL AGUA DEL RÍO TEXCOCO, ENTRE ÉPOCAS DEL AÑO Y AÑOS

Inorganic Characterization of Water in the Texcoco River, Among Seasons and Years

Hermilio Navarro-Garza^{1‡} y Ma. Antonia Pérez-Olvera¹

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar y caracterizar el agua del río Texcoco. Cada muestreo se realizó en 10 sitios en el cauce del río, entre altitudes de 2500 a 2240 m. La periodicidad de los muestreos fue trimestral, se realizaron cuatro muestreos al año, durante tres años. Los parámetros de diagnóstico y métodos utilizados fueron: para potasio, sodio, magnesio y calcio el método interno MI-AM-011 (absorción atómica); fosfatos con MI-FQUAR-012, cloruros NOM-AA-073-1981, conductividad eléctrica (CE) y nitrógeno de nitratos NOM-AA-93-1984 y NOM-AA-79-1986, pH NOM-AA-08-1980. Las concentraciones promedio de tres años, considerando calcio, magnesio, potasio, sodio, cloro, nitratos y conductividad eléctrica, son bajas, no obstante, las concentraciones de sodio y CE son próximas a concentraciones medias. Las concentraciones de sodio durante los Años 2 y 3 son medias. Las concentraciones de fosfatos durante los tres años son altas. La CE durante los Años 1 y 3 se encuentra en valores medios, al igual que las concentraciones de sodio y CE en los Muestreos 1 y 4. La concentración de fosfatos, entre muestreos determina altas concentraciones durante dos épocas del año. La comparación estadística entre años para calcio, magnesio y potasio dictamina concentraciones iguales estadísticamente. El sodio presentó valores estadísticamente iguales para los Años 3 y 2. Las concentraciones anuales de cloruros, fosfatos y nitratos no mostraron diferencia estadística. La concentración de sodio y conductividad eléctrica, entre muestreos durante el año se han evaluado como valores medios, durante los Muestreos 1 y 4 que coinciden con la época de sequía durante el año.

Palabras clave: Aguas negras, calidad del agua, contaminación.

SUMMARY

The objective of this study was to evaluate the inorganic parameters in the water of the Texcoco river. Sampling took place at 10 sites along the watershed (between 2500 and 2240 m above sea level) during the four seasons of the year for three years, with repetitions. The diagnostic parameters and methods used were, for potassium, sodium, magnesium, and calcium, the internal method MI-AM-011 (atomic absorption); phosphates with MI-FQUAR-012, chlorides NOM-AA-073-1981, electrical conductivity and nitrogen of nitrates NOM-AA-93-1984 and NOM-AA-79-1986, pH NOM-AA-08-1980. The three-year average concentrations of calcium, magnesium, potassium, sodium, chlorine, nitrates, and electrical conductivity were low. However, the concentrations of sodium and electrical conductivity were close to medium quality. The concentrations of sodium during Years 2 and 3 were classified as medium. The concentration of phosphates was high. Electrical conductivity during Years 1 and 3 were classified as medium. The concentrations of sodium and electrical conductivity in Seasons 1 and 4 grade a medium quality. The concentration of phosphates during the four seasons and three years were classified as high. Variability of cations and anions at different times of the year was an almost generalized behavior and statistically significant.

Index words: Waste water, water quality, contamination.

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

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

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la cuenca del Valle de México ha experimentado transformaciones sustantivas ocasionadas por el uso intensivo de sus recursos. El crecimiento demográfico y económico del

Valle de México ha sido la causa a una creciente demanda de servicios de urbanización, entre ellos un persistente cambio de uso del suelo y demanda creciente de agua potable para consumo humano, la cual se satisface a costa de la sustentabilidad de los agroecosistemas de la peri-urbanidad rural.

Los municipios que se han integrado en los últimos años a la región urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México han mostrado insuficiencias en el ordenamiento e impactos negativos en su calidad ambiental. Por esta razón, en la mayoría de los municipios conurbanos y periurbanos hacen falta recursos para la planificación y el desarrollo urbano, en particular el descuido y la negligencia social se prospectan crecientemente ante la ausencia de una política realista y operativa para solucionar la irracional gestión y uso de las cuencas de los ríos. En dicha problemática tienen una participación y contribución importante las colectividades, los poblados y sus territorios agrarios, así como diversas empresas y servicios ubicados funcional y ambientalmente dentro de las cuencas, es decir, diversos usuarios territoriales que consciente o inconscientemente utilizan los cauces naturales como drenajes y depósitos de basuras y escombros diversos. En consecuencia, existe una creciente contaminación de las aguas de los ríos por diversas fuentes inorgánicas, bacteriológicas y orgánicas. Al respecto, Tejeda (1991) mencionó que las aguas residuales domésticas tienen un valor agregado para el agricultor por su riqueza en nutrimentos, pero también tienen una carga de riesgo en forma de contaminantes, como metales pesados, compuestos orgánicos, detergentes, organismos biológicos (bacterias protozoarios y helmintos), y predominan los químicos cuando las aguas domésticas están mezcladas con aguas residuales industriales.

En la región oriente del Valle de México es de conocimiento común que las cuencas y sus cauces se han transformado en grandes afluentes de aguas residuales o “negras”, las cuales confluyen hacia la planicie del Valle de México, donde son utilizadas con fines agrícolas y sus excedentes continúan su curso hacia el estado de Hidalgo.

En la década de los ochenta, se señaló la necesidad de realizar investigaciones específicas sobre los posibles problemas sanitarios ocasionados por el uso agrícola de aguas residuales, así como los consecuentes cambios tecnológicos para el tratamiento de las aguas residuales, entre las cuales aquellas que específicamente se usan en el riego

agrícola. Años más tarde, se avanzaron supuestos epidemiológicos que señalaban una relación directa entre el consumo de alimentos regados con aguas residuales y las enfermedades infecciosas gastrointestinales.

Méndez *et al.* (2000), con base en un estudio realizado en el Valle de Atlixco, Puebla, señalaron que la contaminación de los suelos por metales pesados se ha incrementado considerablemente, como consecuencia del empleo intensivo de agroquímicos y del riego con aguas residuales. Esta problemática ocurre, en general, en las zonas agrícolas cercanas a las ciudades, donde las aguas negras son utilizadas con fines agrícolas.

Boon, citado por González-de Tanago y García-de Jalón (1998), mencionó que son muchas las actividades humanas que alteran los componentes de los ecosistemas fluviales y cada vez estas actividades afectan a superficies mayores a grandes distancias desde donde se producen, y señaló como principales actividades humanas que afectan a los sistemas fluviales a nivel intra-cuenca: los cambios de uso del suelo, la urbanización, los drenajes y las vías de infraestructura. El mismo autor identificó como causas de impactos dentro de los ríos: la contaminación orgánica e inorgánica, la abstracción /incorporación de caudales y la explotación de especies nativas.

Las descargas de aguas residuales de empresas de “alto riesgo de degradación ambiental” y de otras fuentes, sin previo tratamiento, se han transformado en un problema generalizado dentro de la zona metropolitana del Valle de México y los estados aledaños. Por citar algunos ejemplos: contaminación en el río Atoyac en el estado de Puebla (Méndez *et al.*, 1996), problemas de contaminación en la región de Atlixco en Puebla (Silva-Gómez *et al.*, 2002), cambios en la calidad del agua de los acuíferos del estado de Guanajuato (Castellanos *et al.*, 2002), contaminación en el valle del Mezquital en el estado de Hidalgo (Velázquez *et al.*, 2002), no menos importantes.

Con base en los análisis de aguas negras realizados en la cuenca del Valle de México y en la región del Mezquital, a medida que han avanzado los años y los estudios, se ha hecho mayor hincapié en los daños que puede ocasionar el uso de aguas residuales en los suelos, cultivos, acuíferos e incluso en la salud.

En el Valle de México es reconocida la problemática de deterioro ambiental, en la actualidad de gran importancia por los problemas emergentes y

crecientes en el abasto del agua, la cual es cada vez más compleja ante la falta de iniciativas para conocer la magnitud de los problemas y las consecuentes alternativas para su solución.

De acuerdo con Belmont y Metcalfe (2003), con base en una serie de muestreos realizados a lo largo del cauce de la cuenca en agosto de 1997, el contenido promedio de nitratos entre los sitios de parte media y baja de la cuenca es superior al límite establecido como permisible de 30 mg L^{-1} . Con base en los resultados de esa investigación, se ha estimado en términos comparativos que el contenido promedio de la parte media es 83% superior al límite permisible y el valor promedio de la parte baja es superior en 248%. En consecuencia, la investigación ilustra la contaminación creciente del río Texcoco y la degradación creciente de su calidad hacia la parte media y la baja del cauce.

Por su parte, el plan de Desarrollo Municipal de Texcoco (2003-2005), menciona que las aguas residuales generadas en el municipio contienen elementos nocivos, como: metales pesados, solventes, ácidos, grasas y aceites.

La falta de iniciativas territoriales para promover y realizar la gestión integral y sustentable del agua, entre otras opciones erróneas, ha implicado el uso de los cauces naturales para la conducción de las aguas residuales, ocasionando su contaminación creciente durante su recorrido aguas abajo, así como la degradación ambiental de la cuenca.

Tal problemática justificó la importancia y pertinencia de la investigación, la cual se desarrolló en la cuenca del río Texcoco, por considerarla sensiblemente representativa de las 11 cuencas del oriente del Valle de México, con excepción del río La Compañía, considerando la gran amplitud de éste en su cobertura territorial.

En consecuencia, se ha considerado que las insuficientes evidencias documentadas sobre la contaminación del agua en las cuencas del Este del Valle de México, así como la problemática probable ocasionada por el uso agrícola de las mismas, han justificado la realización de una caracterización del agua del río Texcoco.

El objetivo principal del estudio fue conocer el comportamiento de los parámetros: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , PO_4^{3-} , NO_3^- , conductividad eléctrica y pH, entre sitios del río Texcoco, durante diferentes épocas del año y entre años.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la cuenca del río Texcoco (Figura 1), la selección de los sitios de muestreo fue a juicio personal para ayudarse a decidir entre los poblados y sus descargas a lo largo del cauce, la ubicación de los sitios de muestreo, así como de tipo referencial para ayudarse a precisar la identificación de los sitios y la realización de los muestreos en los mismos sitios. Cada tres meses se realizó el muestreo de agua en 10 sitios a lo largo del



Figura 1. El cauce del río Texcoco y los sitios de muestreo.

cauce, al año se realizaron cuatro muestreos similares y este protocolo de muestreo se realizó durante tres años.

El primer sitio de muestreo se seleccionó en la parte alta de la cuenca, a una altitud de poco más de 2500 m, considerándolo como punto de referencia antes de **las primeras fuentes de contaminación** por drenajes y otras causas, lo cual ocurre a partir del primer poblado (San Pablo Ixayoc). La selección de los nueve sitios siguientes fue progresivamente aguas abajo a partir del primer sitio. Los 10 sitios se ubicaron considerando la estratificación espacial del cauce de la cuenca y el monitoreo de las contaminaciones ocasionadas por las siete comunidades (San Pablo Ixayoc, San Dieguito Xochimancan, Nativitas, San Diego, La Trinidad, Parte de Texcoco y San Felipe), ubicadas en el área de la cuenca, las cuales, en mayor o menor grado, contaminan el cauce de la cuenca con los desagües de los drenajes y con los desechos sólidos depositados en él. El primer muestreo se inició el 8 de abril de 1999, el segundo y tercero se realizaron en julio y octubre de 1999 y el Muestreo 4 se realizó en enero de 2000. Durante los dos años siguientes, los muestreos se realizaron durante los mismos meses. El último muestreo se realizó el 24 de enero de 2002. Cada muestreo en los 10 sitios del cauce se consideró como un tratamiento, espaciado trimestralmente.

Como rutina, la toma de muestras se inició entre 7:00 y 8:00 h, se identificaron en el sitio y se depositaban en hieleras para ser transportadas y entregadas entre 14:00 y 16:00 h en el laboratorio.

Las muestras de agua se analizaron mediante los siguientes métodos: para potasio, sodio, magnesio y calcio se utilizó el método interno MI-AM-011 (absorción atómica), fosfato con el MI-FQUAR-012, cloruro de acuerdo con la norma NMX-AA-073-1981, la conductividad eléctrica y nitrógeno de nitratos de acuerdo con las normas respectivas: NOM-AA-93-1984 y NOM-AA-79-1986, el pH según la norma NMX-AA-08-1980, y dureza y bicarbonatos con base en los métodos internos MI-AM-06 y MI-FQAR-015, respectivamente; las unidades de medida fueron en mg L^{-1} , a excepción de la conductividad eléctrica (dS m^{-1}) y pH.

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación de medias se realizó con la Prueba de Tukey a 95%, con el paquete SAS para PC (SAS Institute, 1995). El análisis y el dictamen sobre las concentraciones de los compuestos inorgánicos del

agua se basaron en las especificaciones propuestas por Jones y Wolf (1984).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Muestreos entre Años y Durante el Año

Valor promedio de los parámetros inorgánicos. La primera caracterización de los parámetros se realizó considerando el valor promedio de cada uno, sin distinción de las cuatro épocas del año y sus repeticiones durante los tres años del estudio. El interés de estimar el promedio general consistió en conocer las concentraciones de cada uno de los parámetros, así como la variabilidad de tales concentraciones inorgánicas entre épocas del año y años, considerando la desviación estándar.

En el Cuadro 1 se muestra que las concentraciones de calcio, sodio y magnesio en el agua son bajas (menores que 100, 70 y 50 mg L^{-1} , respectivamente); cabe subrayar que la media del sodio (68.79) está cercana a concentraciones medias (Jones y Wolf, 1984), además de presentar una significativa desviación estándar de 39.29 mg L^{-1} .

La concentración media anual de potasio es baja, de acuerdo con las Normas de Reutilización de aguas que proponen, como límite, 250 mg L^{-1} para su utilización en la producción de productos agrícolas (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 2000).

Las concentraciones de los cloruros y nitratos califican la calidad del agua como buena, considerando, para cloruros, una concentración media en los tres años evaluados de 38.65 mg L^{-1} , siendo menor que lo que establece la referencia para esta clase (141.84 mg L^{-1}) y, para el caso de nitratos,

Cuadro 1. Concentraciones medias (mg L^{-1}) y desviación estándar de los parámetros inorgánicos estudiados.

Variable	Media	Desviación estándar [†]
Ca ²⁺	32.60	17.11
Mg ²⁺	14.18	4.58
Na ⁺	68.79	39.29
K ⁺	22.93	15.30
Cl ⁻	35.68	28.18
PO ₄ ³⁻	26.72	22.18
NO ₃ ⁻	0.56	1.12
CE [‡]	712.37	385.99
pH	7.76	0.27

[†] La desviación estándar se ha incluido para contribuir a documentar con este parámetro los estudios de este tipo. [‡] CE = conductividad eléctrica (dS m^{-1}).

concentraciones menores que 39 mg L^{-1} . Las concentraciones de fosfatos (26.72 mg L^{-1}) son superiores a 19 mg L^{-1} , lo cual, de acuerdo con Jones y Wolf (1984), corresponde a agua con alto contenido de fosfatos.

Por su parte, Fassbender y Bornemisza (1987) mencionaron que valores de conductividad eléctrica entre 0 y 2 mmhos cm^{-1} no tienen efecto significativo en las cosechas de los cultivos. De acuerdo con Jones y Wolf (1984), el valor de conductividad eléctrica es aceptable, considerando que se registró una concentración inferior a 0.75 dS m^{-1} . En términos similares, para el sodio el valor promedio (68.79 mg L^{-1}), con una desviación estándar de 39.29 mg L^{-1} es considerado como concentración baja.

Calidad Inorgánica del Agua entre Años

Cationes y sus concentraciones anuales promedio.

La comparación de promedios anuales del calcio muestra que no existen diferencias significativas entre ellos, por lo tanto son estadísticamente iguales. En términos similares, la comparación de los promedios anuales de magnesio y potasio no presentan diferencia estadística entre los valores promedio por año.

La comparación de medias de las concentraciones anuales de sodio registra el valor mayor en el Año 3, no obstante, estadísticamente es igual al Año 2 y diferente al Año 1, con los valores promedio respectivos de 74.06 , 71.91 y 63.12 mg L^{-1} . Los valores registrados durante los Años 2 y 1 no son diferentes estadísticamente.

Las concentraciones medias anuales de sodio son bajas, por registrar un valor inferior a 70 mg L^{-1} ; sin embargo, considerando la concentración media anual de los Años 3 y 2, la concentración se incrementa y se cataloga como media.

Aniones y sus concentraciones anuales promedio.

Las concentraciones medias anuales de los aniones, cloro, fosfatos y nitratos, no mostraron diferencias estadísticas significativas entre años. No obstante, comparando con el referente propuesto: las concentraciones de los promedios anuales de fosfatos son altas, en los tres años de la evaluación de acuerdo con Jones y Wolf (1984), quienes las establecen para los valores superiores a 19 mg L^{-1} .

Por su parte, se diagnosticaron concentraciones bajas para cloro y nitratos, considerando que para cloro los valores registrados son equivalentes y cercanos a 35.46 mg L^{-1} y la frontera se tiene en 141.84 mg L^{-1} ,

asimismo, las concentraciones de nitratos son bajas por ser inferiores a 39 mg L^{-1} .

Calidad Inorgánica del Agua entre Muestréos durante el Año

Cationes y sus concentraciones promedio entre muestréos del año.

La comparación de los valores promedio del calcio entre muestréos del año presenta diferencias entre los mismos. El promedio mayor se registró para el Muestreo 1 y éste fue estadísticamente igual a los promedios de los Muestréos 3 y 4. En forma similar, los promedios de los Muestréos 3, 4 y 2 no mostraron diferencias; por su parte, la comparación entre los Muestréos 4 y 2 mostró que son iguales estadísticamente (Cuadro 2).

La comparación de los valores promedio de la concentración de magnesio muestra la existencia de diferencias estadísticas entre los muestréos del año. El valor mayor se registró en el Muestreo 3, el cual fue igual estadísticamente a los valores del Muestreo 1; por su parte, los valores promedio de los Muestréos 1, 4 y 2 no mostraron diferencia estadística y, finalmente, la comparación entre los Muestréos 4 y 2 mostró que son iguales estadísticamente (Cuadro 2).

El potasio no presentó diferencias estadísticas significativas entre los valores promedio de los diferentes muestréos del año, de acuerdo con el Cuadro 2.

Finalmente, la comparación de los valores promedio del sodio entre muestréos del año registró marcada diferencia entre las mismas. En particular, el valor del Muestreo 1, el cual constituye el promedio más alto, es estadísticamente igual a los valores de los Muestréos 4 y 3; los valores iguales estadísticamente y menores numéricamente en comparación con el resto se registraron en los Muestréos 3 y 2 (Cuadro 2). Respecto a la clasificación inorgánica del agua, las concentraciones medias de calcio y magnesio entre

Cuadro 2. Comparación de valores de cationes, entre muestréos del año, en aguas de la cuenca del río Texcoco.

M [†]	Ca ²⁺ mg L ⁻¹	M	Mg ²⁺ mg L ⁻¹	M	Na ⁺ mg L ⁻¹
1	36.81 a	3	16.15 a	1	77.1 a
3	33.81 ab	1	14.48 ab	4	73.8 ab
4	31.17 abc	4	13.86 bc	3	65.9 abc
2	29.74 bc	2	12.90 bc	2	62.0 bc

[†] M = número de muestreo. Medias con la misma letra son estadísticamente iguales; Tukey, $\alpha = 0.05$.

muestreos en el año son bajas. Las concentraciones medias en los Muestreos 3 y 2 del año son bajas; sin embargo, las concentraciones de los Muestreos 1 y 4 se consideran como concentraciones medias (Jones y Wolf, 1984). Las concentraciones medias de potasio entre muestreos del año son bajas.

Aniones y sus concentraciones promedio entre muestreos del año. Las concentraciones de cloro entre muestreos del año tienen diferencias entre las mismas, en forma similar a la mayoría de los cationes. El valor de la mayor concentración se registró en el Muestreo 1, el cual no registró diferencia estadística significativa con la concentración registrada en el Muestreo 4. Por su parte, los valores de las concentraciones durante los Muestreos 4, 2 y 3 no mostraron diferencias estadísticas entre sí. Los valores más bajos, correspondientes a los Muestreos 2 y 3, son iguales estadísticamente (Cuadro 3).

La comparación de medias para fosfatos evidencia diferencias entre muestreos. La concentración más alta se registró en el Muestreo 1, siendo estadísticamente igual al Muestreo 3; las concentraciones menores se registraron en los Muestreos 2 y 4, las cuales son estadísticamente iguales entre sí y con el Muestreo 3 (Cuadro 3).

La comparación de medias para nitratos muestra la mayor concentración para los Muestreos 3, 4 y 2, siendo estadísticamente iguales. Las concentraciones menores se registraron en los Muestreos 2 y 1, las cuales son estadísticamente iguales (Cuadro 3).

Finalmente, cabe precisar que durante los cuatro muestreos del año las concentraciones de compuestos inorgánicos son bajas, excepto las altas concentraciones de fosfatos que se registraron, de acuerdo con Jones y Wolf (1984).

En forma complementaria, considerando los estándares planteados en la norma NOM-001-ECOL-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales y, en

Cuadro 3. Comparación de aniones entre muestreos del año, en la cuenca del río Texcoco.

M [†]	Cl ⁻ mg L ⁻¹	M	PO ₄ ⁼ mg L ⁻¹	M	NO ₃ ⁻ mg L ⁻¹
1	47.43 a	1	33.60 a	3	1.19 a
4	36.54 ab	3	24.94 ab	4	0.64 ab
2	30.33 bc	4	23.74 bc	2	0.33 abc
3	29.55 bc	2	22.86 bc	1	0.29 bc

[†]M = número de muestreo. Medias con la misma letra son estadísticamente iguales; Tukey, $\alpha = 0.05$.

específico, para contaminantes básicos, se observa que el valor del Muestreo 1 del fósforo (fosfatos) es superior al límite establecido en la norma para fósforo total. El dictamen anterior es indicativo sólo considerando que dicha norma establece para mediciones diarias 30 mg L⁻¹ de fósforo total, como contaminante básico de las descargas de aguas, con fines de uso de riego agrícola; además, es relativo considerando que la investigación determinó fosfatos y la norma se refiere al fósforo total, por lo cual los valores de los otros muestreos son mayores y podrían superar el límite establecido por la norma.

Valores entre Años y Épocas para la Conductividad Eléctrica

La comparación de los valores promedio entre años para la conductividad eléctrica muestra que no existe diferencia estadística entre ellos.

En relación con la clasificación inorgánica del agua, los valores anuales de la conductividad eléctrica ubican al agua en el Año 2 con conductividad baja y, en los Años 1 y 3, con concentraciones medias, teniendo en cuenta como valores de esta clase entre 0.75 a 3.0 dS m⁻¹ (Jones y Wolf, 1984).

Respecto a la variabilidad de la conductividad eléctrica entre muestreos del año, los valores mayores se registraron en los Muestreos 4 y 1, en contraparte, los valores menores fueron en los Muestreos 3 y 2, los cuales constituyen grupos de medias iguales entre sí (Cuadro 4).

Cabe añadir que la conductividad eléctrica, por ser en cierta forma una variable sintética de otros parámetros estudiados, integra de manera más clara la existencia de concentraciones de sales del agua del río Texcoco en las épocas del año.

De acuerdo con la clasificación de Jones y Wolf (1984), los valores de la conductividad eléctrica en los muestreos del año son diferentes, considerando que los Muestreos 2 y 3 (realizados durante la época de

Cuadro 4. Comparación de medias para conductividad eléctrica entre épocas del año, cuenca del río Texcoco.

Época	Muestreo	Conductividad eléctrica dS m ⁻¹
Sequía	4	824.76 a
Sequía	1	780.58 a
Lluvias	3	692.27 b
Lluvias	2	617.82 b

Medias con la misma letra son estadísticamente iguales; Tukey, $\alpha = 0.05$.

lluvias) se clasifican como aguas con concentraciones menores que 0.75 dS m^{-1} y los Muestréos 1 y 4 (realizados durante la época de sequía) se clasifican como aguas de concentración media (Figura 2).

Con el propósito de analizar y caracterizar la variabilidad temporal de las concentraciones, cabe precisar que los Muestréos 1 y 4 se realizaron en enero y abril, los cuales se han considerado como meses comprendidos en la época de sequía; a diferencia de los Muestréos 2 y 3, los cuales se realizaron, respectivamente, en julio y octubre, y se considera que se encuentran en la época de lluvias.

En relación con el pH se registraron los siguientes comportamientos: entre años la comparación de medias muestra que existe diferencia estadística entre el Año 1 y los Años 2 y 3, siendo el Año 1 el que presenta el valor mayor; por otra parte, los valores de los Años 2 y 3 son iguales estadísticamente.

Entre épocas del año la prueba de comparación de medias destaca que los valores mayores se registraron en las Épocas 2, 1 y 3, los cuales son iguales estadísticamente. Por su parte, los valores menores se obtuvieron en las Épocas 1, 3 y 4, todos iguales estadísticamente.

CONCLUSIONES

- Las concentraciones promedio durante los tres años de monitoreo han sido estimadas como concentraciones bajas, considerando los valores registrados para calcio, magnesio, potasio, sodio, cloro, nitratos y conductividad eléctrica. Sin embargo, los valores promedio para sodio y conductividad eléctrica son próximos a las concentraciones medias. La concentración promedio de fosfatos, durante los tres años, ha sido la única estimada como concentración alta.

- Las concentraciones de sodio durante los Años 2 y 3 son consideradas medias. Los valores de la CE para los Años 1 y 3 la clasifican como media. Las concentraciones de fosfatos durante los tres años han sido catalogadas como altas.

- La concentración de sodio y conductividad eléctrica, entre muestreos del año ha sido evaluada como concentración media, durante los Muestréos 1 y 4 (época de sequía). La concentración de fosfatos entre muestreos determina que se registraron altas concentraciones, durante los cuatro muestreos del año y, en consecuencia, durante las dos épocas del año.

- Los resultados de la investigación y las referencias para su interpretación sugieren que la cuantificación de los compuestos en forma inorgánica, en estudios similares debería de realizarse para permitir conocer las concentraciones totales, con las cuales se tendrían más elementos para el análisis, dictamen integral y, en su caso, la toma de decisiones más pertinente para la intervención.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Calidad de Agua-Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, en particular a la QFB Beatriz Santamaría y a los Biólogos Leoncio y Paulino.

Al MC. Diego Flores, Agroecología-Colegio de Postgraduados por la cooperación en los muestreos de campo.

LITERATURA CITADA

Belmont, M.A. y C.D. Metcalfe. 2003. Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia eathiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, COD and nonylphenol ethoxylate surfactants. A laboratory-scale study. Ecol. Eng. 21(4-5): 233-247.



Figura 2. Conductividad eléctrica (dS m^{-1}) durante diferentes fechas de muestreo, en agua de la cuenca del río Texcoco (el número corresponde a las fechas de muestreo).

- Castellanos, J.Z., A. Ortega-Guerrero, O.A. Grajeda, A. Vázquez-Alarcón, S. Villalobos, J.J. Muñoz-Ramos, B. Zamudio, J.G. Martínez, B. Hurtado, P. Vargas y S.A. Enriquez. 2002. Changes in the quality of groundwater for agricultural use in Guanajuato. *Terra* 20: 161-170.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. 2000. Normas de reutilización de aguas en el Distrito Federal. México, D.F.
- Fassbender, W.H. y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- González de Tenago del R., M y L.D. García de Jalón. 1998. Restauración de ríos y riveras. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Jones, B.J. y B. Wolf 1984. Manual soil testing procedure using modified (Wolf) Morgan extracting reagent. Benton Laboratories. Athens, GA.
- Méndez-García, T., L. Rodríguez-Domínguez y S. Palacios-Mayorga. 1996. Niveles de contaminación de las aguas del río Atoyac, Estado de Puebla, por metales pesados, boro, grasas y aceites. *Terra* 14: 137-149.
- Méndez-García, T., L. Rodríguez-Domínguez y S. Palacios-Mayorga. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra* 18: 277-288.
- NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- Presidencia Municipal de Texcoco. 2003. Plan de desarrollo municipal de Texcoco 2003-2005. Texcoco, estado de México.
- SAS Institute, Inc. 1995. Paquete para PC. Cary, NC.
- Silva-Gómez, S.E., A. Muñoz-Orozco, M.L. De la Isla-de Bauer y S. Infante-Gil. 2002. Contaminación ambiental en la región de Atlixco: 1. Agua. *Terra* 20: 243-251.
- Tejeda, C. 1991. El riego con aguas residuales en México: efectos en la salud y propuesta de soluciones técnicas. *Ingeniería Ambiental* 4(10): 6-15.
- Velázquez-Machuca, M.A., M. Ortega-Escobar, A. Martínez-Garza, J. Kohashi-Shibata y N. García-Calderón. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del valle del Mezquital, Hidalgo. México. *Terra* 20: 459-464.

DESARROLLO DE UN SISTEMA GENERADOR DE MODELOS ALTIMÉTRICOS PARA LA REPÚBLICA MEXICANA

Development of a Generating System of Altimetric Models for the Mexican Republic

Felipe J.A. Pedraza-Oropeza¹, Enrique Mejía-Saenz^{1‡}, Baltasar Cuevas-Renaud¹,
Adolfo Exebio-García¹ y José Luis Oropeza-Mota²

RESUMEN

La finalidad del presente trabajo es desarrollar un sistema de cómputo que permita generar modelos digitales de terreno, a partir de la información producida por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), específicamente mediante sus Geomodelos de Altimetría del Territorio Nacional (GEMA), a escala 1:250 000, los cuales son una valiosa fuente de información para cualquier trabajo relacionado con la percepción remota y los sistemas de información geográfica. La prioridad número uno de este trabajo fue la generación de un programa de cómputo que facilite la explotación de la base de datos, sin necesidad de conocer la estructura interna de la misma. El sistema generado ha mostrado un excelente desempeño en el manejo de la malla virtual de más de 875 millones de elevaciones de la base de datos, por lo que ya se está considerando incluir otras bases de datos similares, como los Modelos Digitales de Elevación, a escala 1:50 000, de INEGI y las bases de datos topográficas, con cobertura mundial, disponibles a la fecha.

Palabras clave: *modelos digitales de terreno, bases de datos topográficas, sistema de información geográfica.*

SUMMARY

The purpose of this work was to develop a computational system that permits the generation of digital terrain models, or altimetric models, using information produced by the Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), specifically the altimetric models at a scale of

1:250 000 (GEMA), which are a valuable source of information for any work related to remote sensing and geographical information systems. The main priority of this work was the generation of a software program that facilitates the use of the data base, without having to know its internal structure. The generated system has shown excellent performance in the management of more than 875 millions virtual elevations of this data base. For this reason, it is considered to include other similar data bases, such as the digital elevation models at a scale of 1:50 000 of INEGI, and topographic data bases with a worldwide cover, available up to date.

Index words: *digital terrain models, topographic databases, geographical information systems.*

INTRODUCCIÓN

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se define como un manejador de bases de datos especializado, capaz de manejar datos geográficos, los cuales pueden ser representados gráficamente.

Estos sistemas son una herramienta imprescindible para el estudio y para la cuantificación de los recursos naturales, en general, y para la caracterización del medio físico, en particular, por lo que han llegado a ser tan necesarios como los procesadores de texto y las hojas electrónicas.

Un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una estructura numérica de valores x , y , y z que representa una porción de la superficie terrestre, lo que lo convierte en un caso particular de los Modelos Digitales de Elevación (MDE), los cuales pueden representar la distribución espacial de cualquier variable cuantitativa y continua.

El MDT es un elemento fundamental de los SIG, ya que complementa la información en dos dimensiones, como las imágenes de satélite y las fotografías aéreas, y permite, de esta manera, una representación y análisis de la información geográfica en tres dimensiones.

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

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

Existen dos tipos de MDT. El más simple y, por lo tanto, más fácil de procesar, es la malla regular, en la que las elevaciones se encuentran en los vértices de una matriz de renglones y columnas equidistantes, aunque no necesariamente la separación entre renglones tiene que ser igual a la separación entre columnas, esto es lo más común. El otro tipo de MDT es la malla irregular, en la cual las elevaciones se encuentran en los vértices de una red irregular de triángulos (Triangulated Irregular Network o TIN). Este tipo de malla tiene la ventaja de permitir disminuir la densidad de puntos en las zonas planas, haciendo un uso más eficiente de la memoria, pero su procesamiento es más complejo, por lo que los SIG's, por lo general, no trabajan con este tipo de MDT's, o bien, sólo permiten un número reducido de operaciones con ellos.

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) produce dos tipos de datos altimétricos para la República Mexicana: los Modelos Digitales de Terreno, escala 1:50 000, y los Geomodelos de Altimetría del Territorio Nacional, a escala 1:250 000 (GEMA). Los primeros son mallas regulares a cada 50 m en proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) y se venden en archivos que cubren 15' de latitud por 20' de longitud, por lo que se requiere de 2400 modelos para abarcar a todo el país, y de los cuales sólo existe 50%. Estos modelos constan de un archivo de elevaciones y otro de documentación, por lo que es muy fácil importarlos a cualquier SIG. Los segundos son mallas regulares a cada 3 s de arco, aproximadamente 90 m, y se encuentran en 255 archivos (Figura 1) que cubren completamente la zona continental y las islas más importantes de México. En estos archivos, las elevaciones se encuentran compactadas y, por lo tanto, no es posible importarlas de manera directa a ningún SIG, ya que se requiere de un proceso previo de conversión, que es una de las funciones del sistema a desarrollar.

Joly (1988) mencionó que un modelo es una representación simplificada de la realidad, en la que aparecen algunas de sus propiedades.

Ríos (1995) señaló que un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar, de forma simple y comprensible, una porción de la realidad empírica.

Palacios (1998) desarrolló un programa que permite la extracción de información de GEMA al cual denominó *ExtracGEMA*, el cual, además, convierte las coordenadas geográficas originales

(latitud y longitud) a metros en proyección UTM, ya sea con el Datum Norteamericano de 1927 (NAD27), el cual se basa en el elipsoide Clark de 1866 y es el más utilizado por la cartografía de INEGI, o con el Datum WGS84 que está ganando terreno por ser más preciso que el NAD27.

Pedraza (1999) desarrolló un procedimiento para generar capas vectoriales de puntos en ArcView, utilizando *ExtracGEMA*. El mayor problema de este procedimiento es que se basa en el programa Idrisi para realizar algunas conversiones, y la versión con que se contaba en esa fecha sólo permitía generar capas de máximo 30 000 puntos, lo cual es insuficiente.

Sin embargo, el manejo de la información de INEGI para obtener Modelos de Elevación Digital, en los trabajos antes descritos, presenta una serie de inconvenientes, como: el tiempo considerable de procesamiento, el requerir conocer la estructura interna de los datos, el funcionar en ambiente operativo obsoleto, así como el reducido tamaño de los archivos que pueden ser manejados.

Por todo lo anterior, se consideró importante realizar el presente trabajo cuyo objetivo es desarrollar un sistema de cómputo con una interfase amigable que facilite la generación de modelos digitales de elevación, también llamados modelos altimétricos, de cualquier parte de la República Mexicana, con la hipótesis de que los algoritmos propuestos permitirán un procesamiento ágil y eficiente de la información disponible en INEGI, así como su utilización por usuarios que no son expertos en la materia mediante una interfase amigable en ambiente Windows. Así, se considera que esta herramienta puede generalizar la utilización de este tipo de modelos en los sectores económicos y educativos de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del sistema, se utilizaron los siguientes programas y datos:

1. Archivos de GEMA.
2. Lenguaje de programación Delphi, Versión 5.0.
3. Programa Microsoft Office.
4. Módulo básico de ArcView 3.0.
5. Programa Idrisi para Windows, Versión 2.0 (16 bits).
6. Programa Idrisi32 para Windows (32 bits).
7. Programa Surfer, Versión 6.0 ó superior.

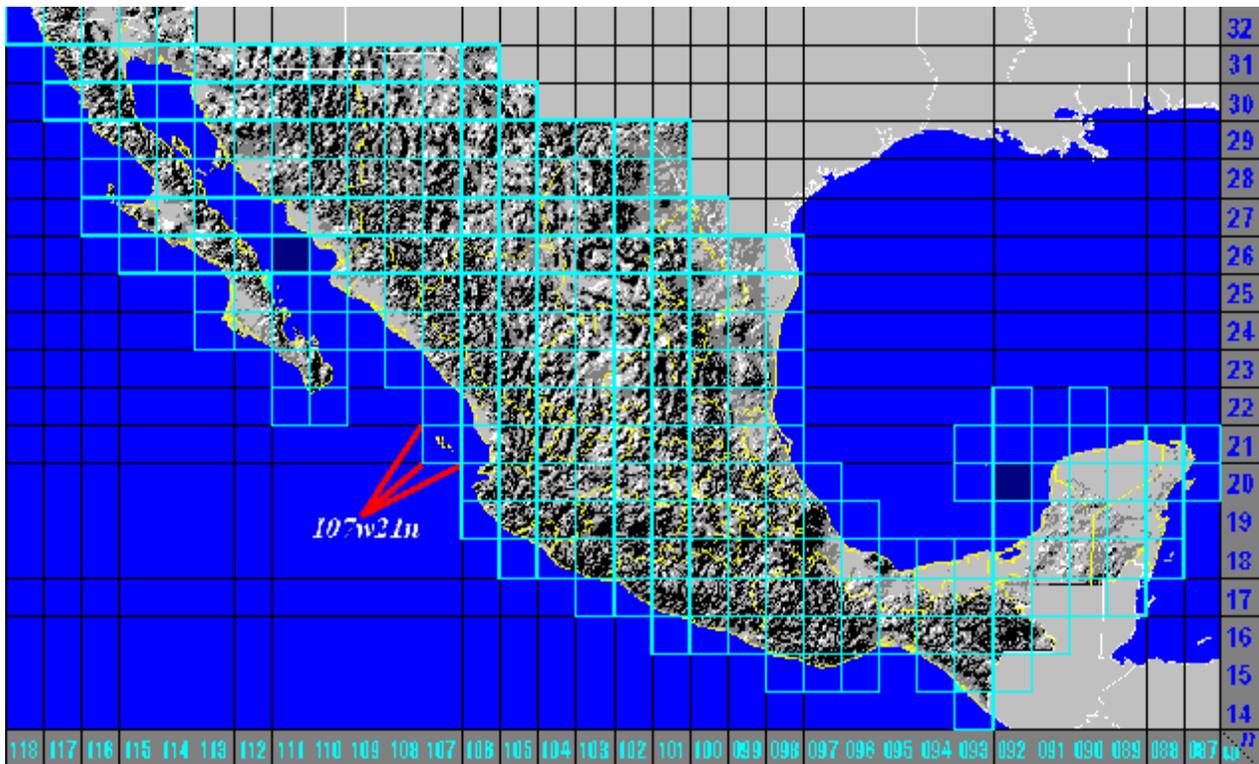


Figura 1. Localización de 255 archivos de GEMA.

8. Programa para proteger software mediante llave física

y el siguiente equipo de cómputo:

1. Computadora personal con procesador Pentium.
2. Impresora.
3. Llave física.

El sistema debe generar los modelos altimétricos directamente en los formatos utilizados por los sistemas de información geográfica más utilizados, por lo que se incluyeron los formatos:

1. Formato BMP. Formato bitmap de Windows: son archivos en blanco y negro, en los cuales las elevaciones menores que 1 m aparecen en color blanco y las demás en color negro, lo cual es muy útil para vectorizar, de manera automática, los contornos de las costas e islas.

2. Formato CSV. El formato CSV (Valores separados por comas) en una matriz de tres columnas (latitud, longitud y altitud) y tantos renglones como tenga el modelo. Este formato puede leerse directamente en una gran cantidad de aplicaciones e incluso hojas electrónicas, lo cual le da gran versatilidad, ya que puede funcionar como un formato de procesamiento o

simplemente de impresión de los datos (Murray y VanRyper, 1994).

3. Formato GRID. Este formato es utilizado por el programa Surfer, el cual en un principio estaba enfocado a la topografía, pero en sus versiones más recientes se incluyen muchas funciones para el manejo de información geográfica, aunque hasta el momento carece de una base de datos por lo que no se le puede considerar un Sistema de Información Geográfica completo. Este formato consta de un solo archivo con terminación *grd* (Golden Software, 1997).

4. Formato IMG. Este formato es utilizado por el programa Idrisi para Windows en su versión de 16 bits y consta de dos elementos: un archivo tipo *img*, el cual contiene las elevaciones y un archivo tipo *doc*, en el que se encuentran las propiedades de la imagen, como: el tipo de datos, el tipo de archivo, el número de renglones y columnas, el sistema de referencia y las unidades utilizadas (Clark Labs, 1997).

5. Formato RASTER. Este formato es utilizado por el programa Idrisi para Windows en su versión de 32 bits y consta de dos elementos: un archivo tipo *rst*,

el cual contiene las elevaciones; y un archivo tipo *rdc* (raster documentation) en el que se encuentran las propiedades de la imagen, como: el tipo de datos, el tipo de archivo, el número de renglones y columnas, el sistema de referencia y las unidades utilizadas (Clark Labs, 1997).

6. Formato SHAPE. Este formato es utilizado por el programa ArcView y consta de tres partes: un archivo de tipo *shp*, que contiene la información básica de los puntos, como su descripción y sus coordenadas X y Y; un archivo tipo *shx*, que contiene un índice que agiliza la búsqueda de cualquier punto; y, finalmente, una base de datos en formato *dbf*, en la cual se almacenan los atributos relacionados con cada punto y que, en este caso, son un identificador secuencial, ID, y su elevación, Alt (ESRI, 1993, 1996, 1998). Para lograr lo anterior se desarrollaron las siguientes actividades:

1. Descifrar el formato en que se presentan los archivos originales de INEGI, ya que, como se mencionó anteriormente, los datos se encuentran compactados y su estructura exacta no viene documentada en el producto.

2. Implementar una biblioteca para la generación de archivos vectoriales de puntos de ArcView que es uno de los formatos de salida del sistema; para lo anterior, se utilizó la descripción técnica de los archivos Shape, publicada por el Environmental Systems Research Institute (ESRI) en julio de 1998.

3. Descifrar el formato en que se encuentran los archivos de Idrisi, que se utilizan para realizar el análisis de las elevaciones.

4. Descifrar el formato en que se encuentran los archivos de mallas de elevaciones del programa Surfer, el cual, aunque propiamente no es un Sistema de Información Geográfica, realiza muchas operaciones básicas con mapas y es muy rápido y fácil de manejar, por lo que su uso se ha extendido rápidamente.

5. Diseñar una interfase intuitiva y amigable que permita a un usuario con conocimientos mínimos de computación seleccionar interactivamente el área de su interés y generar un modelo altimétrico directamente en el formato requerido, evitándole así la necesidad de realizar conversiones intermedias que demanden tiempo y recursos de sistema.

6. Documentar adecuadamente el sistema.

Datos Suministrados por el Usuario

Para que el sistema pueda generar un modelo altimétrico, el usuario debe suministrar los siguientes elementos:

1. Límites del modelo. Estos límites se definen en función de cuatro valores: longitud mínima, longitud máxima, latitud mínima y latitud máxima.

2. Archivo de salida. La descripción del archivo de salida debe contener forzosamente un nombre y un tipo válido y, de manera opcional, una unidad y una trayectoria (*path*).

3. Separación entre renglones y columnas. Esta separación se da en unidades básicas de 3 s de arco, que es la distancia en los archivos de datos. Si la separación es igual a la unidad, el modelo generado tendrá la misma resolución que los archivos de GEMA, o sea 3 s de arco; si su valor es 2, la separación será de 6 s de arco; y así sucesivamente. La función de este parámetro es disminuir la densidad de puntos de un modelo a fin de que ocupe menos espacio de almacenamiento y menos tiempo de procesamiento, lo cual es deseable, sobre todo en los procesos preliminares de un proyecto.

Proceso de Generación del Modelo

El proceso de generar un modelo altimétrico consta de dos partes:

1. Validación de la información proporcionada por el usuario (Figura 2).

2. Procesamiento de los archivos requeridos (Figura 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características Generales del Sistema

Con el fin de facilitar al máximo la operación del Sistema, no es necesario que el usuario realice ningún proceso de instalación, ya que, al introducir el disco compacto y cerrar la unidad de CD-ROM, éste se ejecuta de manera automática. Por otra parte, el sistema cuenta con los siguientes tipos de ayuda:

1. Tips. Son mensajes breves que se visualizan al poner el apuntador del ratón sobre un elemento gráfico del sistema (botón, campo de texto, etc.)

2. Ayuda contextual. Al oprimir la tecla F1 se despliega una descripción amplia del elemento gráfico activo.

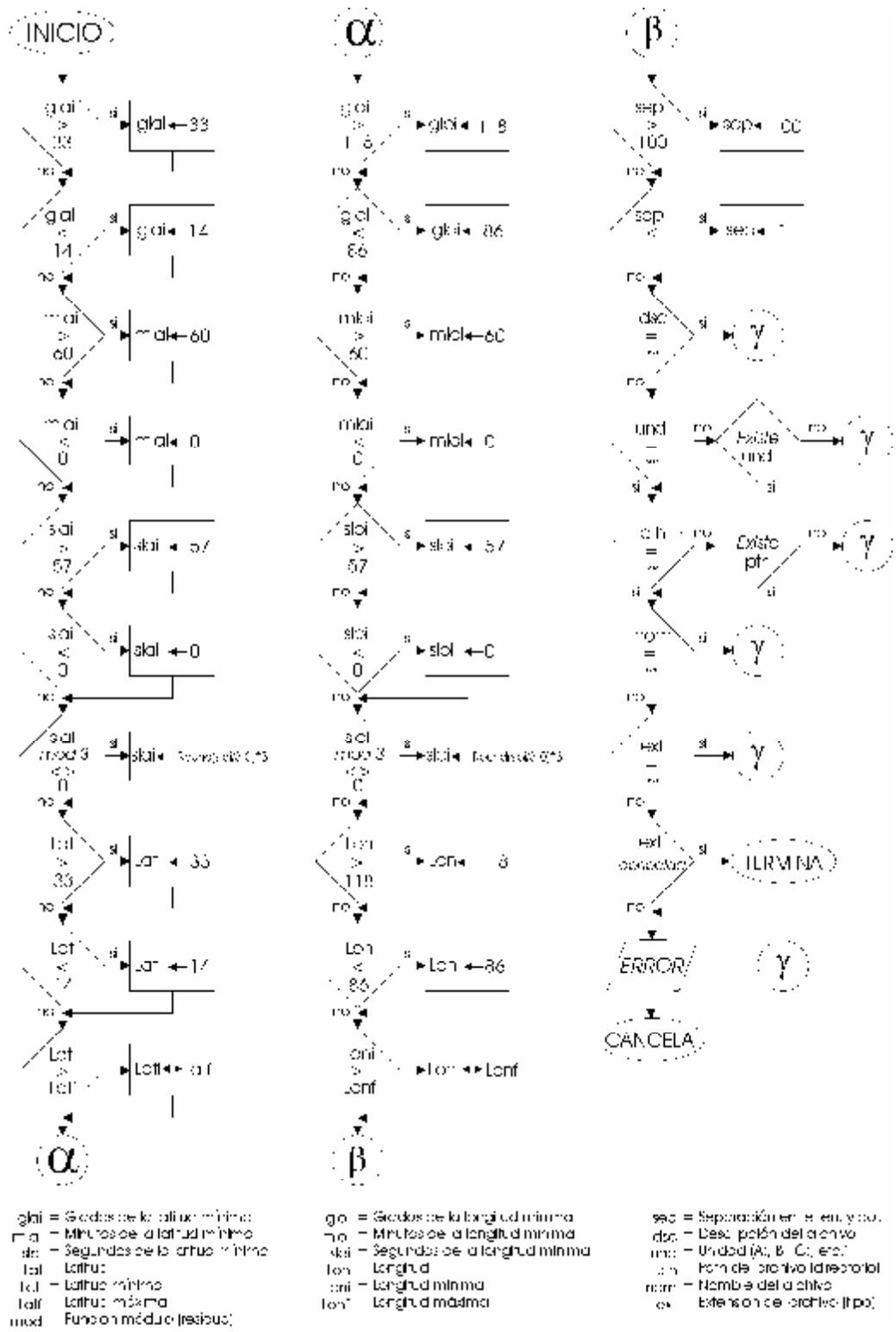


Figura 2. Diagrama de flujo de la validación de los datos de entrada.

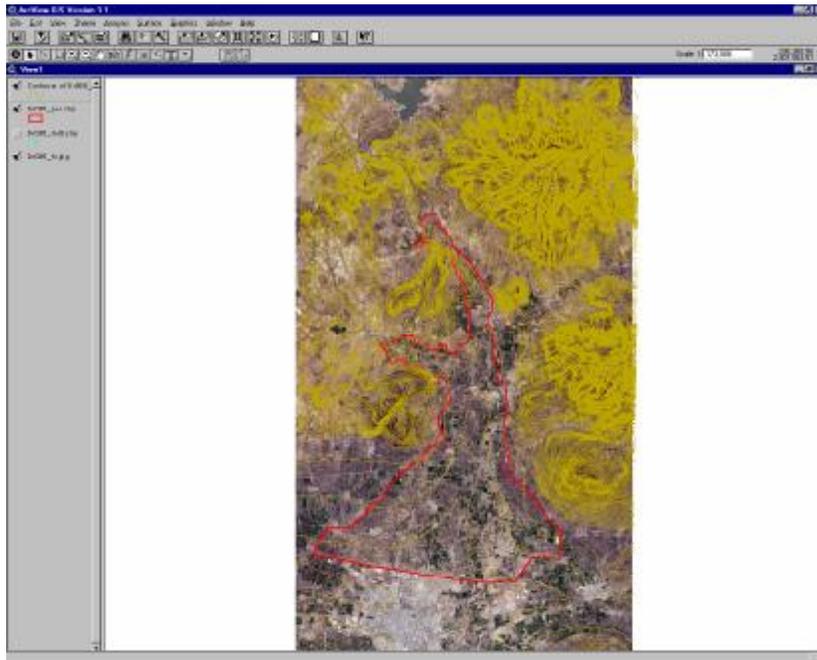


Figura 4. Curvas de nivel generadas con Arc-view.

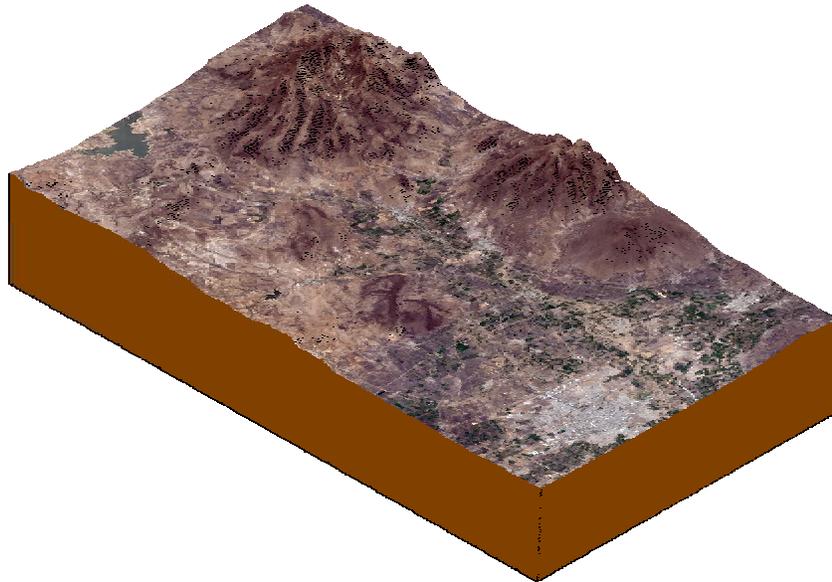


Figura 6. Mapa tridimensional generado con Idrisi32.

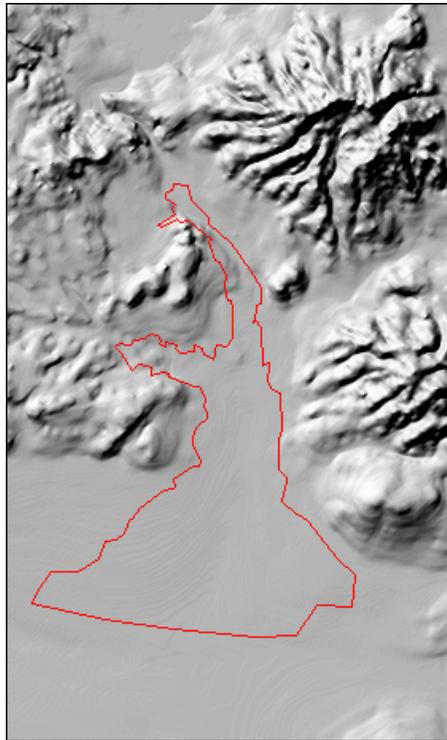


Figura 5. Mapa de sombreado de pendientes generado con Surfer

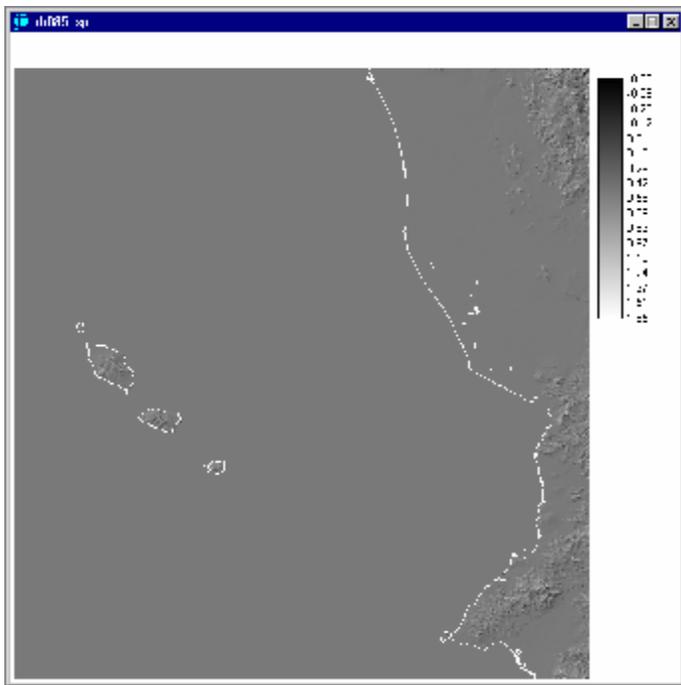


Figura 7. Vectorización del perímetro de una costa e islas, utilizando Micrografx Designer.

3. Botón de ayuda. Al oprimirlo se visualiza una ventana de ayuda en la cual se puede ver el contenido, el índice, o bien, una opción de búsqueda de texto.

El programa está protegido contra copia, mediante una llave física, por lo que al inicio de su ejecución verifica que ésta se encuentre colocada en el puerto paralelo, de no ser así, la ejecución se detiene y se le envía un mensaje al usuario pidiéndole que la coloque.

Los archivos de datos se encuentran protegidos mediante un ruido aleatorio generado por la llave física, lo cual hace imposible restituirlos mediante ingeniería inversa.

Desempeño del Sistema

Al comparar el desempeño del sistema en relación con los sistemas anteriores, con el programa de INEGI y ExtraeGEMA se obtuvieron tiempos de ejecución diez veces menores, a pesar de que se requiere eliminar el ruido aleatorio de los datos. El tiempo necesario para generar un modelo altimétrico, así como el espacio en disco requerido por el mismo, es función del formato de salida como se puede ver en el Cuadro 1.

Validación del Sistema

Con el fin de validar los modelos generados por el sistema, se efectuaron los siguientes ejercicios:

1. Obtener curvas de nivel, utilizando Arcview.
2. Obtener un mapa de sombreado de pendientes (hill shading), utilizando Surfer para Windows.
3. Obtener un mapa tridimensional, utilizando Idrisi32.

Cuadro 1. Tiempo y espacio en disco utilizado por los diferentes modelos[†].

Formato	Tiempo	Tamaño
	s	Mbytes
BMP	1	0.17
CSV	17	41.20
GRD	1	5.50
IMG	3	2.75
RST	3	2.75
SHP	49	68.70

[†] Los datos corresponden a un modelo de 1° por 1° generado en una PC Pentium III a 700Mz, 64 MB de RAM, CD-ROM 32X y sistema operativo Windows 98.

4. Vectorizar el perímetro de una costa e islas, utilizando Micrograf x Designer.

En todos los casos, los resultados obtenidos se analizaron mediante capas de control y el ajuste resultó perfecto como puede verse en las Figuras 4 a 7. Las figuras mostradas son resultado del procesamiento en los sistemas de cómputo indicados, utilizando como material inicial los modelos de elevación obtenidos mediante SIGMA.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El sistema SIGMA es más fácil de utilizar que los dos anteriores, el GEMA (INEGI) y ExtraeGEMA (Palacios), por contar con una interfaz gráfica intuitiva.
- El sistema SIGMA es 10 veces más rápido que el de GEMA (INEGI) y ExtraeGEMA (Palacios), esto como resultado de un método eficiente de decodificación de los datos de GEMA.
- El sistema SIGMA permite generar modelos de más de un archivo, evitando así el proceso de unión de resultados parciales.
- La verificación de los modelos generados por el sistema SIGMA muestra que éstos son confiables.
- Por todo lo anterior, es factible que a mediano plazo se incluyan al sistema otras bases de datos de

elevaciones, como los Modelos Digitales de Elevación a escala 1:50 000 de INEGI o las bases de datos de elevaciones disponibles en el mundo a la fecha, a fin de incrementar su potencial y utilidad.

LITERATURA CITADA

- Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. 1997. Idrisi for Windows tutorial exercises. Clark University. Worcester, MA.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 1993. Understanding GIS, the Arc/Info Method. Redlands CA.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 1996. ArcView GIS The Geographic Information System for Everyone, Using ArcView GIS. Redlands CA.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 1998. ESRI Shapefile technical description. Redlands CA.
- Golden Software. 1997. SURFER for Windows user's guide. Golden CO, USA.
- Joly, F. 1988. La cartografía. Oikos-Tau. Barcelona, España
- Murray, J.D. y W. VanRyper. 1994. Graphics file formats. O'Reilly & Associates. Sebastpol, CA.
- Palacios-Sánchez, L.A. 1998. Manual del programa para extraer información de los archivos de los geomodelos de altimetría del territorio nacional (GEMA). Servicios Integrales en Ingeniería y Sistemas. Hermosillo, Sonora, México.
- Pedraza-Oropeza, F. 1999. Generación de capas vectoriales de puntos en formato ArcView a partir de los geomodelos de altimetría del territorio nacional del INEGI (GEMA). Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Ríos, S. 1995. Modelización. AU 822. Alianza Ediciones. Madrid, España.

FERTILIZACIÓN, TIPOS DE SUELO Y HONGOS MICORRÍZICOS Y ENDÓFITOS RADICALES ASOCIADOS AL EUCALIPTO

Effect of Fertilization and Soil Type on Mycorrhizal and Root Endophytic Fungi Associated with Eucalypt

V.M. Perea-Estrada¹, J. Pérez-Moreno^{1‡}, M.L. de la Isla-de Bauer¹, M.E. Fenn²,
A. Trinidad-Santos¹ y T. Hernández-Tejeda³

RESUMEN

Debido al gran interés forestal de las especies de eucalipto, se han desarrollado diversos estudios sobre los microorganismos que establecen asociaciones simbióticas con sus raíces. A pesar de su gran interés e importancia, este tipo de investigaciones han recibido una limitada atención en México. En el presente trabajo, se evaluó la influencia de suelos de tres procedencias, con diferente contenido de materia orgánica, y cuatro combinaciones de fertilización mineral, en el crecimiento, producción de raíces cortas y asociación con micelio externo de hongos simbiotes en plantas de *Eucalyptus camaldulensis*. Cuando no se efectuó fertilización mineral, las plantas que crecieron en el suelo con mayor contenido de materia orgánica presentaron mayor producción total de biomasa, contenido de fósforo foliar y densidad de raíces cortas asociadas con micelio externo de hongos simbiotes, en relación con aquellas plantas crecidas en suelos con menor contenido de materia orgánica. En términos generales, estas tendencias fueron similares cuando se fertilizó sólo con fósforo o sólo con nitrógeno. En la mayoría de los tratamientos se registraron bajos valores de colonización de hongos ectomicorrízicos (de 5 a 15%) y micorrízico arbusculares (de 10 a 20%). En contraste, fue notable la abundancia de endófitos radicales distintos de los micorrízicos y, en algunos tratamientos, una alta densidad de raíces cortas colonizadas por el micelio externo de hongos simbióticos. En función de los resultados, se discuten también las implicaciones

ecofisiológicas de los hongos simbióticos en el desarrollo de plantas de eucalipto.

Palabras clave: hongos micorrízicos, ectomicorriza, nitrógeno, fósforo, mutualismo, *Eucalyptus camaldulensis*.

SUMMARY

Because of the importance of eucalyptus species in forestry, diverse studies have been conducted on microorganisms that have symbiotic associations in the roots. In spite of interest and importance of this research, it has received limited attention in Mexico. This study assessed the influence of soils from three different sites, with different organic matter contents and four combinations of mineral fertilization, on growth, production of short roots, and association with external mycelium of fungi symbionts of *Eucalyptus camaldulensis*. Plants grown in soil with the highest organic matter content, without mineral fertilization, had higher total biomass, foliar P content, and density of feeding-roots associated with external mycelium of symbiotic fungi, than those plants grown in soil with lower organic matter content. In general, this pattern was similar when soils were fertilized only with N or P. Most of the treatments registered low colonization rates of ectomycorrhizal (5 to 10%) or arbuscular mycorrhizal (10 to 20%) fungi. In contrast, there was an abundance of endophytic fungi different from the mycorrhizal fungi, and in some treatments, a high density of feeding-roots colonized by external mycelium of endophytic fungi. Finally, according to the results, the ecophysiological implications of the symbiotic fungi component on eucalyptus development are discussed.

Index words: mycorrhizal fungi, endophytes, nitrogen, phosphorous, mutualism, *Eucalyptus camaldulensis*.

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

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

² United States Department of Agriculture. Riverside, CA 9205.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 04410 México, D.F.

INTRODUCCIÓN

El género *Eucalyptus* incluye más de 500 especies y 120 variedades, las cuales son nativas del continente Australiano con dispersión natural en latitudes que se extienden desde 7° N a 43°39' S (FAO, 1979). A pesar de tener su distribución natural en estas regiones australes, los eucaliptos poseen una amplia capacidad de adaptación en terrenos marginales y ambientes limitados (deficiencia de agua, heladas o inundaciones) y gran resistencia a plagas y enfermedades (Kijkar, 1991). Debido al gran interés forestal de las especies de eucaliptos, se han desarrollado diversas investigaciones con relación a sus hongos endófitos radicales, incluyendo los hongos micorrízicos, principalmente en Australia, Nueva Zelanda, China y Filipinas (Malajczuk *et al.*, 1981; Lapeyrie *et al.*, 1992; Brundett *et al.*, 1996). Las micorrizas son asociaciones simbióticas que se establecen entre la mayoría de las plantas vasculares terrestres y hongos principalmente Basidiomycetes, Ascomycetes y Glomeromycetes. El principal beneficio para ambos simbioses es el intercambio nutrimental. Los hongos que establecen esta simbiosis reciben carbono de las plantas hospederas y las plantas reciben, principalmente, fósforo (P) y nitrógeno (N) a través de las hifas asociadas (Smith y Read, 1997). Una de las estructuras más importantes de las simbiosis micorrízicas es el micelio externo. Por ejemplo en la simbiosis ectomicorrízica (ECM), este componente, en condiciones naturales, puede constituir aproximadamente 800 kg ha⁻¹ (Wallander *et al.*, 2001), representar un tercio de la biomasa microbiana (Högberg y Högberg, 2002) y contribuir, junto con las raíces ectomicorrizadas, hasta en 50% de la respiración del suelo (Högberg *et al.*, 2001). Recientemente, se ha demostrado: i) que la producción de micelio externo, tanto de hongos ECM (Pérez-Moreno y Read, 2000), como micorrízico arbusculares (Hodge *et al.*, 2001), se promueve por la presencia de materiales orgánicos naturales, y ii) que dicho micelio externo es capaz de movilizar nutrimentos de estos materiales orgánicos a las plantas micorrízicas asociadas (Hodge *et al.*, 2001; Read y Pérez-Moreno, 2003). Por estas razones, podría esperarse que a mayor contenido de materia orgánica en el suelo, las plantas ECM tengan mayor cantidad de raíces cortas con micelio externo de hongos simbioses y mayor crecimiento vegetal. Sin embargo, en el caso de eucalipto, el cual establece tanto micorriza arbuscular (MA), como ECM (Jones *et al.*,

1998), a pesar de su importancia, ha recibido escasa atención el comprender: i) si el micelio externo de sus hongos simbioses y, en términos generales, el crecimiento de dichas plantas, se afecta diferencialmente, cuando los árboles crecen en suelos naturales con diferente contenido de materia orgánica; y ii) como la fertilización mineral puede afectar dicho efecto diferencial (dado que las prácticas de fertilización química constituyen parte del manejo convencional en las especies de eucalipto de importancia forestal). En el presente trabajo, se evaluó la influencia de tres suelos con contenidos diferenciales de materia orgánica y cuatro combinaciones de fertilización mineral, en el crecimiento vegetal de *E. camaldulensis* y en la producción de micelio externo asociado con sus raíces cortas. Estas raíces cortas constituyen los principales órganos de absorción en las plantas de eucalipto (Brundett *et al.*, 1996). Asimismo, se presenta un análisis de los simbioses fúngicos que se encontraron asociados con la rizósfera de estas plantas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de las Áreas de Procedencia de los Suelos Utilizados

Los suelos que se utilizaron procedían de tres áreas con características fisiográficas y de vegetación similares. Estas fueron: i) Desierto de los Leones, ii) Ajusco y iii) Parque Nacional Zoquiapan. Las dos primeras se encuentran en el Distrito Federal y la tercera en los límites de los estados de México y Puebla. La localización geográfica y la altitud de los sitios donde se colectaron los suelos que se utilizaron, se midieron con un geoposicionador GARMIN 12 XL. Los tipos de vegetación en las tres áreas fueron ecotonos de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*, con presencia de herbáceas pertenecientes a los géneros *Festuca*, *Muhlenbergia*, *Stipa* y *Calamagrostis*. En Desierto de los Leones, el suelo se colectó a una altitud de 3325 m, latitud de 19° 19' 42'' y longitud de 99° 25' 00''. El suelo fue un Andosol húmico, con precipitación anual de 1455 mm y clima templado subhúmedo con la estación lluviosa en verano y la estación seca en invierno, según Fenn *et al.* (1999). En Ajusco, el suelo se colectó a una altitud de 3434 m, latitud de 19° 13' 68'' y una longitud de 99° 16' 54''. Este suelo fue un Andosol, con precipitación anual de 1341 mm y clima semifrío-subhúmedo con lluvias en verano, según Morales-Luis *et al.* (2000). En

Zoquiapan, el suelo se colectó a una altitud de 3350 m, latitud de 19° 20' 00'' y longitud de 98° 42' 00''. El suelo fue un Andosol mólico, húmico, con una precipitación anual de 778 mm y clima templado subhúmedo, con la estación lluviosa en verano y la estación seca en invierno, según Fenn *et al.* (1999).

Características Físicas y Químicas de los Suelos

Las características físicas y químicas de los suelos que se estudiaron se determinaron en laboratorio (Cuadro 1).

Siembra de las Plantas, Trasplante y Fertilización

El estudio se desarrolló en invernaderos. La siembra de las plantas se efectuó en charolas de plástico, en un sustrato previamente esterilizado con vapor, que contenía 50% de arena, 25% de agrolita y 25% de vermiculita. La germinación se registró siete días después de la siembra y el trasplante se realizó 27 días después de la germinación, en las macetas que contenían un volumen de 3850 cm³ de suelo, sin esterilizar, procedente de las tres áreas estudiadas. Los suelos se pasaron previamente a través de un tamiz de 3 mm de abertura. Las plantas se regaron con agua destilada durante 310 días. La fertilización se realizó 100 días después del trasplante, cuando las plantas poseían una altura de alrededor de 20 cm. Las fuentes que se utilizaron en la fertilización con N, P y K fueron (NH₄)₂SO₄, Ca(H₂PO₄)₂·H₂O y K₂SO₄, respectivamente, de acuerdo con los tratamientos establecidos.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se utilizó una distribución completamente al azar con arreglo combinatorio y diseño factorial 3 x 5, con suelos procedentes de los tres sitios (Desierto de los Leones, Ajusco y Zoquiapan) y, en cada suelo, se aplicaron cuatro combinaciones de fertilización consistentes en: i) N solo, en dosis equivalentes a 100 kg ha⁻¹; ii) P solo, en dosis equivalentes a 60 kg ha⁻¹; iii) N y P en dosis equivalentes a 100 y 60 kg ha⁻¹, respectivamente; iv) combinación N, P y K, en dosis equivalentes a 100, 60 y 80 kg ha⁻¹, respectivamente. Además, en cada tipo de suelo, se mantuvo un testigo sin fertilizar. Este diseño entonces contó con 15 tratamientos, cada uno de los cuales tuvo tres repeticiones lo que originó un total de 45 unidades experimentales. A los datos que se obtuvieron en las diferentes variables evaluadas, se les realizaron un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$). En el caso de los valores de colonización micorrízica, que se expresaron como porcentajes, los datos se transformaron y sus arcosenos se utilizaron en los análisis de varianza.

Variabes Evaluadas

Al inicio del experimento, se evaluó la densidad de esporas de hongos micorrízico arbusculares, presente en los tres suelos utilizados mediante la técnica de Gerdemann y Nicolson (1963). Trescientos diez días después de la siembra, en cada unidad experimental (constituida por cada maceta) se extrajo

Cuadro 1. Análisis físico y químico de los suelos estudiados.

Característica	Unidad	Procedencia de los suelos		
		Ajusco	Desierto de los Leones	Zoquiapan
Textura		Migajón arenosa	Migajón	Migajón
Arena	%	60	50	36
Limo	%	30	36	42
Arcilla	%	10	14	22
pH		6.10	6.0	6.0
Materia orgánica	%	4.76	7.80	13.43
Conductividad eléctrica (1:2.5)	dS m ⁻¹	0.04	0.03	0.04
Nitrógeno total	%	0.24	0.39	0.67
P Olsen	mg kg ⁻¹	2.22	2.14	3.08
K intercambiable	cmol _c kg ⁻¹	0.67	0.79	0.83
Mg intercambiable	cmol _c kg ⁻¹	1.6	2.40	1.60
Ca intercambiable	cmol _c kg ⁻¹	4.0	3.20	4.00
SO ₄ extractable	mg kg ⁻¹	10.5	14.25	12.75

el cepellón completo con la finalidad de cortar, con un bisturí, seis cubos de suelo de 1 cm³ a diferentes profundidades: dos superficialmente, dos en la parte media y dos en la parte inferior de la maceta. Las raíces que se obtuvieron mediante este método se evaluaron en fresco cuando fue posible o se mantuvieron en refrigeración a 5 °C para su posterior análisis. Después, del cepellón completo se extrajo la mayor cantidad posible de sistema radical y se cortó la parte aérea separando las hojas, tallo y raíz. Tanto la parte aérea, como la raíz se secaron a 80 °C y se pesaron. Para la evaluación de la densidad de raíces cortas y el porcentaje de dichas raíces cortas que poseían micelio externo de hongos simbióticos asociados a su superficie, se siguió una modificación de las técnicas propuestas por Grand y Harvey (1984), Castellano y Molina (1989) y Marx *et al.* (1994), la cual se describe enseguida. Se hizo un conteo del número de raíces cortas al microscopio óptico en cada uno de las secciones de suelo, para lo cual los seis cubos de suelo de 1 cm³, que se habían extraído de diferentes profundidades, se colocaron en cajas de Petri con agua y se disgregaron con cuidado para separar el suelo de las raíces. La evaluación de las raíces con y sin micelio externo de hongos simbióticos se realizó mediante microscopía estereoscópica. Se contaron las raíces cortas que poseían micelio externo asociado con su superficie y las que carecían de micelio aparente. Para determinar la producción total de raíces cortas, se siguió el siguiente método. Los sistemas radicales de cada una de las plantas a evaluarse se cortaron en segmentos de 7 cm de longitud. Al azar, se evaluaron en cada unidad experimental el número total de raíces cortas en 15 de estos segmentos. Los valores de raíces cortas, así obtenidos, se extrapolaron para expresar el total por planta, dado que se contó también el número de segmentos radicales de 7 cm de longitud, para cada unidad experimental. Guerin-Laguette *et al.* (2003) utilizaron una modificación de dicho método. En estas evaluaciones sólo se consideraron raíces sanas y turgentes, de acuerdo con el criterio propuesto por Castellano y Molina (1989) para asociaciones de plantas forestales con hongos simbióticos mutualistas. Se consideraron como raíces cortas aquellas que poseían una longitud máxima de 1 mm. Además, se evaluó la colonización micorrízica arbuscular por el método de Phillips y Hayman (1970) y la colonización ectomicorrízica, siguiendo la metodología propuesta por Grand y Harvey (1984). En las plantas, se evaluaron altura, peso seco total, peso seco del follaje,

del tallo y de la raíz, y el contenido de N y P del follaje. El N y P foliares se determinaron según Bremner (1965) y Olsen *et al.* (1954), respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento y Contenido de Nitrógeno y Fósforo

Cuando no existió fertilización mineral, las plantas que crecieron en el suelo proveniente de Zoquiapan tuvieron una producción de biomasa 2.6 y 7.5 veces, respectivamente, mayor en comparación con aquellas crecidas en suelos provenientes de Desierto de los Leones y Ajusco. Estas diferencias resultaron significativas (Figura 1). Una tendencia parecida se observó en el caso de las plantas que se fertilizaron sólo con N y uno de los casos que se fertilizaron sólo con P. En contraste, no se observaron diferencias significativas en la producción total de biomasa vegetal, cuando se efectuó fertilización combinada (Figura 1). Tendencias semejantes a las que se observaron en la producción total de biomasa, se registraron cuando se analizaron follaje, tallo y raíz por separado (datos no mostrados). Asimismo, estas tendencias fueron similares en relación con las cantidades foliares de P y N (Figuras 2 y 3). Un patrón análogo se observó en N y P foliar cuando se aplicó sólo P (Figuras 2 y 3). A diferencia de los testigos o de la fertilización sólo con N o sólo con P, cuando se aplicó fertilización combinada, de NP o de NPK, no existieron diferencias significativas entre los tratamientos en términos del peso seco total y el N foliar de las plantas de eucalipto (Figuras 1 y 2). Podría decirse, entonces, que la fertilización de NP o NPK originó una respuesta diferencial en los tres tipos de suelo. El mejor efecto con la fertilización combinada se observó en los suelos de Ajusco y de Desierto de los Leones. Un factor que pudo influir en dicho efecto es la posible composición diferencial de especies micorrízicas en los tres suelos, la cual se discute más adelante.

Producción de Raíces Cortas y Asociación con Micelio Externo

Cuando no existió fertilización mineral, las plantas que crecieron en el suelo proveniente de Zoquiapan produjeron una mayor cantidad de raíces cortas totales comparadas con aquellas que crecieron en suelos provenientes de Ajusco y

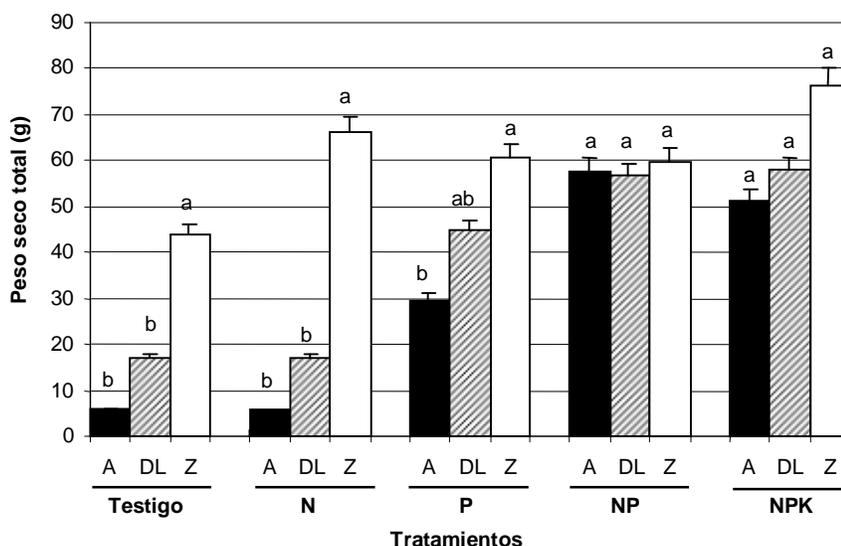


Figura 1. Producción total de biomasa en plantas de *Eucalyptus camaldulensis* desarrolladas en suelos de tres procedencias (A = Ajusco; DL = Desierto de los Leones; Z = Zoquiapan), con combinaciones de fertilización equivalentes a 100, 60 y 80 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente. Los valores son promedios + error estándar. Un cambio de letra sobre una barra entre procedencias, dentro de cada tratamiento, indica diferencias estadísticas significativas, según la prueba de comparación de medias de Tukey (P < 0.05).

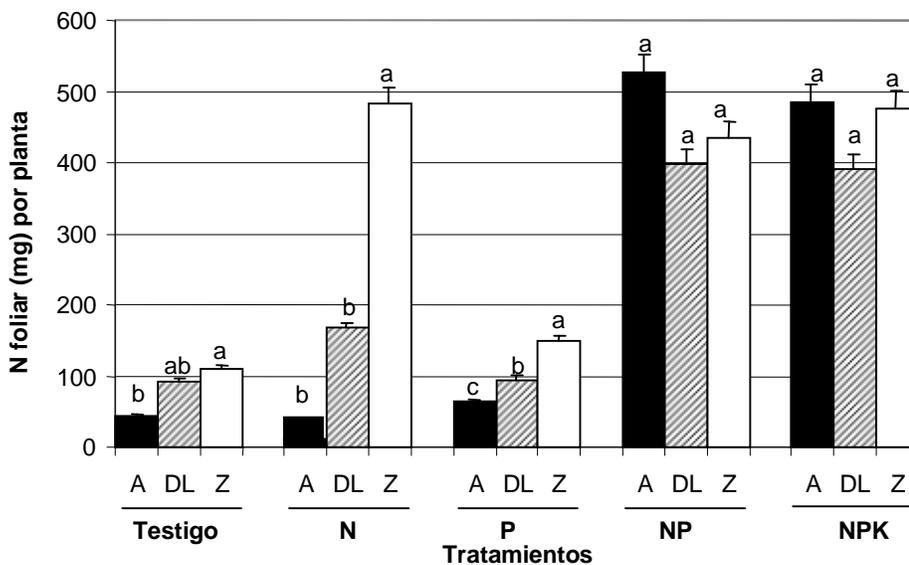


Figura 2. Contenido de nitrógeno en el follaje de *Eucalyptus camaldulensis* desarrollado en suelos de tres procedencias (A = Ajusco; DL = Desierto de los Leones; Z = Zoquiapan), con combinaciones de fertilización equivalentes a 100, 60 y 80 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente. Los valores son promedios + error estándar. Un cambio de letra sobre una barra entre procedencias, dentro de cada tratamiento, indica diferencias estadísticas significativas según la prueba de comparación de medias de Tukey (P < 0.05).

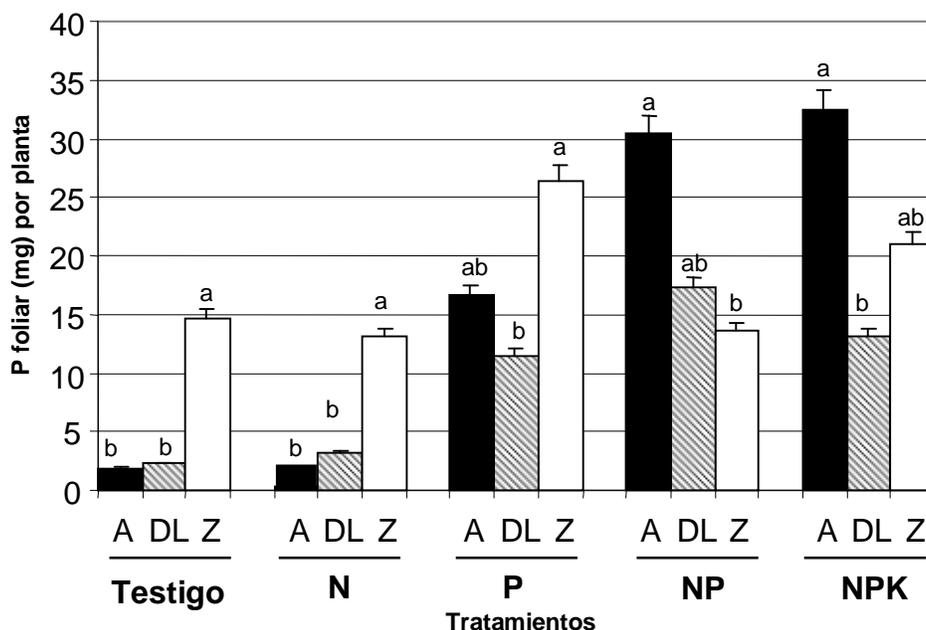


Figura 3. Contenido de fósforo en el follaje de *Eucalyptus camaldulensis* desarrollado en suelos de tres procedencias (A = Ajusco; DL = Desierto de los Leones; Z = Zoquiapan), con combinaciones de fertilización equivalentes a 100, 60 y 80 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente. Los valores son promedios + error estándar. Un cambio de letra sobre una barra entre procedencias, dentro de cada tratamiento, indica diferencias estadísticas significativas según la prueba de comparación de medias de Tukey (P < 0.05).

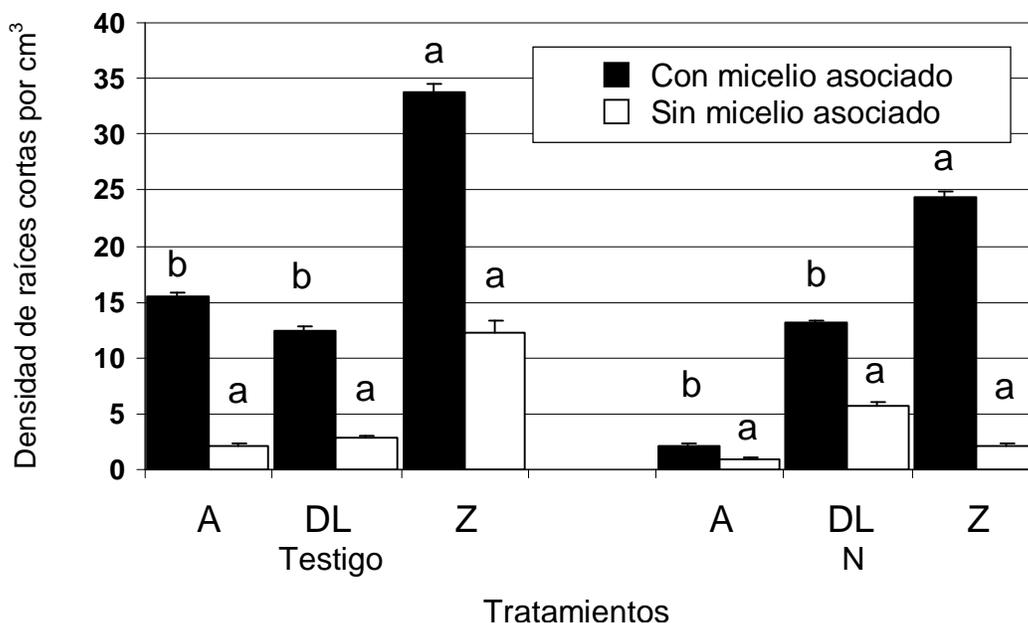


Figura 4. Producción de raíces cortas, asociadas con micelio externo de hongos simbióticos y carentes de él, en plantas de *Eucalyptus camaldulensis* desarrolladas en suelos de tres procedencias (A = Ajusco; DL = Desierto de los Leones; Z = Zoquiapan), con aplicaciones de fertilización equivalentes a 100 kg ha⁻¹ de N. Los valores son promedios + error estándar de tres unidades experimentales, de las cuales se tomaron en total 18 submuestras. Un cambio de letra entre procedencias sobre una barra dentro de las categorías con y sin micelio asociado indica diferencias estadísticas significativas según la prueba de comparación de medias de Tukey (P < 0.05).

Cuadro 2. Producción total de raíces cortas por tratamiento, expresadas en miles, en plantas de *Eucalyptus camaldulensis* que se desarrollaron en suelos de tres procedencias con diferentes combinaciones de fertilización mineral.

Procedencia	Tratamiento	
	Testigo	N
Ajusco	68.16 b	12.26 b
Desierto de los Leones	59.03 b	72.15 ab
Zoquiapan	177.77 a	102.38 a

Los valores son promedios de tres repeticiones, dentro de los tratamientos, un cambio de letra entre sitios indica diferencias estadísticas significativas, de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey ($P < 0.05$). Las dosis de fertilización fueron equivalentes a 100 kg ha^{-1} de N.

Desierto de los Leones (Cuadro 2). Una tendencia parecida se observó, en ausencia de fertilización mineral también, en la producción de raíces cortas asociadas con micelio externo de hongos simbióticos (Figura 4). Este patrón se mantuvo cuando se fertilizó solo con N (Cuadro 2; Figura 4), lo cual no se observó en los casos en los que se aplicó solo P o combinación de fertilizantes (datos no mostrados), en cuyo caso no existieron diferencias estadísticas significativas entre plantas crecidas en suelos de las tres procedencias estudiadas. En contraste, en el caso de las raíces cortas que carecían de micelio externo de hongos simbióticos, no se observaron diferencias significativas independientemente si las plantas fueron o no fertilizadas (Figura 4).

La mayoría de las plantas ECM, dentro de las cuales se incluyen todas las especies de *Eucalyptus*, tienen raíces con un patrón de ramificación al cual se le denomina heterorrízico, que está constituido por raíces laterales cortas soportadas por una red de raíces largas más gruesas. Las raíces cortas y largas en los sistemas radicales heterorrízicos son similares en estructura, pero las raíces cortas, además de ser de menor longitud, son también de menor diámetro y crecen más lento que las raíces largas. El crecimiento restringido de las raíces cortas es indispensable para que la simbiosis ECM pueda establecerse, dado que los hongos ECM tienen dificultad para colonizar raíces de rápido crecimiento (Chilvers y Gust, 1982; Brundett *et al.*, 1996). En adición, debido a su frecuente asociación con micelio externo ECM, estas raíces cortas constituyen los principales órganos de absorción de las plantas de eucalipto.

En ausencia de fertilización mineral, el mayor crecimiento vegetal (y la mayor producción de raíces cortas asociadas con micelio externo) que se observó en el presente estudio en las plantas de eucalipto en el suelo con el mayor contenido de materia orgánica, no

es sorprendente, dado que se ha demostrado que el micelio externo de los hongos micorrízicos tiene capacidad de transferir N y P a partir de materiales orgánicos. Entre estos materiales se han incluido: restos vegetales (Pérez-Moreno y Read, 2000; Hodge *et al.*, 2001), polen (Pérez-Moreno y Read, 2001a) y necromasa de fauna del suelo (Klironomos y Hart, 2001; Pérez-Moreno y Read, 2001b). Las cantidades de N y P movilizadas a partir de dichos sustratos han sido variables: 68 y 65% de necromasa de nematodos, 76 y 97% de polen y 33 y 69% de mantillo, en relación con los contenidos totales iniciales de N y P en dichos materiales, respectivamente. Una proporción importante de dichos nutrimentos puede movilizarse, vía el micelio externo micorrízico, a las plantas asociadas (Hodge *et al.*, 2001; Read y Pérez-Moreno, 2003).

Es interesante mencionar que en dos de los suelos estudiados, Zoquiapan y Ajusco, existió una notable disminución de raíces cortas asociadas con micelio externo de hongos simbióticos cuando se aplicó fertilización con nitrógeno comparada con los testigos (Figura 4). Brundett *et al.* (1996) observaron que, al aumentar la dosis de fertilización mineral con nitrógeno, de 80 a 160 kg ha^{-1} , existió una disminución en la colonización ECM en *Eucalyptus diversicolor*. Estos autores encontraron también que dicho efecto fue diferencial y dependió de las especies de hongos ECM. En su caso, algunos hongos ECM adscritos a los géneros *Descolea* y *Scleroderma* resultaron menos afectados que *Pisolithus tinctorius*, para el cual existieron reducciones más de 50% de la colonización ECM. En lo que respecta a la fertilización fosfatada, Chen *et al.* (2000) evaluaron las respuestas de *Eucalyptus globulus* y *E. urophylla* a la inoculación micorrízica (tanto ECM como arbuscular) a dos concentraciones de P equivalentes a 12 y 24 kg ha^{-1} . Estos autores encontraron que la alta concentración de P redujo la colonización, principalmente de los hongos micorrízico arbusculares *Acaulospora laevis* y *Scutellospora callospora*.

Microorganismos Simbióticos Potencialmente Involucrados

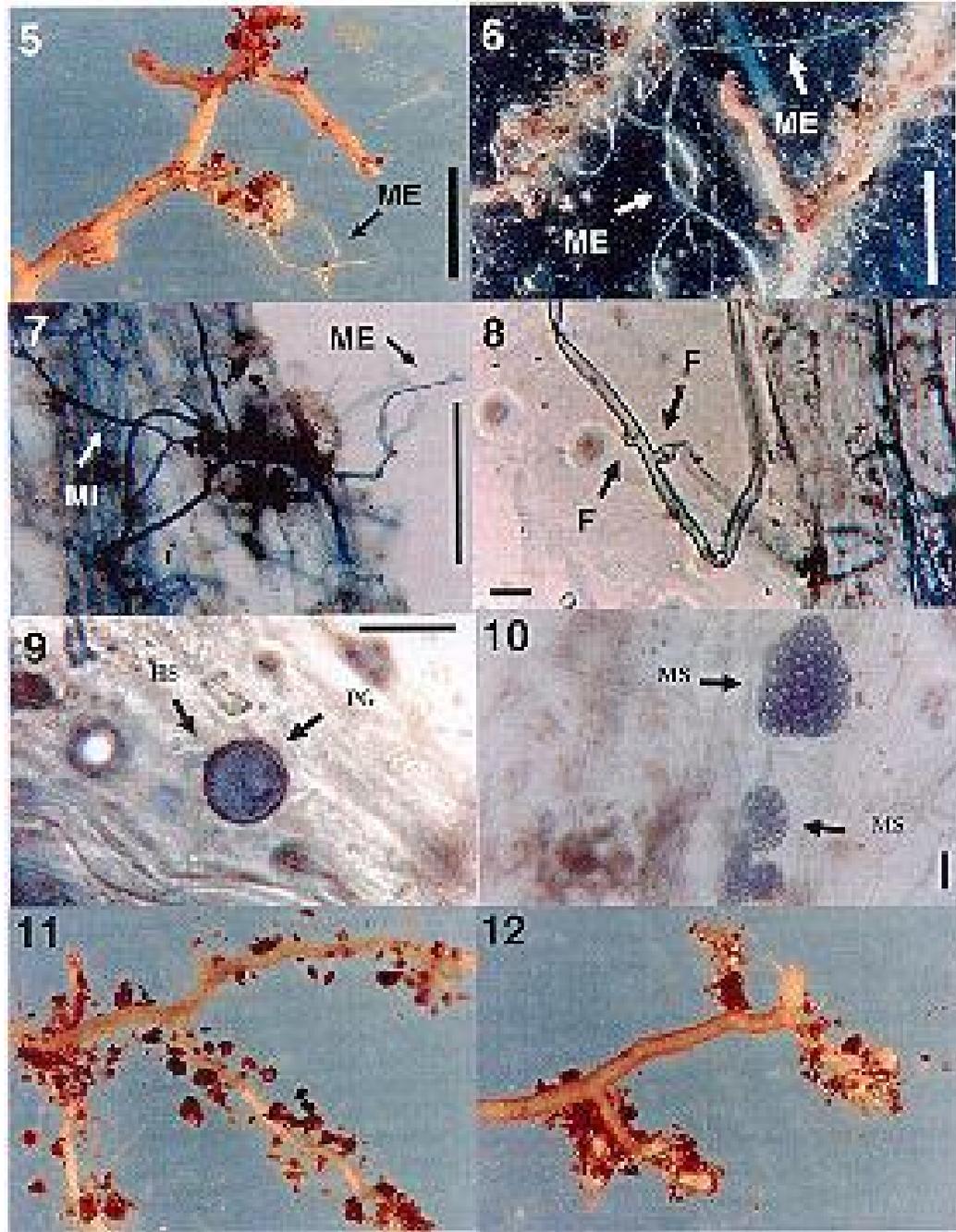
Aunque no se efectuó identificación de las especies de hongos involucrados, debido a la naturaleza del trabajo, en función de las estructuras observadas (algunas de las cuales se presentan en las Figuras 5 a 12) y de reportes bibliográficos previos (Brundett *et al.*, 1996; Chen *et al.*, 2000), los grupos

de hongos simbioses potencialmente involucrados en la colonización fúngica en las plantas de eucalipto incluyeron: i) hongos ectomicorrízicos; ii) hongos micorrízico arbusculares, y iii) hongos endófitos radicales distintos de los micorrízicos. El número promedio de esporas de hongos micorrízico arbusculares, que se encontraron inicialmente en los suelos empleados fue de 1.8, 2.2 y 2.6 esporas g⁻¹ de suelo para Ajusco, Desierto de los Leones y Zoquiapan, respectivamente. No existieron diferencias estadísticas significativas entre estos valores según la prueba de comparación de medias de Tukey (P = 0.05). En relación con las poblaciones iniciales de hongos ECM, éstas no se evaluaron en el presente trabajo, sin embargo, estudios previos (Pérez-Moreno *et al.*, 1993; García-Bastian *et al.*, 1998) han demostrado la presencia de más de 40 especies de hongos ECM en los suelos de las tres procedencias estudiadas. Se ha encontrado que existen algunas diferencias en la composición de especies entre sitios, por ejemplo, especies dentro de los géneros *Chroogomphus*, *Hebeloma* y *Paxillus*, sólo se han encontrado en Desierto de los Leones, pero no en los otros sitios. En contraste, especies dentro de otros géneros: *Amanita*, *Boletus*, *Cantharellus*, *Helvella*, *Inocybe*, *Laccaria*, *Lactarius* y *Russula*, se han reportado en los tres sitios. Brundett *et al.* (1996) reportaron que algunas especies dentro de estos géneros ECM se encuentran asociadas con eucaliptos, dentro de ellas se incluyen: *Laccaria laccata*, *L. fraterna*, *L. laeteri*, *Hebeloma westraliense*, *Lactarius eucalypti* y *Paxillus muelleri*. En caso de existir diferencias en composición de especies ECM, en los suelos utilizados, éstas podrían estar involucradas en las diferencias de respuesta de crecimiento vegetal que se encontraron en el presente trabajo, dado que se conoce que existen capacidades diferenciales de movilización nutrimental a partir de sustratos orgánicos naturales entre especies, o incluso cepas, de hongos ECM (Leake y Read, 1997; Read y Pérez-Moreno, 2003). En relación con el efecto de hongos micorrízico arbusculares en eucaliptos, Chen *et al.* (2000) encontraron respuestas diferenciales en el crecimiento de *Eucalyptus urophylla* como resultado de la inoculación con distintas especies de dichos hongos, por ejemplo, en su caso, *Acaulospora laevis* originó mayor crecimiento que *Glomus invermaium* y *Scutellospora callospora*. Adicionalmente, dichos autores encontraron una respuesta sinérgica en el crecimiento de *E. urophylla*, cuando cada una de estas especies

micorrízico arbusculares se inocularon de manera combinada con el hongo ECM *Laccaria lateritia*.

En el presente trabajo, al final del experimento se detectó la presencia de colonización ECM (Figuras 5 y 12), endomicorrízica (Figuras 6, 7 y 9) y colonización por endófitos aparentemente distintos de los hongos micorrízicos (Figura 10). El porcentaje de raíces ECM fue relativamente bajo y varió de 5 a 15% sin existir diferencia significativa entre los tratamientos estudiados, excepto en Zoquiapan sin fertilización mineral donde alcanzó 20% (datos no mostrados). Mayores porcentajes de colonización ectomicorrízica de hasta 28% han sido reportados por Lu *et al.* (1998) en *E. globulus*. Brundett *et al.* (1996) reportaron que la relación ECM es frecuente entre eucaliptos y diversos géneros de Basidiomycetes, como *Hebeloma*, *Setchelliogaster*, *Pisolithus* y *Laccaria*. Dichos autores efectuaron inoculación con estos hongos en *Eucalyptus globulus*, *E. urophylla*, *E. grandis* y *E. regnans*; y encontraron que, en algunos casos, pueden llegar incluso a producirse cuerpos fructíferos fúngicos de las especies inoculadas, en invernadero y campo.

El porcentaje de colonización de hongos micorrízicos arbusculares, de manera similar al caso de hongos ectomicorrízicos, también fue relativamente bajo, y varió de 10 a 20%, sin existir tampoco diferencia significativa entre los tratamientos, excepto en Zoquiapan sin fertilización mineral donde alcanzó 25% (datos no mostrados). Porcentajes de colonización superiores, 30 a 35%, han sido reportados para otras especies de eucaliptos: *E. marginata* y *E. diversicolor*, por Malajczuk *et al.* (1981); 38% en *E. regnans* por Schoeneberger (1985) y de hasta 53% por Plascencia-Escalante *et al.* (1997). Estos grados de colonización mayores podrían estar relacionados con el hecho de que estos autores utilizaron cepas puras de hongos micorrízicos arbusculares propagadas en invernadero, a diferencia de la presente investigación la cual utilizó suelo de campo. Las bajas colonizaciones micorrízicas observadas en el presente trabajo también podrían estar relacionadas con la alta frecuencia de colonización por hongos endófitos distintos de los micorrízicos que se observó, la cual se discutirá más adelante. Esta alcanzó hasta 45% en algunos de los tratamientos, como Zoquiapan sin fertilización mineral (datos no mostrados). Es de interés, mencionar que en contraste con los bajos porcentajes de colonización micorrízica, se observó en algunos tratamientos (Figura 4), una elevada densidad de



Figuras 5-12. Microfotografías de hongos simbióticos asociados con *Eucalyptus camaldulensis*. 5: Raíz ectomicorrizica con micelio externo (ME). 6: Micelio externo (ME) de hongos simbióticos conectando raíces. 7: Micelio interno (MI) de hongos micorrizicos arbusculares penetrando las células radicales abundantemente, conectado con el micelio externo (ME). 8: Fibulas (F), características de Basidiomycetes, grupo de hongos típicamente formadores de ectomicorrizas, constituyendo parte del micelio externo asociado a raíces. 9: Espora de *Glomus* sp., género de hongos endomicorrizicos arbusculares, mostrando pared gruesa (PG) e hifa sustentadora recta (HS), creciendo intraradicalmente; 10: Microesclerocios (MS) de hongos endófitos; colonizando células corticales intensamente. 11 y 12: Abundante asociación de las partículas de suelo con el micelio externo de hongos micorrizicos arbusculares (Figura 11) y ectomicorrizicos (Figura 12). Barras de Figuras 5 y 6 = 100 µm y de Figuras 7 a la 10 = 10 µm.

raíces cortas colonizada por el micelio externo de hongos simbiotes, el cual podría pertenecer a dichos hongos endófitos distintos de los micorrízicos.

Además del incremento de área para exploración nutrimental y la protección contra patógenos (Smith y Read, 1997), una de las funciones más importantes que puede cumplir el micelio externo de hongos simbióticos es el mejoramiento en la agregación del suelo (Miller y Jastrow, 1992). Se ha demostrado que existe, tanto: i) unión mecánica de las partículas de suelo por las hifas de hongos ecto y endomicorrízicos (Tisdal, 1994), como: ii) producción de glomalina, una glicoproteína con propiedades cementantes, producida por el micelio de los hongos endomicorrízicos arbusculares (Wright *et al.*, 1996; Wright y Upadhyaya, 1996; 1998). Una interesante observación en este sentido fue que, en el presente experimento, se observaron con frecuencia partículas de suelo firmemente adheridas al micelio externo, tanto de hongos ectomicorrízicos, como micorrízico arbusculares (Figuras 11 y 12).

También se detectaron con frecuencia diversos hongos endófitos de la raíz, cuya morfología no corresponde a la típica de los hongos ectomicorrízicos o micorrízico arbusculares los cuales, a pesar de su abundancia, no originaban daño aparente a las raíces. Por ejemplo, se observaron con frecuencia micelios oscuros (café o negro) o microesclerocios creciendo dentro de las células corticales (Figura 10) similares a los descritos por Jumpponen y Trappe (1998) y a los ilustrados por Girlanda *et al.* (2002). Recientemente, diversos autores (Addy *et al.*, 2000; Grünig *et al.*, 2001; Girlanda *et al.*, 2002), han recalado que algunos hongos endófitos de las células corticales de la raíz con morfología distinta de la de los micorrízicos, a pesar de su abundancia e interés ecofisiológico, se han estudiado poco. A pesar de que su taxonomía es poco conocida, algunos de los aislamientos de estos hongos se han identificado, con base en evidencia molecular, dentro de los géneros *Phialocephala* (Addy *et al.*, 2000), *Rhizopycnis* o géneros nuevos dentro de las subclases Chaetothyromycetidae o Dothideomycetidae (Girlanda *et al.*, 2002). La importancia que estos hongos simbióticos juega en el funcionamiento vegetal no está totalmente claro; sin embargo, a juzgar por su frecuencia y abundancia, se considera que podrían estar involucrados en procesos ecológicos clave, como la absorción nutrimental vegetal o la protección en contra de organismos patogénicos radicales.

En este sentido, Yamaji *et al.* (2001) observaron que en algunas especies forestales, como *Picea glehnii*, existe una microsucesión de hongos simbiotes en sus raíces, previa al establecimiento de los hongos ectomicorrízicos. Estos autores demostraron también que algunos microorganismos no micorrízicos, asociados a la raíz, como *Penicillium* spp. juegan un importante papel en la protección en contra del “damping-off” causado por *Pythium*, *Fusarium* y *Rhizoctonia*. *Penicillium demascenum* fue capaz de producir sustancias antibióticas como citrinina y de crecer alrededor de las raíces de *Picea glehnii* brindándole protección en contra de *Pythium vexans*, lo cual demuestra la importante función que pueden tener algunos de los microorganismos distintos de los hongos micorrízicos en la protección contra patógenos radicales.

CONCLUSIONES

- Las plantas de *Eucalyptus camaldulensis* que crecieron en el suelo con mayor contenido de materia orgánica, en ausencia de fertilización, produjeron mayor cantidad de biomasa total y contenido de fósforo foliar que aquéllas crecidas en suelos con menor contenido de materia orgánica. Esta tendencia fue similar para la producción de raíces cortas totales y la de raíces cortas asociadas con micelio externo de hongos simbióticos. Este fenómeno podría estar relacionado con la capacidad de algunos hongos simbiotes para acceder a nutrimentos de fuentes orgánicas, la cual se ha documentado en el caso de los hongos ectomicorrízicos y micorrízico arbusculares. Cuando se fertilizó exclusivamente con nitrógeno o sólo con fósforo, en dosis equivalentes a 100 kg ha⁻¹ o 60 kg ha⁻¹, respectivamente, existieron en términos generales tendencias similares. Por otra parte, las fertilizaciones combinadas evaluadas produjeron respuestas distintas de la tendencia señalada anteriormente, de acuerdo con las diferentes combinaciones. De acuerdo con los resultados observados, se puede concluir también que uno de los grupos de hongos simbiotes que requieren mayor atención, en el caso de la especie de eucalipto estudiado, son los endófitos radicales distintos de los micorrízicos, debido a que pueden estar involucrados en procesos ecológicos clave, como la absorción nutrimental o la protección en contra de microorganismos patogénicos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece profundamente al M.C. Jorge Valdés Carrasco, de la Especialidad de Entomología y Acarología, del IFIT del Colegio de Postgraduados, su valioso apoyo técnico en la toma de las microfotografías. Al Ing. Jorge Hernández López, del Programa de Hidrociencias, del IRENAT se le agradece su invaluable apoyo técnico. Asimismo, al CONACYT su apoyo financiero a través del proyecto 29007B *Cambios en ecosistemas forestales en el Valle de México* y el apoyo del proyecto SEMARNAT-CONACyT-2004-01.

Asimismo, se agradecen profundamente los constructivos comentarios de dos árbitros anónimos y del(a) editor(a) del artículo.

LITERATURA CITADA

- Addy, H.P., S. Hambleton y R.S. Currah. 2000. Distribution and molecular characterization of the root endophyte *Phialocephala fortinii* along an environmental gradient in the boreal forest of Alberta. *Mycological Res.* 104: 1213-1221.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. In: Black, C.A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2.* Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Brundett, M., N. Bougher, B. Dell, T. Grove y N. Malajczuk. 1996. Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. Monograph 32. Australian Center for International Agricultural Research. Canberra, Australia.
- Castellano, M.A. y R. Molina. 1989. The biological component: Nursery pest and mycorrhizae. pp. 100-107. In: Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. McDonald y J.P. Barnett (eds.). *The container tree nursery manual, Vol. 5.* US Department of Agriculture. Washington, D.C.
- Chen, Y.L., M.C. Brundett y B. Dell. 2000. Effects of ectomycorrhizas and vesicular-arbuscular mycorrhizas, alone or in competition, on root colonization and growth of *Eucalyptus globulus* and *E. urophylla*. *New Phytologist* 146: 545-556.
- Chilvers, G.A. y L.W. Gust. 1982. Comparison between the growth rates of mycorrhizas, uninfected roots and a mycorrhizal fungus of *Eucalyptus st-johnii* R.T. Bak. *New Phytologist* 91: 453-466.
- FAO (Food and Agricultural Organization). 1979. Eucalypts for planting. FAO forestry and forest products. Study 11. 2nd ed. Rome, Italy.
- Fenn, M.E., M.L. Isla de Bauer, A. Quevedo Nolasco y C. Rodríguez-Frausto. 1999. Nitrogen and sulfur deposition and forest nutrient status in the Valley of Mexico. *Water, Air, Soil Pollut.* 113: 155-174.
- García-Bastian, R.M., M.A. López-López, A. Velázquez-Martínez y J. Pérez-Moreno. 1998. Mycorrhizal and saprotrophic macrofungi in declining sacred-fir stands. *Micol. Neotrop.* 11: 9-21.
- Gerdemann, J.W. y T.H. Nicolson. 1963. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society* 46: 235-244.
- Girlanda, M., S. Ghignone y A.M. Luppi. 2002. Diversity of sterile root-associated fungi of two Mediterranean plants. *New Phytologist* 155: 481-498.
- Grand, F.L. y A.E. Harvey. 1984. Quantitative measurement of ectomycorrhizae on plant roots. pp. 157-164. In: Schenck, N.C. (ed.). *Methods and principles of mycorrhizal research.* 2nd ed. The American Phytopathological Society. St. Paul, MN.
- Grünig, C.R., T.N. Sieber y O. Holdenrieder. 2001. Characterization of dark septate endophytic fungi (DSE) using inter-simple-sequence-repeat-anchored polymerase chain reaction (ISSR-PCR) amplification. *Mycological Res.* 105: 24-32.
- Guerin-Laguette, A., S. Conventi, G. Ruiz, C. Plassard y D. Mousin. 2003. The ectomycorrhizal symbiosis between *Lactarius deliciosus* and *Pinus sylvestris* in forest soil samples: Symbiotic efficiency and development of roots of a rDNA internal spacer transcribed spacer-selected isolate of *L. deliciosus*. *Mycorrhiza* 13: 17-25.
- Hodge, A., C.D. Campbell y A.H. Fitter. 2001. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material. *Nature* 413: 297-299.
- Högberg, M.N. y P. Högberg. 2002. Extramatrical ectomycorrhizal mycelium contributes one-third of microbial biomass and produces, together with associated roots, half the dissolved organic carbon in a forest soil. *New Phytologist* 154: 791-795.
- Högberg, P., A. Nordren, N. Bechmann, A.F.S. Taylor, A. Ekblad, M.N. Högberg, G. Nyberg, M. Ottosson-Löfuenius y D.J. Read. 2001. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature* 411: 789-792.
- Jones, M.D., D.M. Durall y P.B. Tinker. 1998. A comparison of arbuscular and ectomycorrhizal *Eucalyptus coccidera*: Growth response, phosphorus uptake efficiency and external hyphal production. *New Phytologist* 140: 125-134.
- Jumpponen, A. y J.M. Trappe. 1998. Dark septate endophytes: A review of facultative biotrophic root-colonizing fungi. *New Phytologist* 140: 295-310.
- Kijkar, S. 1991. Handbook: Producing rooted cuttings of *Eucalyptus camaldulensis*. ASEAN-Canada Forest Tree Seed Centre Project. Muak - Lek, Saraburi, Thailandia.
- Klironomos, J.N. y M.M. Hart. 2001. Animal nitrogen swap for plant carbon. *Nature* 410: 651-652.
- Lapeyrie, F., J. Garbaye, V. de Oliveira y M. Bellei. 1992. Controlled mycorrhization of *Eucalyptus*. pp. 293-299. In: Read, D.J., D.H. Lewis, A.H. Fitter e I.J. Alexander (eds.). *Mycorrhizas in ecosystems.* CAB-International. Oxon, UK.
- Leake, J.R. y D.J. Read. 1997. Mycorrhizal fungi in terrestrial habitats. pp. 281-301. In: Wicklow, D.T. y B. Söderström (eds.). *The mycota IV, environmental and microbial relationships.* Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- Lu, X., N. Malajczuk y B. Dell. 1998. Mycorrhiza formation and growth of *Eucalyptus globulus* seedlings inoculated with spores of various ectomycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* 8: 81-86.
- Malajczuk, N., R.G. Lindermann, J. Kough y J.M. Trappe. 1981. Presence of vesicular-arbuscular mycorrhizae in *Eucalyptus* spp. and *Acacia* sp., and their absence in *Banksia* sp. after

- inoculation with *Glomus fasciculatus*. *New Phytologist* 87: 567-572.
- Marx, D.H., J.L. Ruelle y C.E. Cordell. 1994. Methods for studying nursery and field response of trees to specific ectomycorrhiza. pp. 383-411. *In*: Norris, J.R., D.J. Read y A.K. Varma (eds.). *Techniques for mycorrhizal research, Methods in Microbiology*. Academic Press. London, UK.
- Miller, R.M. y J.D. Jastrow. 1992. The role of mycorrhizal fungi in soil conservation. pp. 29-44. *In*: Bethlenfalvay, G.L. y R.G. Linderman (eds.). *Mycorrhizae in sustainable agriculture*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Morales-Luis, R., O.L. Palacios-Vélez, L. Marín-Stillman y S. Peña-Díaz. 2000. Dirección de flujo y clasificación del agua subterránea en Monte Alegre, Sierra del Ajusco, México. *Agrociencia* 34: 677-687.
- Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Wantable y L.A. Dean 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Circular 939. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Pérez-Moreno, J. y D.J. Read. 2000. Mobilization and transfer of nutrients from litter to tree seedlings via the vegetative mycelium of ectomycorrhizal plants. *New Phytologist* 145: 301-309.
- Pérez-Moreno, J. y D.J. Read. 2001a. Exploitation of pollen by mycorrhizal mycelial systems with special reference to nutrient recycling in boreal forests. *Proceedings of the Royal Society of London B* 268: 1329-1335.
- Pérez-Moreno, J. y D.J. Read. 2001b. Nutrient transfer from soil nematodes to plants: A direct pathway provided by the mycorrhizal mycelial network. *Plant, Cell Environ.* 24: 1219-1226.
- Pérez-Moreno, J., R. Ferrera-Cerrato, E. Pérez-Silva y R. García-Espinoza. 1993. Ecología de diversos macromicetos ectomicorrízicos y saprobios del Parque Nacional Zoquiapan, estado de México. *Agrociencia (serie Recursos Naturales Renovables)* 3: 7-21.
- Phillips, J.A. y D.S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society* 55: 158-161.
- Plascencia-Escalante, F.O., J. Vargas-Hernández, R. Ferrera-Cerrato y V.A. González-Hernández. 1997. Efecto de la micorriza vesículo-arbuscular sobre el crecimiento y distribución de biomasa de plántulas de eucalipto. *Terra* 15: 7-14.
- Read, D.J. y J. Pérez-Moreno. 2003. Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems - a journey towards relevance? *New Phytologist* 157: 475-492.
- Smith, S.E. y D.J. Read. 1997. *Mycorrhizal symbiosis*. 2nd ed. Academic Press. London, UK.
- Tisdal, J.M. 1994. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant Soil* 159: 115-121.
- Wallander, H., L.O. Nilson, D. Hagerberg y E. Baat. 2001. Estimation of the biomass and seasonal growth of external mycelium of ectomycorrhizal fungi in the field. *New Phytologist* 151: 753-760.
- Wright, S.F. y A. Upadhyaya. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci.* 161: 575-586.
- Wright, S.F. y A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198: 97-107.
- Wright, S.F., M. Franke-Snyder, J.B. Morton y A. Upadhyaya. 1996. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant Soil* 181: 193-203.
- Yamaji, K., Y. Fukushi, Y. Hashidoko, T. Yoshida y S. Tahara. 2001. *Penicillium* fungi from *Picea glehnii* seeds protect the seedlings from damping-off. *New Phytologist* 152: 521-531.

METODOLOGÍA PARA ESTIMAR PÉRDIDAS POR INFILTRACIÓN EN CANALES DE TIERRA

Methodology to Estimate Losses by Infiltration in Soil Channels

Adolfo Exebio-García^{1‡}, Enrique Palacios-Vélez¹, Enrique Mejía-Saenz¹ y Víctor Ruiz-Carmona²

RESUMEN

La baja eficiencia en el uso del agua de riego, parámetro que expresa la magnitud de las pérdidas del agua en los sistemas de riego de México, es de apenas 46 por ciento. Aunado a que en el ámbito técnico no existe una metodología contrastada de campo y de modelación matemática para evaluar la eficiencia de conducción en su componente de pérdidas por infiltración, en este trabajo se desarrolló una metodología basada en la ecuación bidimensional de Richards, para modelar la transferencia del agua en el suelo, con la finalidad de estimar las pérdidas por infiltración en canales de tierra. Para la solución de dicha ecuación, se aplicó el método de elemento finito, multiplicando la ecuación por una función de peso e integrándola, usando el teorema de Green, sobre el dominio de la solución limitada por las condiciones de frontera, y discretizando dicho dominio en pequeños triángulos, que constituyen los elementos finitos. El proceso se simuló y se evaluó utilizando las características geométricas, hidráulicas, hidrodinámicas y operacionales del canal de tierra Antonio Coria, del Distrito de Riego 011 Alto Lerma, Guanajuato, México. Los resultados obtenidos de pérdidas por infiltración son congruentes con las mediciones de campo, por lo que la metodología puede utilizarse en la estimación de pérdidas por infiltración en canales de tierra, y la consideración de dicha variable en la elaboración de los programas de extracción y distribución de agua en los sistemas de riego.

Palabras clave: Darcy, sistema de riego, sección hidráulica.

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

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

² Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 62550 Jiutepec, Morelos, México.

SUMMARY

The low efficiency in the use of water for irrigation is the parameter that expresses the magnitude of water losses in the irrigation systems; in Mexico it is about 46 per cent. In the technical context, there is no contrasted field methodology or mathematical model to evaluate the conduction efficiency in its component of infiltration losses. This work developed a methodology based on the bi-dimensional equation of Richards for modeling water transference in the soil, to estimate losses by infiltration in soil channels. To solve this equation, the finite element method was applied, multiplying the equation by a weight function and integrating it using Green's theorem, on the domain of the limited solution by boundary conditions, and transforming that domain into small triangles, which constitute the finite elements. The process was simulated and evaluated using the geometric, hydraulic, hydrodynamic, and operational characteristics of the soil channel Antonio Coria, of the Irrigation District 011, Alto Lerma, Guanajuato, Mexico. The results obtained with the model are congruent with the observations and measurements in the field. Therefore the methodology can be used as a tool to estimate infiltration losses in soil channels, and to consider this variable in the development of water extraction and distribution programs in irrigation systems.

Index words: Darcy, irrigation system, hydraulic section.

INTRODUCCIÓN

En México, los consumidores más grandes del agua son los 81 distritos de riego y las 48 mil unidades de riego, los cuales registran una pobre eficiencia en el consumo: de 46 por ciento, cantidad que, según la Comisión Nacional del Agua, podría alcanzar 60 por ciento con el empleo de tecnologías e infraestructura avanzadas (Zavala y Saucedo, 2000). Dada la magnitud de los volúmenes extraídos para

riego, con incrementos modestos en la eficiencia de los sistemas de conducción, distribución y aplicación del agua, en dichos sistemas de riego, permitirían liberar volúmenes apreciables para otros usos en diversas regiones (CNA, 2000).

Pese a la importancia cuantitativa que reflejan las cifras anteriores, la valoración de la eficiencia del uso del agua en los distritos de riego, parámetro que expresa la magnitud de las pérdidas de agua, se realiza habitualmente asignando un valor arbitrario establecido con criterios subjetivos. En las unidades de riego ni siquiera estos valores subjetivos se usan.

Para llevar el agua desde la fuente de abastecimiento a la parcela del usuario, es necesario conducirla por un sistema de canales y obras de control, que permiten su distribución entre las diferentes unidades, zonas y secciones de riego, hasta llegar a cada una de las parcelas que requieren del riego y concluye en la zona radicular de los cultivos. Este recorrido, durante el cual se producen diversas pérdidas que merman el aprovechamiento del agua, se considera dividido en tres tramos: red de conducción, red de distribución e interparcelario, y las parcelas. En cada uno de los tramos citados, las pérdidas se tratan y se cuantifican en cierta forma independiente, lo que da lugar a tres eficiencias: eficiencia de conducción (E_c), eficiencia de distribución (E_d) y eficiencia de aplicación (E_a).

Se estima que, en promedio, de los distritos de riego de México, donde existen estadísticas hidrométricas, se pierde 40% del agua en la conducción y distribución. No obstante, debe recordarse que no toda el agua se desperdicia, ya que parte va a los acuíferos y, posteriormente, puede ser aprovechada nuevamente; sin embargo, en los distritos de riego costeros, la mayor parte del agua perdida se va hacia el mar, sin que sea posible su utilización (Palacios, 1996). Las pérdidas de conducción y distribución pueden subdividirse de acuerdo con su origen en: a) por infiltración; b) por evaporación; c) por fugas en las estructuras en mal estado; y d) por manejo del agua en la red de distribución.

En los distritos de riego de México, de un total de 48 367 km de canales de conducción y distribución de agua para el riego de cultivos, existen 26 959 km de canales de tierra, sin considerar los canales sin revestir en las unidades de riego, donde las pérdidas de agua por infiltración constituyen hasta más de 20% de las pérdidas totales del agua utilizada en la agricultura (Palacios, 1996). Por lo tanto, los objetivos de este

trabajo fueron desarrollar una metodología para cuantificar y evaluar las pérdidas por infiltración en la red de conducción y distribución de canales de tierra de un sistema de riego, a partir de la utilización de métodos experimentales de campo y de modelación matemática, con aplicación a un estudio de caso en el canal de tierra Antonio Coria, del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

MATERIALES Y MÉTODOS

El canal Coria se encuentra ubicado en el Estado de Guanajuato y forma parte de la red de canales principales del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, cuyas coordenadas geográficas medias son 19° 55' N y 99° 39' O. Tiene su inicio en el partidor Lomo de Toro, aguas abajo de la presa Solís, y sirve como canal de conducción y distribución de agua de riego para los módulos de Cortazar, Huanímaro, Irapuato, Abasolo y Corralejo. La longitud del canal se ubica dentro del módulo Cortazar y, en su recorrido hasta el kilómetro 70+690, se identificaron 20 secciones representativas, con geometrías diferentes, desde trapezoidal entre los km 0+000 y 12+340 y aproximadamente parabólica hasta el km 70+690; con algunas secciones irregulares entre los km 57+521 y 63+551. En este tramo del canal hay una pendiente promedio de 0.00015837 equivalente a 0.015 m km⁻¹.

Para este trabajo, se desarrollaron las siguientes actividades:

- 1) Levantamiento topográfico de las secciones representativas del canal Antonio Coria.
- 2) Selección de sitios para la obtención de muestras alteradas e inalteradas; para la estimación la conductividad hidráulica, para análisis de las propiedades físicas, químicas, hidrodinámicas, análisis micromorfológico y mineralógico, pruebas de conductividad hidráulica en cada capa del suelo por el método del pozo invertido, realización de pruebas de infiltración con el método del doble cilindro, y obtención de muestras para la caracterización hidrodinámica de cada capa del perfil del suelo.
- 3) Instalación y monitoreo de baterías de piezómetros en cada sección hidráulica representativa del canal Antonio Coria durante el tiempo de operación del canal para el ciclo otoño-invierno.
- 4) Ubicación de pozos profundos de agua subterránea para uso agrícola, paralelos al canal Antonio Coria, para análisis de los perfiles litológicos y medición de los niveles estáticos.

- 5) Realización de aforos con repeticiones en el canal Antonio Coria, con la finalidad de cuantificar las pérdidas por infiltración.
- 6) Estimación de tiempos de operación de los tirantes en cada una de las secciones hidráulicas representativas del canal Antonio Coria para estimar el área promedio del perímetro mojado.
- 7) Adaptación del programa de computo CANALIN 2D (Zavala y Saucedo, 2000), para simular y cuantificar el fenómeno de la infiltración.

METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para cuantificar y evaluar las pérdidas por infiltración se basa en métodos experimentales de campo y de modelación matemática. Para la estimación de las pérdidas por infiltración en campo en el cauce del canal Coria, se seleccionaron sitios de muestreo para obtener información básica sobre las variables físicas e hidrodinámicas del suelo de dicho cauce. Específicamente se hicieron mediciones de infiltración, de conductividad hidráulica, de profundidad del manto freático, de aforos de gastos conducidos por el canal, así como la toma de datos de pruebas piezométricas y la toma de muestras de suelo a diferentes profundidades para determinar y relacionar sus características físicas, morfológicas y mineralógicas con el proceso de infiltración. Las estimaciones y el comportamiento de las pérdidas por infiltración en condiciones de campo fueron similares a las estimadas con el modelo de simulación.

El modelo matemático se basa en la solución numérica por el método de elementos finitos de la ecuación de flujo bidimensional propuesta por Richards (1931), definiendo previamente el dominio de la solución y las condiciones de frontera, con base en las mediciones y observaciones de campo, para finalmente simular el comportamiento del flujo del agua en el perfil del suelo, y cuantificar y evaluar las pérdidas por infiltración, en el canal Antonio Coria.

En el análisis y modelación matemática de la infiltración en canales de tierra, se considera al suelo como un medio continuo, indeformable, saturado o parcialmente saturado, sin tomar en cuenta el efecto de histéresis, ni la absorción del agua por las raíces, lo cual es razonable y observable en el cauce del canal Antonio Coria, sobre todo en la sección hidráulica del mismo, de acuerdo con las propiedades hidrodinámicas del suelo, de las políticas de operación y de la ausencia de vegetación en dicha sección.

Con tales antecedentes, el desarrollo de la metodología se basa en la aplicación del principio de conservación de la masa a un volumen elemental de suelo, considerado indeformable. Esto conduce a la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (1)$$

donde: θ es el volumen de agua por unidad de volumen de suelo o contenido volumétrico de agua [$L^3 L^{-3}$], q es el volumen de agua que atraviesa en la unidad de tiempo (gasto volumétrico) una superficie unitaria de suelo expuesta perpendicularmente a la dirección del movimiento, o flujo del agua [LT^{-1}];

Utilizando la ley de Darcy para el cálculo del campo de velocidades:

$$\mathbf{q} = -K(\psi)\nabla H; \quad H = y - z \quad (2)$$

donde: H es el potencial hidráulico [L], igual a la suma del potencial de presión del agua en el suelo (ψ) y del potencial gravitacional asimilado a la coordenada vertical (z) [L], orientada positivamente hacia abajo; $K = K(\psi)$ es un coeficiente empírico denominado conductividad hidráulica [LT^{-1}] y que en un suelo parcialmente saturado es una función del potencial de presión,

Se obtiene la ecuación de Richards (1931), al definir $C(\psi) = d\theta/d\psi$, denominada la capacidad específica de humedad del suelo:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [K(\psi)\nabla \psi] - \frac{dK}{d\psi} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (3)$$

donde: ψ es el potencial de presión del agua en el suelo [L], expresado como la altura de una columna equivalente de agua (positivo en la zona saturada y negativo en la zona no saturada del suelo), $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ es el operador gradiente; x, y, z son las coordenadas espaciales [L] y t el tiempo [T].

En este trabajo, se presenta la aplicación de la ecuación de Richards para modelar la transferencia de agua en el suelo, cuando se tiene como fuente de abastecimiento un canal de tierra. Con el propósito de reducir el esfuerzo de cómputo requerido para resolver la Ecuación 3, se acepta la hipótesis de que las variaciones en las condiciones del agua en el suelo

son despreciables en la dirección que coincide con el desarrollo del canal y , por lo tanto, la forma de la Ecuación 3 utilizada es:

$$C(y) \frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(y) \frac{\partial y}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(y) \left(\frac{\partial y}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

El dominio de la solución, que corresponde al caso en que se acepta la hipótesis indicada anteriormente, se muestra en la Figura 1.

Condiciones Límite

Para modelar la transferencia de agua desde un canal, la ecuación bidimensional de Richards se resuelve sobre el dominio indicado en la Figura 1, sujeta a las condiciones inicial y de frontera:

Condición inicial. En el dominio de la solución, ésta especifica el potencial como una función conocida del espacio en $t = 0$; por lo tanto, el potencial (ψ) queda expresado como:

$$y = y_0(x, z) \quad (5)$$

Condición de frontera. Ésta corresponde a las características geométricas e hidráulicas que se presentan en el cauce del canal, incluyendo el espejo de agua o la sección hidráulica, así como la superficie del suelo y la profundidad media del nivel del manto freático.

a) En la superficie del suelo y en el bordo libre del canal. A B, B C y H I, I J son fronteras tipo Neumann con flujo prescrito igual al valor de la evaporación. En este caso, la condición de frontera es de segundo orden, debido a que puede asumirse el flujo prescrito, teniendo en cuenta la evaporación media que se presenta en la zona del canal Coria, es decir, se conoce el gradiente de la incógnita en la dirección de la normal hacia fuera de la frontera de dominio, pudiendo expresarle como:

$$-K(y) \frac{\partial(y-z)}{\partial z} = q_e \quad (x, z) \in AB \quad t > 0 \quad (6)$$

$$-K(y) \frac{\partial(y-z)}{\partial z} = q_e \quad z = 0 \quad x \in BC \quad t > 0 \quad (7)$$

$$-K(y) \frac{\partial(y-z)}{\partial z} = q_e \quad z = 0 \quad x \in HI \quad t > 0 \quad (8)$$

$$-K(y) \frac{\partial(y-z)}{\partial z} = q_e \quad (x, z) \in IJ \quad t > 0 \quad (9)$$

b) Para las fronteras laterales del dominio de la solución. C D y G H son fronteras impermeables o de flujo nulo (tipo Neumann). Para esto se concluye que el gradiente en la dirección horizontal es nulo, por lo que el flujo en la frontera se efectúa únicamente en la dirección vertical. Esto significa que los puntos simétricos a ambos lados de la frontera tienen la misma carga hidráulica (h) por lo que el gradiente y , por lo tanto el flujo, es nulo. Estas fronteras pueden expresarse como:

$$-K(y) \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad x = L/2 \quad z \in CD \quad t > 0 \quad (10)$$

$$-K(y) \frac{\partial(y-z)}{\partial z} = 0 \quad x = -L/2 \quad z \in GH \quad t > 0 \quad (11)$$

c) Frontera inferior al nivel del manto freático. En la frontera D E y F G se ha tenido en cuenta una condición de frontera tipo Neumann con flujo prescrito de tal forma que se permita la elevación del nivel freático hasta una cierta profundidad con respecto a la superficie del suelo. Lo anterior se hace con la finalidad de mantener correspondencia con las observaciones de campo realizadas con respecto a la profundidad del nivel freático. Las fronteras D E y F G se expresan de la forma:

$$-K(y) \frac{\partial y}{\partial x} = Ks/10 \quad x = -L/2 \quad z \in DE \quad t > 0 \quad (12)$$

$$-K(y) \frac{\partial y}{\partial x} = Ks/10 \quad x = L/2 \quad z \in FG \quad t > 0 \quad (13)$$

d) Frontera del perímetro mojado. En la frontera de la sección transversal del canal JA, se considera una condición de frontera tipo Dirichlet, donde se conoce la variable dependiente, definida a partir del tirante de agua observado en el canal durante la operación del mismo y que toma dos valores durante el proceso de simulación.

$$y = h \quad (x, z) \in JA \quad t > 0$$

donde: h es el tirante del agua en el canal.

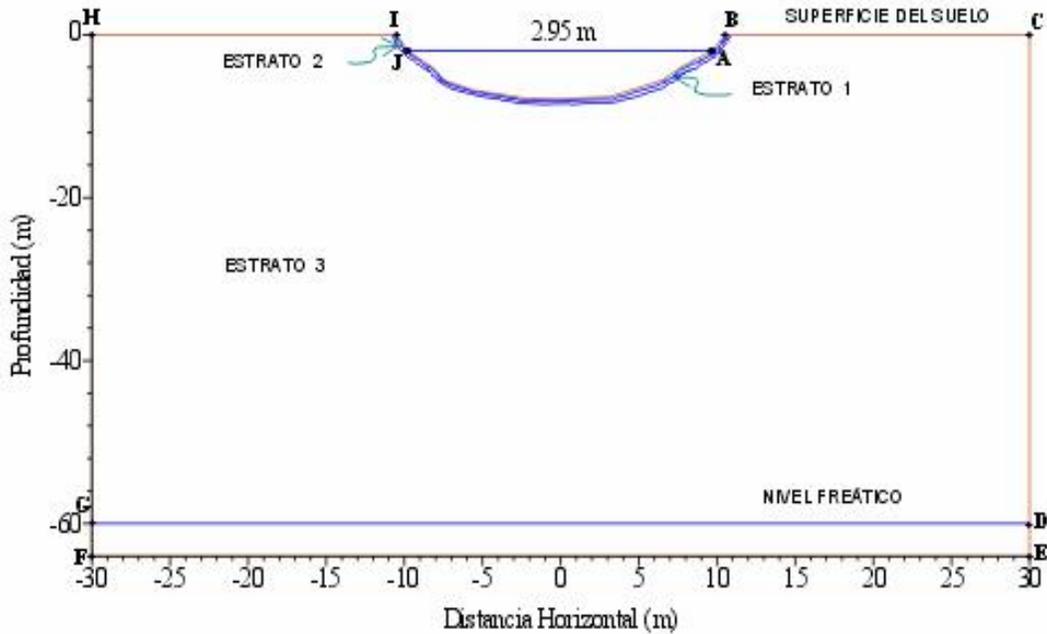


Figura 1. Dominio de la solución.

Características Hidrodinámicas

Para la solución de la ecuación de Richards es indispensable representar las propiedades hidrodinámicas del suelo expresando el potencial de presión (ψ) como una función del contenido volumétrico de agua (θ) y la conductividad hidráulica K como una función de θ .

Debido a la facilidad que presentan para identificar sus parámetros, Fuentes *et al.* (1992) recomendaron utilizar la combinación de la conductividad $K(\theta)$ de Brooks y Corey (1964) y de la característica de humedad $\theta(\psi)$ de Van Genuchten (1980) con la restricción del modelo de Burdine (1953). La característica de humedad de Van Genuchten (1980) se escribe como:

$$\Theta(y) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{y}{y_d} \right)^n \right]^m} \tag{14}$$

donde: Θ representa el grado de saturación:

$$\Theta = \frac{q - q_r}{q_s - q_r} \tag{15}$$

La restricción de Burdine implica considerar $m = 1 - 2/n$. En las ecuaciones anteriores, θ_s es el contenido volumétrico de agua a saturación efectiva, θ_r es un contenido de agua residual (Brooks y Corey, 1964), ψ_d , m y n son parámetros empíricos. La conductividad de Brooks y Corey (1964) es representada por:

$$\frac{K(q)}{K_s} = \Theta^h \tag{16}$$

siendo K_s la conductividad hidráulica que presenta el suelo cuando se encuentra saturado.

Aplicación del Método del Elemento Finito

La aplicación del método del elemento finito a la ecuación de Richards se encuentra ampliamente documentada en la literatura (e.g. Huyakorn y Pinder, 1983), motivo por el cual en este trabajo se muestra en forma compacta el procedimiento de su aplicación.

Obtención de la Forma Débil

Se multiplica la ecuación de Richards bidimensional (3) por una función de peso (v). Se integra usando el Teorema de Green sobre el dominio

de solución (R) limitado por la frontera \mathfrak{R} y se obtiene:

$$\int_R C(y) \frac{\mathfrak{f}_y}{\mathfrak{f}_t} v dR + \int_R K(y) \left[\frac{\mathfrak{f}_y}{\mathfrak{f}_z} \frac{\mathfrak{f}_v}{\mathfrak{f}_z} + \frac{\mathfrak{f}_y}{\mathfrak{f}_x} \frac{\mathfrak{f}_v}{\mathfrak{f}_x} \right] dR = \int_R K(y) \frac{\mathfrak{f}_v}{\mathfrak{f}_z} dR + \int_{\mathfrak{R}} qv d\mathfrak{R} \quad (17)$$

donde: q es el flujo en la dirección de la normal hacia afuera prescrito en una frontera en condición de Neumann.

Discretización del Dominio de Solución

El dominio de solución se divide en pequeños triángulos que constituyen los elementos finitos cuyo tamaño se hace menor en la sección transversal del canal y la superficie del suelo debido a que en estas zonas se esperan los mayores gradientes de flujo. Se utilizan funciones de base bidimensionales lineales, denotadas como $\varphi_j(x, z)$, que se definen con relación a la función delta de Kronecker, i.e. son funciones unitarias en un nudo en particular y cero en el resto del dominio.

Funciones de Base

Las funciones de base bidimensionales se definen en relación con la función delta de Kronecker:

$$j_j(x, z) = d(x_j, z_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x, z) = (x_j, z_j) \\ 0 & \text{si } (x, z) \neq (x_j, z_j) \end{cases} \quad (18)$$

Desarrollo del Esquema

Se propone la solución de la Ecuación 17 como una combinación lineal de las funciones de base escrita por separado para los nodos interiores (n) y para los de frontera sujetos a una condición esencial (tipo Dirichlet no homogénea):

$$y_n(x, z, t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) j_j(x, z) + \sum_{j=n+1}^{n+n} b_j(t) j_j(x, z) \quad (19)$$

Se sustituye en la forma débil (17) teniendo en cuenta lo siguiente: i). Se consideran las funciones de peso (v) iguales a las funciones de base (φ), correspondientes a los nudos interiores. ii). Se asume

una variación lineal de las características hidrodinámicas sobre cada elemento, expresándola mediante las funciones de forma, i.e. $\hat{C} = j_g C_g$ y $\hat{K} = j_g K_g$. iii). Se utiliza un sistema de masa concentrado con la finalidad de obtener una matriz diagonal y para mejorar la estabilidad del esquema (Neumann, 1973; Mori, 1980).

Al sustituir la solución de elemento finito en la forma débil de la ecuación de Richards, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$M \frac{da}{dt} K a = B + Q + L B + B f \quad (20)$$

La definición de las matrices se presenta a continuación, así como su forma de cálculo cuando se utilizan funciones de base lineales:

$$M_{kj} = \sum_{j=1}^n \left[C_g \int_R j_g j_k dR \right] = \sum_e C_j \frac{\Delta}{3} \quad (21)$$

$$K_{kj} = \sum_{j=1}^n \left[K_g \int_R j_g \left(\frac{j_j}{\mathfrak{f}_x} \frac{j_k}{\mathfrak{f}_x} + \frac{j_j}{\mathfrak{f}_z} \frac{j_k}{\mathfrak{f}_z} \right) dR \right] = \quad (22)$$

$$\sum_e \frac{\bar{K}}{4\Delta} (m_j m_k + p_j p_k)$$

$$B_k = K_g \int_R j_g \frac{j_k}{\mathfrak{f}_z} dR = \sum_e \frac{\bar{K}}{2} p_k \quad (23)$$

$$Q_k = \int_{\Gamma} q j_k d\Gamma = \sum_e \frac{q L_j}{2} \quad (24)$$

En las ecuaciones anteriores se ha denotado como \bar{j} a las funciones denominadas de masa concentrada, definidas como funciones unitarias en la región baricéntrica correspondiente a un nudo específico, y cero en el resto del dominio. Δ es el área del elemento, \bar{K} es la conductividad en el elemento tomada como el promedio aritmético, C_j es la capacidad específica en el nodo j, L_j es la longitud de frontera correspondiente a cada nudo en condición de Neumann, m y p son factores geométricos definidos según las funciones de base:

$$m_i = z_j - z_k, \quad p_i = x_j - x_k$$

donde: los subíndices i , j , y k corresponden a las esquinas del elemento triangular y corren sobre sus tres posibles permutaciones secuenciadas.

La matriz de rigidez (L_{kj}) y el término convectivo (Bf_j), correspondientes a los nodos de la frontera, se calculan de forma semejante a la utilizada para los nodos interiores, considerando las propiedades geométricas y características hidrodinámicas de los nodos de frontera.

Integración en el Tiempo: Diferencias Finitas

La integración en el tiempo del sistema (20) se realiza utilizando una aproximación en diferencias finitas. La derivada temporal y las incógnitas del sistema se aproximan como:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)^{k+w} = \frac{a^{k+1} - a^k}{\Delta t}, \quad (25a)$$

$$a^{k+w} = \omega a^{k+1} + (1 - \omega)a^k \quad (25b)$$

donde: ω es un factor de ponderación en el tiempo, k y Δt representan el nivel y el paso de tiempo, respectivamente. Se sustituye 25b en 25a y se obtiene el siguiente esquema numérico para la ecuación de Richards bidimensional:

$$\left[\frac{M^{k+w}}{\Delta t} + w\mathbf{K}^{k+w} \right] \mathbf{a}^{k+1} = \left[\frac{M^{k+w}}{\Delta t} - (1 - \omega)\mathbf{K}^{k+w} \right] \mathbf{a}^k + \mathbf{B}^{k+w} + \mathbf{Q}^{k+w} - \mathbf{L}^{k+w} \mathbf{b} + \mathbf{B}_f^{k+w} \quad (26)$$

En las simulaciones se ha utilizado un valor del factor de peso $\omega = 1/2$, que permite obtener una aproximación de segundo orden para la derivada temporal.

Cálculo del Gasto de Infiltración

El gasto de infiltración se calcula como el cociente entre el volumen infiltrado en un intervalo de tiempo y el paso de tiempo:

$$Q = \frac{VI}{\Delta t} \quad (27)$$

El volumen infiltrado es calculado como la diferencia en el volumen de agua que existe en el

dominio de solución al inicio y al final de un intervalo de tiempo, siendo calculado el volumen de agua mediante una integración numérica del contenido volumétrico de agua en el dominio de solución, esto es:

$$VI = \int_R [q(x, z, t + \Delta t) - q(x, z, t)] dR \quad (28)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para ayudar a explicar el fenómeno del comportamiento de la infiltración del agua en el canal Antonio Coria, se asocia la infiltración con las características observadas en el perfil del suelo. Este perfil presenta una resistencia a la infiltración del agua, debido, en primer instancia, a la textura arcillosa del suelo en que se construyó y a la política de operación del canal. Por esta razón, es fundamental describir el proceso de formación de la capa sobre la superficie (0 a 7 cm) de textura arcillosa y estructura anisotrópica que supone un acomodo de partículas que facilita el sellamiento de los poros. Consideración que se corrobora con respecto a la distribución y al tamaño de poros y a la microestructura definida en las láminas delgadas, en el análisis micromorfológico 2:1 de la capa superficial.

La formación de la capa de 0 a 7 cm obedece a la política de operación del canal Coria, donde el canal está diseñado y operado con estructuras de compuertas o repesos cada cierto kilometraje, y entre cada dos repesos consecutivos se llena el "vaso" para mantener un cierto tirante, para dar servicio a los canales laterales. En el siguiente año agrícola y en los ciclos correspondientes, se repite la misma operación, variando el tirante con poca frecuencia, lo cual permite la sedimentación de partículas. Esta sedimentación se encuentra bien identificada.

La sedimentación de las partículas vistas en la profundidad de 0 a 7 cm es similar a la que puede esperarse en un estanque o lago, sólo que por razones obvias, el espesor (7 cm) es muy delgado. Esto quiere decir entonces que al permitir la sedimentación, existe una capa impermeable debajo de esa zona de depositación, en este caso, a la profundidad de 7 a 50 cm. La capa impermeable está representada por un estrato arcilloso de conductividad hidráulica y permeabilidad muy lenta, que evita, además, el proceso de lavado, ya que a esta profundidad no se encontraron rastros de iluviación, por ejemplo de arcilla u otro material revistiendo los pedos.

Cuadro 1. Resultados de análisis de suelos.

Capa	Profundidad	pH	Materia orgánica	Densidad aparente	Arcilla	Limo	Arena	Clasificación textural
	cm		%	g cm ⁻³	- - - - - % - - - - -			
1	0 a 7	7.18	0.89	1.37	50	18	32	Arcilloso
2	7 a 50	6.94	1.34	1.48	58	19	23	Arcilloso
3	50 a 88	7.75	0.13	1.40	4	23	73	Franco arenoso

Resumiendo, las características físicas, morfológicas y mineralógicas de la capa de suelo de 0 a 7 cm, condicionan y restringen el comportamiento y la magnitud de las pérdidas por infiltración en el canal Coria.

En el Cuadro 1, se anotan las características de las capas del perfil del suelo del canal Coria.

La caracterización hidrodinámica de cada capa del perfil del suelo, se llevó a cabo desarrollando pruebas de infiltración y de conductividad hidráulica, en campo y en laboratorio. Con la finalidad de estimar los valores de los parámetros ψ_d y K_s , se desarrollaron curvas granulométricas correspondientes al suelo de cada estrato, para estimar los parámetros de forma m , n y η . En el Cuadro 2, se presentan los valores de los parámetros hidrodinámicos estimados.

Para la simplificación del modelo y considerando el análisis de los perfiles litológicos de los pozos de agua subterránea muestreados, se considera que el suelo a una profundidad mayor que 58 cm tiene los mismos parámetros hidráulicos.

Se ha tenido en cuenta que las líneas, que delimitan los estratos, no intersecten los lados de los triángulos que definen los elementos finitos para evitar ambigüedad en el cálculo de los valores medios de las propiedades hidrodinámicas en los mismos (Ziemkiewicz, 1994).

En la Figura 2, se observa como evoluciona el gasto infiltrado en el tiempo, en el perfil del suelo, correspondiente a la sección hidráulica simulada del canal Coria, para un tiempo de operación máxima de 180 días en un año agrícola, sin embargo, es necesario anotar que el tiempo de simulación es continuo, es

decir, no se interrumpió el proceso de infiltración, como ocurre realmente en el canal.

En la Figura 2, se observa que el gasto infiltrado al inicio del proceso de simulación es del orden de 1.2×10^{-4} mismo que, después de un lapso de alrededor de 24 h, comienza a estabilizarse, hasta llegar al tercer día en que prácticamente se estabiliza con un gasto de infiltración de 4.7×10^{-5} m³/s.d. Este gasto corresponde al tirante máximo de operación por un lapso de 45 días, del orden de 2.95 m.

La pérdida por infiltración alcanzó valores en condiciones cuasi-permanentes que dependen de la carga en el canal, debido a que un cambio en la carga origina una variación en el perímetro mojado. Se obtuvo un gasto $Q_{\min} = 4.697 \times 10^{-5}$ m³/s.d para la carga $h = 2.95$ m y $Q_{\min} = 3.345 \times 10^{-5}$ m³/s.d para la carga $h = 1.98$ m. El promedio ponderado es $Q_{\min} = 3.683 \times 10^{-5}$ m³/s.d que es similar al valor observado en campo de $Q_{\min} = 4.1 \times 10^{-5}$ m³/s.d.

En la Figura 3, puede observarse la evolución del volumen infiltrado en el tiempo. De acuerdo con esta gráfica, en el canal Coria se pierden 500 m³ m⁻¹ a los 150 días de operación, tiempo promedio de operación del canal para un año hidrológico promedio; por kilómetro se tendrían 500 000 m³, equivalentes a 3333 m³ d⁻¹, que equivaldría a 38.5 L s⁻¹, como gasto promedio de pérdidas por infiltración en el canal Coria.

Asumiendo que las pérdidas son proporcionales, en el tramo del canal de conducción del Coria, en el módulo que comprende 72 480 m de longitud, se

Cuadro 2. Parámetros hidráulicos de los suelos.

Capa	Profundidad	θ_s	ψ_d	m	n	η	K_s
	cm	m ³ m ⁻³	m				m h ⁻¹
1	0 a 7	0.460	-0.50	0.088	2.193	15.380	1.63×10^{-3}
2	7 a 50	0.487	-0.75	0.094	2.207	14.540	3.06×10^{-3}
3	50 a 88	0.472	-0.25	0.242	2.642	5.660	12.34×10^{-3}

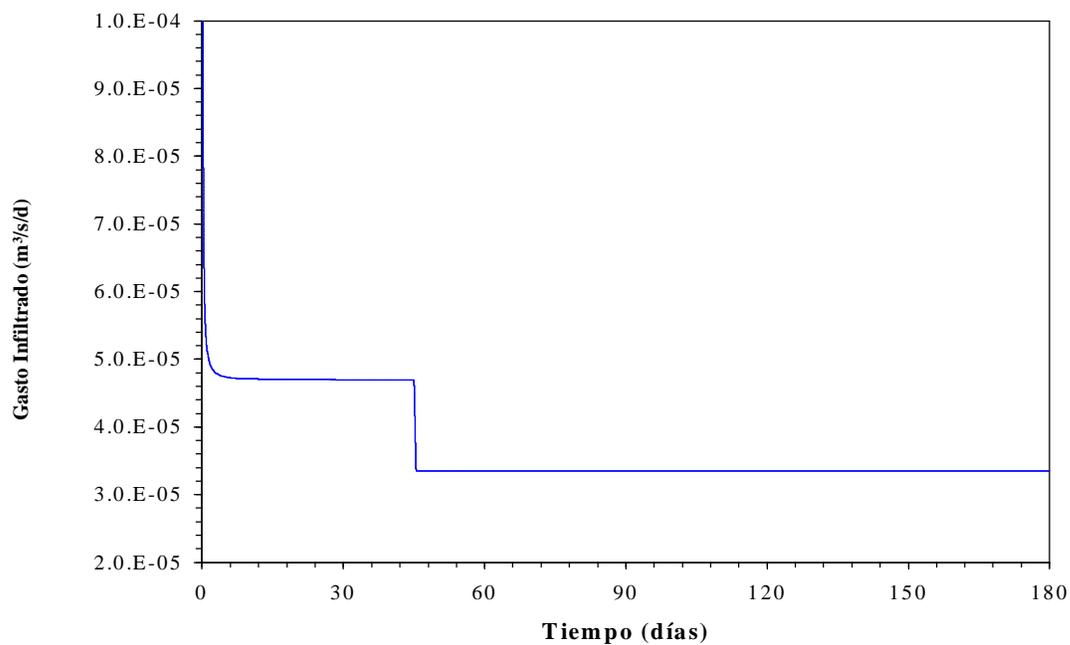


Figura 2. Variación en el tiempo del gasto infiltrado.

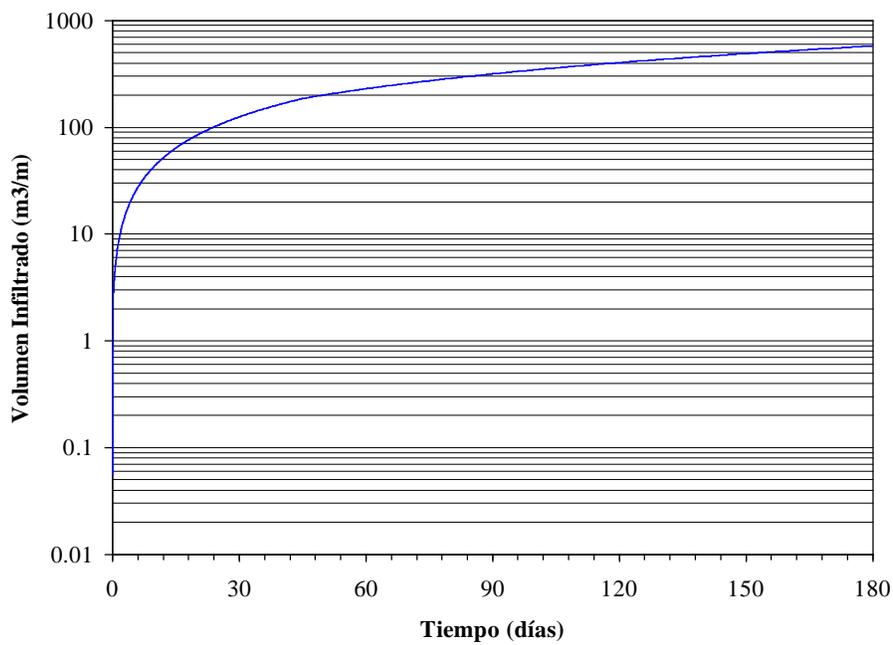


Figura 3. Evolución del volumen infiltrado.

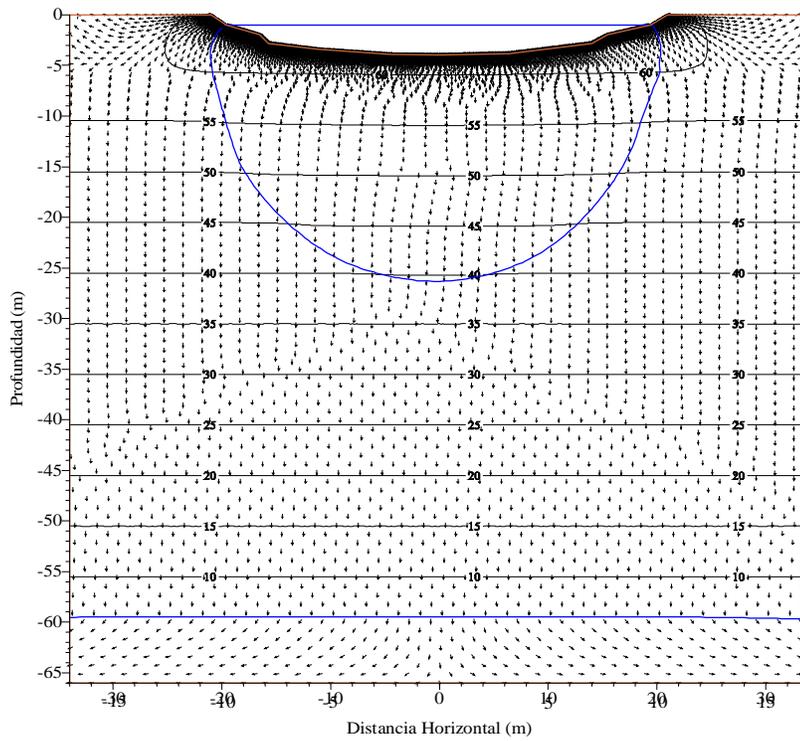


Figura 4. Equipotenciales y campo de velocidades a 15 días.

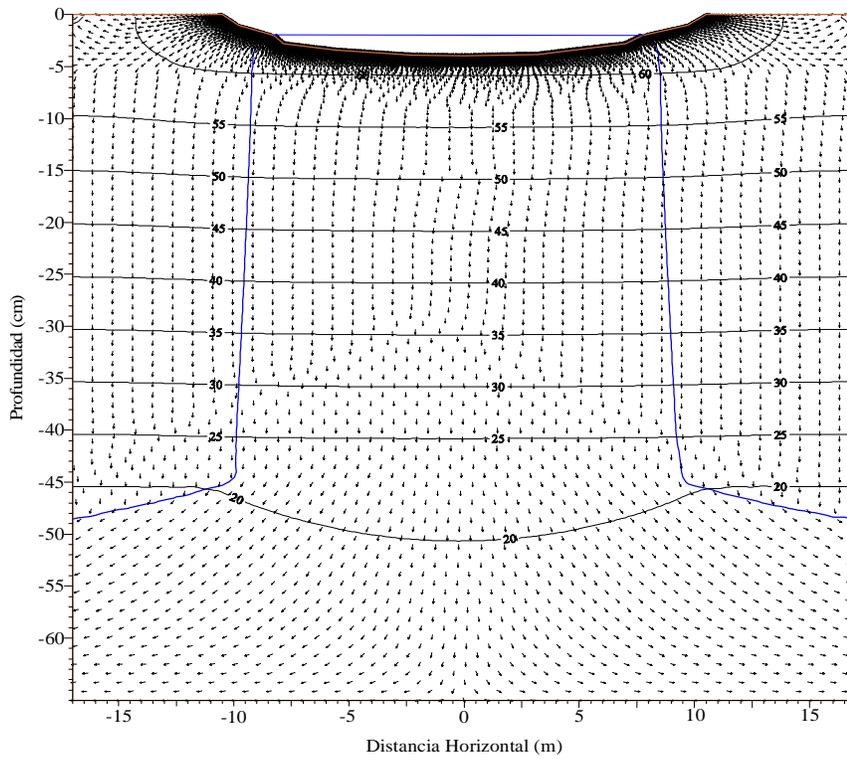


Figura 5. Equipotenciales y campo de velocidades a seis meses.

tendría una pérdida de 36 240 millares de metros cúbicos, en promedio en un año agrícola normal. Considerando que el volumen bruto que conduce el canal Coria para servir a los módulos de Cortazar, Irapuato, Abasolo, Huanímaro y Corralejo es del orden de 270 000 millares, se tendría una pérdida promedio por infiltración del orden de 13.43%.

El proceso de transferencia del agua se presenta en las Figuras 4 y 5 donde se muestra la configuración de las líneas equipotenciales y el campo de velocidades correspondientes a 15 días y seis meses, y puede apreciarse que las variables hidráulicas guardan formas lógicas y hacen evidente la recarga que el canal proporciona al manto freático, asimismo permiten explicar el hecho de que en los piezómetros instalados cerca del canal no ha sido posible encontrar la posición del manto freático, puesto que la zona de filtración presenta una expansión predominantemente vertical a lo largo del tiempo.

Además, debe tenerse en cuenta que los estudios futuros deben encaminarse a la medición detallada del comportamiento del tirante de agua en el canal. Una vez dispuestas las mediciones, debe recurrirse al uso de modelos hidrodinámicos como las ecuaciones de Saint-Venant. Esto para aproximar el comportamiento del flujo superficial y realizar un acoplamiento entre dichos modelos y la ecuación de Richards. En una primera fase debería utilizarse una sección a lo largo del canal descrita por el modelo de flujo a superficie libre para utilizar los valores generados en la forma bidimensional de la ecuación de Richards. Una descripción más detallada del fenómeno se obtendría del acoplamiento de la ecuación de Richards tridimensional con las ecuaciones de Saint-Venant pero el esfuerzo de cómputo puede hacer que esta labor sea postergable.

CONCLUSIONES

Se desarrolla una metodología basada en el uso de la ecuación de Richards en su forma bidimensional, que permite estimar las pérdidas por infiltración en canales de tierra. En general, se ha observado que los resultados obtenidos mediante la aplicación del mismo, a través de un modelo de simulación, son congruentes con las mediciones de campo y, por lo tanto, el modelo puede constituir una herramienta de

apoyo en el diseño de los planes y programas de riego. La caracterización física, mineralógica y morfológica de las tres capas del perfil del suelo, del cauce del canal Coria, así como sus características hidrodinámicas asociadas al fenómeno de la infiltración, definen al suelo como una combinación de capas que presentan restricciones a la infiltración del agua. El comportamiento del suelo con respecto a las pérdidas de agua por infiltración, es consistente con el gasto promedio ponderado, considerando los tres estratos del perfil del suelo de las cargas del canal de 2.95 y 1.98 m, del orden de $3.683 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, que es comparable con el valor observado en campo, de $4.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Asimismo, para una longitud de 72 km y 150 días de operación del canal Coria, las pérdidas por infiltración fueron de 13%.

LITERATURA CITADA

- Brooks, R.H. y A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper 3. Colorado State University. Fort Collins, CO.
- Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculation from size distributions data. Trans. AIME 198: 171-199.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2000. El agua en México: Retos y avances. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Distrito Federal, México.
- Fuentes, C., R. Haverkamp y J.-Y. Parlange. 1992. Parameter constraints on closed-form soil water relationships. J. Hydrology 134: 117-142.
- Huyakorn, P.S. y G.F. Pinder. 1983. Computational methods in subsurface flow. Academic Press. San Diego, CA.
- Mori, M. 1980. The finite element method and its applications. Macmillan. New York.
- Neumann, S.P. 1973. Saturated-unsaturated seepage by finite elements. ASCE J. Hydraul. Div. 99-12: 2233-2250.
- Palacios-Vélez, E. 1996. Métodos de distribución y eficiencias en el uso del agua en los sistemas de riego. Diplomado en diagnóstico, planeación, uso eficiente del Agua y la Energía Eléctrica y mejoramiento de la productividad en las unidades de riego para el desarrollo rural. Colegio de Postgraduados.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1: 318-333.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.
- Zavala, M. y H. Saucedo. 2000. CANALID2D, modelo para la simulación de pérdidas por infiltración en canales. Informes de investigación doctoral presentado a la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zienkiewicz, O.C. y R.L. Taylor. 1994. El método de los elementos finitos. Vol. 1 y 2. McGraw Hill. Madrid, España.

ANILLADO Y ÁCIDO GIBERÉLICO EN LA PRODUCCIÓN, CALIDAD DEL FRUTO Y NIVEL NUTRIMENTAL EN MANDARINO ‘MÓNICA’

Girdling and Gibberellic Acid Sprays in Production, Fruit Quality and Nutrient Level in ‘Monica’ Mandarin

Gerardo Pérez-Madrid[†], Gustavo Almaguer-Vargas^{1,‡}, Ranferi Maldonado-Torres¹, Edilberto Avitia-García¹ y Ana María Castillo-González¹

RESUMEN

En la zona citrícola del estado de Veracruz, el cultivo de mandarino ‘Mónica’ (*Citrus reticulata* Blanco) representa una alternativa de producción al monocultivo del naranjo ‘Valencia’ tardía, sin embargo, este cultivar tiene bajo porcentaje de amarre de fruto. Para solucionar este problema, se anilló el tronco principal de los árboles en diferentes épocas y/o se aplicó 20 mg L⁻¹ de AG₃. El experimento se realizó en una huerta de mandarino ‘Mónica’ de 12 años de edad, en Álamo, Veracruz, injertado en naranjo agrio (*Citrus aurantium* L.) con un diseño en bloques al azar con siete repeticiones, tomando como unidad experimental un árbol. Cuando se aplicaron 20 mg L⁻¹ de AG₃ no hubo efecto significativo sobre el amarre de frutos; en cambio, la producción de los árboles anillados durante plena floración se incrementó hasta seis veces comparada con los árboles testigo, aunque se presentó una correlación negativa con el tamaño de fruto. No se encontraron diferencias estadísticas significativas en variables como sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT) y la relación SST/AT. No hubo efectos significativos de los tratamientos en la concentración nutrimental de las hojas para las fechas evaluadas.

Palabras clave: *Citrus reticulata* Blanco, amarre de fruto, nutrición foliar.

SUMMARY

In the citrus-producing region of Veracruz, Mexico, ‘Monica’ mandarin orange (*Citrus reticulata*

¹ Departamento de Fitotecnia, ² Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, 56230. Chapingo, estado de México.

[†] Q.P.D.

^{*} Autor responsable (almaguervargas@hotmail.com)

Blanco) is an alternative to the monoculture of ‘Valencia’ late orange, but its fruit-set is low. To solve this problem, an experiment was conducted under field conditions to determine whether the application of gibberellic acid and girdling would increase fruit set. The experiment was set up in Álamo, Veracruz, in an orchard of 12-year-old ‘Monica’ mandarin trees grafted onto sour orange (*Citrus aurantium* L.) rootstock. The experimental design was randomized blocks with seven replications; one tree was the experimental unit. When 20 mg L⁻¹ of GA₃ was applied, there was no significant effect on fruit-set. However, when the trees were girdled during full flowering, production increased up to six times that of the control, although it correlated negatively with fruit size. There were no statistically significant differences in concentration of nutrients in the leaves, and titratable acidity (AT), total soluble solids (SST), and the ratio SST/AT in fruits were similar for all treatments.

Index words: *Citrus reticulata* Blanco, fruit-set, foliar nutrition.

INTRODUCCIÓN

El mandarino ‘Mónica’, se introdujo al estado de Veracruz en 1955 (Comunicación personal; Sr. Roberto Cuervo. Productor, Tihuatlán, Veracruz), como fruto de mesa, de maduración tardía, con muy buena aceptación en el mercado y a precios tres veces superiores a los del naranjo ‘Valencia’ tardía, por lo que su cultivo se ha extendido. En la actualidad, se estima que existen 13 000 ha plantadas con este frutal (SAGAR, 1999), presentando como principales problemas la alternancia de producción y un bajo porcentaje de amarre de fruto. De hecho, si no tiene polinizadores cerca, prácticamente no hay producción (Gómez, 2000).

El anillado y la aplicación de reguladores del crecimiento vegetal son prácticas que pueden estimular el amarre de frutos. El anillado es una

práctica que consiste en interrumpir al floema, removiendo una pequeña porción de corteza o simplemente haciendo una incisión, mismo que se ha utilizado en citricultura para incrementar el amarre de frutos (Lewis y McCarty, 1973; Goell y Cohen, 1981), aumentar el tamaño del fruto (Hochberg *et al.*, 1977; Cohen, 1984a,b; Agustí *et al.*, 1992), obtener mayor número de yemas florales (Furr y Armstrong, 1956; Erner, 1988) y corregir parcialmente la maduración tardía y la alternancia de producción (Goren y Monselise, 1971). El anillado puede provocar un incremento en el contenido de almidón en las hojas (Goldschmidt *et al.*, 1985; Schaffer *et al.*, 1985; Mataa *et al.*, 1998).

Para incrementar el amarre de frutos en cítricos, el anillado se realiza poco después de plena floración (Lewis y McCarty, 1973; Mataa *et al.*, 1998), aunque Krezdorn (1961) demostró que la respuesta fue aproximadamente la misma cuando el anillado se hizo en plena floración o dos a tres semanas después.

Goren *et al.* (1992) encontraron que la aplicación de ácido giberélico (AG_3) y anillado en ramas principales de mandarinos 'Nova' y 'Niva' en plena floración, incrementaron significativamente el amarre de frutos y, por consiguiente, la producción. Ellos concluyeron que el AG_3 tiene efecto sinérgico con el anillado.

Diversos estudios han establecido que es posible reducir la concentración de AG_3 hasta 5 mg L^{-1} para incrementar el amarre de fruto, si el tratamiento se complementa con un anillado de ramas (Agustí *et al.*, 1982), aunque se ha observado que poco tiempo después de realizar el anillado, las concentraciones de N, P y K en hojas se reducen, así como al aplicar AG_3 (García-Martínez y García-Papi, 1979). La disminución de N pudo ser ocasionada por el agotamiento de carbohidratos en la raíz debido al anillado, lo que redujo la absorción de elementos (Noel, 1970).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue incrementar la producción y calidad del fruto del mandarino 'Mónica' mediante el anillado de los árboles en diferentes fechas y/o aplicaciones de ácido giberélico (AG_3) para incrementar la rentabilidad del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo en una huerta comercial de mandarino 'Mónica', ubicada en el ejido

Agua Nacida, del municipio de Álamo, Veracruz, entre los paralelos $20^\circ 47'$ y $21^\circ 10'$ N y entre los meridianos $97^\circ 35'$ y $97^\circ 45'$ O, a una altitud promedio de 88 m. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1981), esta zona presenta un clima AW''(e). Los datos del clima tomados de la estación más cercana (Tuxpan, Veracruz) para el año de evaluación fueron: 1123.21 mm de precipitación anual, distribuida de junio a octubre; 1262.87 mm de evaporación y una temperatura media promedio de 24.08°C . El suelo de la huerta es ligeramente alcalino ($\text{pH} = 7.75$); con mediano contenido de materia orgánica (2.7 %); y un mediano contenido de N, P, K, (0.2% ; $5.59 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$; $0.82 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$, respectivamente).

Se utilizaron 56 árboles de mandarino 'Mónica' de 12 años, de una huerta de 10 ha, injertados sobre *Citrus aurantium* L., establecidos en un diseño de plantación tresbolillo, a una distancia de $7 \times 7 \text{ m}$. 'Mónica' presenta crecimientos muy verticales, sus ramas tienen ángulos menores que 45° , crecimiento vigoroso, flores solitarias o en grupos de dos a tres, con cinco pétalos, y 27 a 30 estambres fusionados en la base; los frutos son oblongos o redondos, con albedo grueso y flavedo rugoso, fácilmente desprendibles, y de color naranja en su maduración, con gajos de buen sabor y con alto contenido de jugo (Gómez, 2000; González, 2000). En la huerta que se trabajó, el rendimiento de fruta obtenido normalmente no era mayor que una tonelada de fruta por año, porque no tiene polinizadores cerca.

Tratamientos

Los tratamientos en estudio fueron las combinaciones de anillado y la aplicación de AG_3 . El anillado se practicó en tres fases fenológicas: antes de floración (7 de febrero de 1998); inicio de floración (21 de febrero de 1998 y plena floración (7 de marzo de 1998); el anillado se realizó en el tronco del árbol 5 cm debajo de la unión del injerto, con una amplitud de 7 a 8 mm. La dosis aplicada de ácido giberélico fue de 20 mg L^{-1} , utilizando Activol® (10% de AG_3); se tuvo un gasto de 4.5 L árbol^{-1} de solución. Se le aplicó sólo en caída de pétalos (15 de marzo) y con anillado antes de floración (7 de febrero), inicio de floración (21 de febrero) y en plena floración (7 de marzo).

El experimento se estableció en un diseño experimental en bloques al azar, dada la pendiente de 15% que tiene el terreno donde está la plantación, con

ocho tratamientos y siete repeticiones; la unidad experimental fue un árbol. Los árboles seleccionados fueron de tamaño y vigor similares.

Se evaluó el número de frutos amarrados cuando tenían aproximadamente 4 cm de diámetro ecuatorial, lo que ocurrió el 15 de abril.

Un mes antes de cosecha (17 de febrero de 1999), se contó el número total de frutos por cada árbol evaluado. Ya en cosecha, se colectaron 35 frutos por árbol al azar, se pesaron y se obtuvo el peso promedio por fruto. Este factor se multiplicó por el número total de frutos para cada árbol y, posteriormente, se calculó el rendimiento promedio por árbol. (Esto se hizo por los robos de frutas que ocurren en la región y considerando que la huerta está a borde de camino y todos los años ocurren robos de fruta; se estimó la cosecha para prevenir esta situación.)

Se determinó la concentración foliar de nutrimentos en dos fechas, una al inicio de la floración y otra un año después (21 de febrero de 1998 y 17 de marzo de 1999), con la finalidad de comparar las concentraciones de nutrimentos antes y después de la aplicación de los tratamientos. Para ello, se colectaron 60 hojas sanas por tratamiento, de tamaño similar y colocadas en la quinta posición, de ramas vegetativas sin frutos y del último flujo de crecimiento, que crecían a una altura aproximada de 1.70 m del nivel del suelo, totalmente iluminadas y distribuidas en los cuatro puntos cardinales del árbol. Las muestras se transportaron al laboratorio en una hielera portátil, donde se procedió a lavar el material vegetal con agua destilada, eliminando el exceso con papel absorbente. Posteriormente, el material vegetal se secó en una estufa con aire circulante a 70 °C durante 72 h, para después realizar su molienda en un molino de acero inoxidable con malla 60.

La determinación de N se realizó por el método microkjeldahl (Bremner, 1965). Después de una digestión húmeda triácida (HNO_3 , HClO_4 , H_2SO_4) del tejido vegetal, P se determinó por el método del complejo amarillo de vanamolibdato (Jackson, 1964), K se determinó por flamometría, y Ca, Mg y micronutrimentos se evaluaron de acuerdo con Bradfield y Spencer (1965) y luego con espectrofotometría de plasma acoplado ICP-AES modelo Liberty II Varian Sequential. Los resultados de los análisis foliares se interpretaron mediante la técnica de Kenworthy y se adaptaron al sistema experto computacional CITRUS Y DIAGFOL (Corona *et al.*, 2000).

Para evaluar la calidad de fruto, en el momento de cosecha, que fue el 17 de marzo, se recolectaron 35 frutos de cada uno de los árboles evaluados. Se determinaron diámetro y peso de fruto (Se utilizó un vernier y una balanza electrónica), sólidos solubles totales (Se utilizó un refractómetro Ziuss®) y acidez titulable (Se tomaron 5 mL de jugo, se le agregaron tres gotas de fenofaleína y se tituló con NaOH al 0.1 N). También se obtuvo la relación sólidos solubles totales/ácidez titulable (SST/AT).

Se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparaciones de medias de Tukey a $P = 0.05$ (SAS Institute, 1988).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Número de Frutos Amarrados

La cantidad de frutos amarrados en los árboles anillados fue mayor con respecto a los obtenidos en no anillados (árboles testigo y con aplicación de AG_3 ; Cuadro 1). El resultado puede ser atribuido a que la

Cuadro 1. Efecto del anillado y de la aplicación de ácido giberélico (AG_3) en la producción de mandarina 'Mónica' en Álamo, Veracruz, México.

Tratamiento	Número de frutos por árbol	Producción por árbol	Producción total
		kg	t ha ⁻¹
1 Árboles testigo	127.14 b [†]	43.41 b	8.86
2 Anillado antes de floración (7 de febrero)	1007.20 a	197.79 a	40.35
3 Anillado inicio de floración (21 de febrero)	925.86 a	185.88 a	37.92
4 Anillado plena floración (7 de marzo)	1034.71 a	203.35 a	41.48
5 Aplicación de AG_3 20 mg L ⁻¹ (15 de marzo)	196.57 b	67.60 b	13.79
6 Anillado + AG_3 antes de la floración (7 de febrero)	765.57 a	145.03 a	29.59
7 Anillado + AG_3 inicio de floración (21 de febrero)	1033.29 a	192.48 a	39.27
8 Anillado + AG_3 plena floración (7 de marzo)	1095.29 a	243.51 a	49.68

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

interrupción del floema del tallo mediante el anillado impidió el paso de los carbohidratos, nutrimentos y hormonas hacia las raíces, con lo que se provocó una redistribución de ellos, tendiendo a utilizarse en la parte aérea, con lo que se promovió un mayor amarre de fruto y se redujo su abscisión (Noel, 1970; Goren y Monselise, 1971; Lewis y McCarty, 1973, Cohen, 1981; Goell y Cohen, 1981; Mataa *et al.*, 1998). Al respecto, Rosemberg y Gardiazabal (1991) señalaron que las flores de los árboles anillados tienen un mayor porcentaje de tubos polínicos desarrollados que, posteriormente, penetran al óvulo, lo cual permite suponer que el incremento en el contenido de carbohidratos que ocurre después del anillado propicia el desarrollo de tubos polínicos, lo que mejora el amarre de fruto. Cabe mencionar que Wallerstein *et al.* (1973) indicaron que la mayor concentración de carbohidratos en la parte aérea genera una mayor cantidad de giberelinas endógenas y esto es lo que puede mejorar el amarre del fruto. Cabe mencionar que el productor anilló toda su huerta el año del experimento y el siguiente, y tuvo un rendimiento promedio de 28 y 26 t ha⁻¹, respectivamente, lo que indicó que la alternancia de la producción puede ser reducida con este tratamiento.

Al comparar las tres épocas de anillado, la respuesta fue la misma, debido posiblemente a que no hubo gran diferencia entre época de cada anillado, tal y como lo planteó Krezdorn (1961).

Producción

En el Cuadro 1, también puede observarse que las tendencias de los resultados fueron similares a frutos amarrados y que existe una correlación positiva significativa ($r = 0.9152$; $P \leq 0.05$) entre número de frutos amarrados y producción por árbol; esto indica que el aumento en producción de árboles anillados fue en gran medida debido a un incremento en el número de frutos amarrados por árbol, ya que en los árboles testigo hubo poco amarre de frutos y puede observarse que la producción por efecto del anillado se incrementó, llegando a ser hasta seis veces mayor que la producción de los árboles testigo.

Por otra parte, la aplicación foliar de 20 mg L⁻¹ de ácido giberélico no incrementó el rendimiento significativamente, con relación a los árboles testigo, probablemente debido a que la concentración usada no fue suficiente para estimular el desarrollo de un mayor número de frutos, como es sugerido por Talón *et al.* (1992).

Diámetro de fruto

Los frutos provenientes de árboles anillados tuvieron menor diámetro ecuatorial, en relación con los frutos provenientes de árboles testigo o asperjados con AG₃ (Cuadro 2), debido posiblemente a que estos últimos tuvieron una cantidad de seis veces menor de frutos por árbol; de hecho, se encontró una correlación negativa significativa ($r = -0.66$; $P \leq 0.05$) entre estas dos variables.

Esto sea debido a que al haber mayor número de frutos por árbol, se incrementó la competencia por carbohidratos, aunque Agustí *et al.* (1992) indicaron que esto no se ha podido confirmar de manera convincente, sobre todo porque son diversos los factores involucrados en el tamaño final de los frutos, destacando la dotación genética del cultivar (Goren *et al.*, 1971) y la competencia activa por auxinas endógenas durante los primeros estados de la fase de crecimiento lineal (El-Otmani *et al.*, 1992).

Sólidos Solubles Totales, Acidez Titulable y Relación Sólidos Solubles Totales-Acidez

Con respecto a estas variables, se encontró que tanto el anillado en diferentes épocas, como la aplicación de ácido giberélico, no afectan dichas. Esto debido probablemente a que la cantidad de azúcares y nutrimentos en el árbol fueron suficientes para que no existiera variación significativa en el fruto de los árboles tratados, coincidiendo con los trabajos realizados en cítricos por Krezdorn (1961), Goren y Monselise (1971) y Cohen (1984a); sin embargo,

Cuadro 2. Efecto del anillado y de la aplicación del ácido giberélico (AG₃) en la calidad de fruto de mandarina 'Mónica'.

Tratamiento	Diámetro ecuatorial
	cm
Árboles testigo	8.70 a [†]
Anillado antes de floración (7 de febrero)	7.66 b
Anillado inicio de floración (21 de febrero)	7.75 b
Anillado plena floración (7 de marzo)	7.71 b
Aplicación de AG ₃ 20 mg L ⁻¹ (15 de marzo)	8.53 a
Anillado + AG ₃ antes de floración (7 de febrero)	7.79 b
Anillado + AG ₃ al inicio de floración (21 de febrero)	7.63 b
Anillado + AG ₃ en plena floración (7 de marzo)	7.87 b

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

Hochberg *et al.* (1977) observaron un incremento en acidez titulable con anillados en verano.

Diagnóstico Nutrimental

Con la finalidad de conocer el estado nutrimental inicial de las unidades experimentales, se realizó un primer muestreo foliar el 21 de febrero de 1998, antes de la floración de los árboles. Con las muestras se realizaron los análisis nutrimentales y la interpretación de los mismos mediante la técnica de balance Kenworthy (1961). Los resultados de dicho análisis se presentan en el Cuadro 3, en el cual puede observarse la composición mineral de los árboles, el índice de balance, por elemento, el índice nutrimental total y el orden de requerimiento nutrimental (ORN). En esta evaluación se encontró que no hubo diferencias significativas en la concentración nutrimental de los

árboles, por lo que se concluye que se trabajó con material uniforme. También se observó que el Ca, Fe y Mn estaban en concentraciones por debajo de lo normal; N, K, Mg y Cu normales; P arriba de lo normal; y Zn fue el único nutrimento que se presentó deficiente.

El boro se encontró en concentraciones de suficiencia, de acuerdo con Jones *et al.* (1991).

Además, se realizó un segundo muestreo, con la finalidad de observar el efecto del incremento de la producción por la práctica del anillado en la concentración nutrimental de las hojas de mandarina 'Mónica'. De acuerdo con la técnica de balance Kenworthy, se observó que no existieron diferencias significativas en la concentración de nutrimentos en los árboles tratados. Noel (1970) mencionó que poco tiempo después de realizar un anillado se reduce la cantidad de N, P y K en las hojas, debido a que la raíz

Cuadro 3. Diagnóstico nutrimental en hojas de mandarina 'Mónica' (*Citrus sp.*) colectadas antes de floración (2 de febrero de 1998).

Trata- miento	Concentración nutrimental										ORD
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn		
----- g kg ⁻¹ -----											
----- μ g g ⁻¹ -----											
1 [¶]	CN [†]	2.0a [‡]	0.2a	1.61a	2.38a	0.35a	39.33a	7.83a	12.33a	12.8a	
	IB	84.7	118.7	113.5	67.3	84.5	67.7	94.9	65.9	43.8	741
	C [§]	N	AN	EXC	BN	BN	BN	N	BN	AN	Zn>Ca>Mn>Fe>N>Cu>Mg>K>P
2	CN	2.2a	0.22a	1.63a	2.2a	0.39a	47.33a	8.17a	14.8a	14.8a	
	IB	9.0	126.18	114.62	64.53	90.75	73.47	95.77	67.57	46.12	688
	C	N	AN	N	BN	N	BN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
3	CN	2.3a	0.28a	1.72a	2.89a	0.46a	56.37a	0.33a	14.8a	16.7a	
	IB	94.43	148.62	119.32	75.17	101.54	77.61	100.73	67.57	48.26	833
	C	N	AN	AN	BN	N	BN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
4	CN	2.08a	0.25a	1.83a	2.04a	0.45a	48.3a	8.33a	14.5a	14a	
	IB	86.26	137.40	125.07	62.06	100	73.92	96.14	67.38	45.21	893
	C	N	N	BN	BN	BN	BN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
5	CN	1.94a	0.2a	1.32a	2.64a	0.98a	48*	7.5a	14.17a	14.5a	
	IB	81.06	118.7	98.43	71.31	181.74	73.78	94.24	67.16	45.78	832
	C	BN	AN	N	BN	EXC	BN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
6	CN	2.18a	0.22a	1.64a	2.51a	0.38a	47.5a	9.5a	13.37a	14.5a	
	IB	89.97	126.18	115.14	69.31	89.2	73.55	98.83	66.63	45.78	775
	C	N	AN	N	BN	N	BN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
7	CN	1.83a	0.21a	1.54a	1.88a	0.39a	44.17a	7.83a	12.17a	12.83a	
	IB	76.97	122.44	109.92	59.59	90.75	72.02	94.99	95.89	43.89	766
	C	BN	AN	N	BN	N	BN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
8	CN	2.08a	0.2a	1.58a	2.07a	0.41a	48.3a	7.17a	13.5a	14.00a	
	IB	86.26	118.7	112.01	62.52	93.83	73.92	93.48	66.74	45.21	753
	C	N	AN	N	BN	N	BN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P

[†] CN = concentración nutrimental; IB = índice de balance Kenworthy; C = condición; ORD = orden de requerimiento.

[‡] Medias con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales, prueba de Tukey (P ≤ 0.05).

[§] Condición: DE = deficiente, BN = debajo del normal, N = normal, AN = arriba del normal, EXC = exceso.

[¶] Tratamientos: 1. Árboles testigo; 2. Anillado antes de floración; 3. Anillado al inicio de floración; 4. Anillado en plena floración; 5. Aplicación de AG₃ 20 mg·L⁻¹; 6. Anillado + AG₃, antes de la floración; 7. Anillado + AG₃, inicio de la floración; 8. Anillado + AG₃, en plena floración.

no tiene las reservas necesarias para transportarlos. En el presente estudio, no se observaron estas reducciones debido a que ya había pasado el tiempo suficiente (un año) para la cicatrización del anillado, con lo que seguramente se restableció la continuidad del floema. Tampoco hubo reducción por la carga extra que tuvieron los árboles anillados, en relación con los árboles testigo, posiblemente debido a que tuvieron su carga normal y su mayor metabolismo mejoró la absorción y traslocación de nutrimentos, mientras que en los árboles testigo se mantuvieron los mismos valores.

El diagnóstico indicó elementos debajo de lo normal (Ca, Mg, Fe y Mn); normales (N, K y Cu); arriba de lo normal (P); y Zn es el único nutrimento que presenta deficiencia (Cuadro 4). Al comparar estos efectos con los del primer muestreo, se observan resultados muy similares, a excepción del Mg, que al inicio estaba en concentración normal y en el segundo

muestreo pasó a condiciones debajo de lo normal, en los tratamientos que tuvieron alta producción; en los árboles testigo, se mantuvo en condiciones de insuficiencia en ambos muestreos. Estas diferencias entre el primer muestreo y el segundo muestreo para Mg, pueden ser debidas a que los árboles de estos tratamientos son los que mayor producción mostraron por efecto del anillado.

El comportamiento del Mg coincide con lo indicado por Reitz (citado por Pratt, 1983) quien mencionó que la deficiencia de este elemento en cítricos se representa en hojas maduras y, por lo general, en las ramas de los árboles que han fructificado intensamente, lo cual puede ser debido a que este elemento se transporta de las hojas más viejas a las más jóvenes y después a los órganos de almacenamiento (Salisbury y Ross, 1994). En el caso del K, puede deberse a que emigra hacia los órganos de demanda (Legaz y Primo, 1990).

Cuadro 4. Diagnóstico nutrimental en hojas de mandarina 'Mónica' colectadas en floración plena (17 de marzo 1999).

Trata- miento	Concentración nutrimental										ORD
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn		
	g kg ⁻¹			μg g ⁻¹							
1 [¶]	CN [†]	2.72a [‡]	0.21a	2.88a	2.9a	0.29a	56.4a	7.0a	24.6a	19.2a	
	IB	110.18	123.19	180	76.16	74.71	77.64	93.09	73.84	51.09	860
	C [§]	N	AN	EXC	BN	BN	BN	N	BN	AN	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
2	CN	2.65a	0.22a	1.1a	2.8a	0.22a	19.72a	5.8a	19.6a	16a	
	IB	107.43	126.18	86.94	73.78	64.53	142.4	90.33	70.64	47.47	810
	C	N	AN	N	BN	BN	AN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
3	CN	2.47a	0.21a	0.99a	3.21a	0.21a	91.2a	6.0a	15.6a	16.6a	
	IB	100.74	121.69	80.99	80.11	62.99	93.65	90.79	68.08	48.15	747
	C	N	AN	BN	BN	BN	N	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
4	CN	2.53a	0.16a	1.00a	2.31a	0.18a	46.2a	6.0a	13.8a	16.0a	
	IB	103.12	102.9	81.51	66.19	58.67	72.95	90.79	66.93	47.47	691
	C	N	N	BN	BN	BN	BN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
5	CN	2.20a	0.21a	0.9a	2.8a	0.23a	83.8a	6.8a	18.2a	25.6a	
	IB	90.72	118.7	76.5	73.78	66.07	90.24	92.63	69.74	58.52	737
	C	N	AN	BN	BN	BN	N	N	BN	BN	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
6	CN	2.5a	0.2a	1.3a	3.4a	0.23a	46.8a	5.4a	16.2a	16.8a	
	IB	101.86	118.7	97.39	83.04	66.07	73.23	89.41	68.46	48.38	747
	C	AN	AN	N	N	BN	BN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
7	CN	2.6a	0.19a	1.14a	3.02a	0.21a	52.2a	5.6a	14.6a	15a	
	IB	98.51	116.46	89.03	77.11	62.37	75.71	89.87	67.44	46.34	723
	C	N	N	N	BN	BN	BN	N	BN	DEF	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P
8	CN	2.58a	0.4a	1.01a	3.45a	0.21a	69.2a	6a	15.2a	20.6a	
	IB	104.8	192	82.14	83.84	63.6	83.53	90.8	67.82	52.67	721
	C	N	EXC	BN	BN	BN	BN	N	BN	BN	Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P

[†] CN = concentración nutrimental; IB = índice de Balance Kenworthy; C = condición; ORD = orden de requerimiento.

[‡] Medias con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales, prueba de Tukey (P ≤ 0.05).

[§] Condición: DE = deficiente, BN = debajo del normal, N = normal, AN = arriba del normal, EXC = exceso.

[¶] Tratamientos: 1. Árboles testigo; 2. Anillado antes de floración; 3. Anillado al inicio de floración; 4. Anillado en plena floración; 5. Aplicación de AG₃ 20 mg·L⁻¹; 6. Anillado + AG₃, antes de la floración; 7. Anillado + AG₃, inicio de la floración; 8. Anillado + AG₃, en plena floración.

La deficiencia de zinc puede ser debida al pH del suelo de la huerta, que era de 7.75, aunque también puede deberse a que el exceso de fósforo reduce la entrada de Zn a la planta (Salisbury y Ross, 1994), como se observa en el Cuadro 4.

Al basarse en los índices de balance calculados para los valores de análisis foliar en forma general, el orden de requerimiento nutrimental es: Zn>Ca>Mn>Fe>Mg>N>Cu>K>P, presentados de menor a mayor.

CONCLUSIONES

- Árboles de mandarina 'Mónica', anillados en el tronco durante la floración, incrementaron significativamente el número de frutos amarrados y, consecuentemente, la producción, pero se disminuyó su tamaño de fruto, aunque no se afectó su calidad.
- Las aspersiones de 20 mg L⁻¹ de ácido giberélico en plena floración no incrementaron el amarre de fruto en mandarina 'Mónica'.

LITERATURA CITADA

- Agustí, M.F., P. García-Martí y J.L. Guardiola. 1982. Giberelic acid and fruit set in sweet orange. *Scientia Hort.* 17: 257-264.
- Agustí, M.F., V. Almeda y J. Ponds. 1992. Effects of girdling on alternate bearing in Citrus. *J. Hort. Sci.* 67: 203-210.
- Bradfield, E.G. y D. Spencer. 1965. Leaf analysis as a guide to the nutrition of fruit crops: Determination of magnesium, zinc and copper by atomic absorption spectroscopy. *J. Sci. Food Agr.* 16: 33-38.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. *In:* Black, C.A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9.* American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Cohen, A. 1981. Recent developments in girdling of citrus trees. *Proc. Int. Soc. Citriculture* 1: 196-199.
- Cohen, A. 1984a. Citrus fruit enlargement by means of summer girdling. *J. Hort. Sci.* 59: 119-125.
- Cohen, A. 1984b. Effect of girdling date on fruit size of Marsh seedless grapefruit. *J. Hort. Sci.* 59: 567-573.
- Corona-Saenz, T., G. Almaguer-Vargas y R. Maldonado-Torres. 2000. Sistema computarizado experto en diagnóstico nutrimental en naranjo. *Terra* 18: 173-178.
- El-Otmani, M.C., B. Ismail, A. Oubahou, A. y M. Achouri. 1992. Growth regulators use on Clementine mandarin to improve fruit set. *Proc. Int. Citriculture* 1: 500-508.
- Erner, Y. 1988. Effects of girdling on the differentiation of inflorescence types and fruit set in Shamouti orange trees. *Israel J. Bot.* 37: 173-180.
- Furr, J.R. y W.W. Armstrong. 1956. Flower introduction in grapefruit in the Coachella Valley, California. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 67: 176-182.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Tercera Edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- García-Martínez, J.L. y M.A. García-Papi. 1979. The influence of giberelic acid, 2,4-D dichlorophenoxy acetic acid and 6-benzilaminopurine on fruit-set of 'Clementine' mandarin. *Scientia Hort.* 10: 285-293.
- Goell, A. y A. Cohen. 1981. Combining irrigation regimes with girdling techniques in citrus trees. *Proc. Int. Soc. Citriculture* 2: 514-518.
- Goldschmidt, E., N. Aschkenzi, Y. Horzano, A. Schaffor y S.P. Monselise. 1985. A role for carbohydrate levels in the control of flowering in Citrus. *Scientia Hort.* 26: 159-166.
- Gómez A., N.L. 2000. Polinización y amarre de fruto en tangerina 'Mónica' (*Citrus* sp.). Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- González Navarrete, J. 2000. Floración y amarre de frutos estimulado con AG3, anillado y auxina en mandarina 'Mónica' (*Citrus reticulata* Blanco). Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillo, estado de México.
- Goren, R. y S.P. Monselise. 1971. Effects of ringing on yields of low-bearing orange trees (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck). *J. Hort. Sci.* 46: 435-441.
- Goren, R., E. Goldschmidt y S.P. Monselise. 1971. Hormonal balance in bark and leaves of Shamouti orange trees (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) in relation to ringing. *J. Hort. Sci.* 46: 443-451.
- Goren, R., M. Huberman y J. Rivov. 1992. Effects of girdling on the yield of 'Nova' (Clementine x 'Orlando' Tangelo) and 'Viva' ('Valencia' x 'Wilking'). *Proc. Int. Soc. Citriculture* 1: 493-499.
- Hochberg, R., S.P. Monselise y J. Costo. 1977. Summer girdling and 2,4-D effects on grape fruit sizes. *HortScience* 12(3): 228.
- Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Trad. al español por J. Huerta. Editorial Omega. Barcelona, España.
- Jones, J.B. Jr., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook, a practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide. Micro-Macro Publishing. Athens, GA.
- Kenworthy, A.L. 1961. Interpreting the balance of nutrient elements in leaves of fruit trees. pp. 59-75. *In:* Reuther, W. (ed.). *Plant analysis and fertilizer problems. Publication 8.* Ann. Institute of Biol. Science. Washington, D.C.
- Krezdorn, A.H. 1961. Girdling to increase fruit set use it cautiously. *Citrus Industry* 42(7): 20-21.
- Legaz, P.F. y M.E. Primo. 1990. Normas para la fertilización de los agrios. Folleto de Divulgación 5-88. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Dirección General de Innovación de Tecnología. Valencia, España.
- Lewis, L.N. y C.D. McCarty. 1973. Pruning and girdling of citrus. pp. 211-229. *In:* Reuther, W. (ed.). *The Citrus Industry, Vol. III.* University of California. Berkeley, CA.
- Mataa M., S., K. Taminaga e I. Kosaki. 1998. The effect of time of girdling on carbohydrate contents and fruiting in Ponkan mandarin (*Citrus reticulata* Blanco). *Scientia Hort.* 73: 203-211.
- Noel, A.R. 1970. The girdled tree. *Bot. Rev.* 36: 162-195.
- Pratt, R.M. 1983. Guía de Florida sobre insectos, enfermedades y trastornos de la nutrición en los frutos cítricos. 4ª edición. LIMUSA. México, D.F.
- Rosemberg, G. y F. Gardizabal. 1991. Anillado y raleo. pp. 149-155. *In:* El cultivo del palto. Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Agronomía. Valparaíso, Chile.

- SAGAR (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural). 1999. Anuario Estadístico de la producción en México. Dirección de Estadística. México, D.F.
- Salisbury, F.B. y C.W. Ross. 1994. Fisiología vegetal. Grupo Editorial Interamericana. México, D.F.
- SAS Institute. 1988. SAS-Stat user's guide. Release 6.03. Cary, NC.
- Schaffer, A.A., E.E. Goldschmidt, R. Goren y D. Gaili. 1985. Fruit set and carbohydrate status in alternate nonbearing Citrus cultivars. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 110: 574-578.
- Talón, M., P. Zacarías y E. Primo-Millo. 1992. Role of gibberellins in parthenocarpia development of seedless mandarins. *Proc. Int. Soc. Citriculture* 1: 485-488.
- Vitti, G.C. 1992. Nutrition and growth of Citrus plants. In. pp.139-158. International Seminar on Citrus Physiology. August 10-13, Bebedouro, Sao Paulo, Brazil.
- Wallerstein, I., R. Goren y S.P. Monselise. 1973. Seasonal changes in gibberellic-like substances in 'Shamouti' orange (*C. sinensis* Osb.) trees in relation to ringing. *J. Hort. Sci.* 48: 75-82.

CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE ZARZAMORA cv. CHEYENNE CON CUBIERTAS ORGÁNICAS

Growth and Production of Cheyenne Blackberry under Organic Mulching

Rafael A. Parra-Quezada^{1‡}, Gerardo F. Acosta-Rodríguez² y Jesús G. Arreola-Ávila³

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue conocer el efecto de cubiertas orgánicas en el contenido de materia orgánica (MO) en el suelo, en el crecimiento y en la producción de zarzamora cv. Cheyenne. Para ello, en junio de 1999, se establecieron 500 plantas en el Valle de Guerrero, Chihuahua, México, a una distancia de 1.5 m entre hileras y a 1 m entre plantas para dar 10 hileras de 50 m cada una. El área es de clima templado, con temperaturas extremas en invierno hasta de -20°C . El suelo es somero (40 cm) y arenoso, baja en fertilidad (0.253% de MO), irrigado por gravedad. En marzo de 2000, se aplicaron los tratamientos de cubierta al suelo: 1) aplicación de 3 kg de estiércol seco planta⁻¹ más cubierta de paja de avena en la hilera con 15 cm de espesor; 2) aplicación de 3 kg de estiércol seco planta⁻¹ más cubierta de aserrín seco y asoleado en la hilera con un espesor de 15 cm; y 3) aplicación de 3 kg de estiércol seco planta⁻¹. Los resultados indican que la floración de zarzamora evade las heladas tardías, el período de flor a fruto es de 47 a 55 días, el peso promedio del fruto fue de 4.5 g, el período de cosecha va de la tercera semana de junio a la tercera de agosto. El tratamiento de estiércol con paja de avena favoreció mayor crecimiento de la caña, mayor fructificación y rendimiento más alto. Todos los tratamientos incrementaron el contenido de materia orgánica en el suelo.

Palabras clave: *Rubus spp.*, *materia orgánica*, *fenología*.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Sierra de Chihuahua. Av. Hidalgo 1213, 31500 Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

[‡] Autor responsable (parraquez@prodigy.net.mx)

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Delicias. Cd. Delicias, Chihuahua, México.

³ Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango, México.

Recibido: Julio de 2002. Aceptado: Octubre de 2004.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 23: 233-240.

SUMMARY

The goal of this study was to determine the effect of organic mulch on organic matter content in the soil and the performance of blackberry in terms of yield and growth. During June 1999, 500 plants of blackberry cv. Cheyenne were planted in Guerrero Valley, Chihuahua, Mexico. Distances were 1.5 m between rows and 1 m between plants. The area is temperate with temperatures of -20°C in winter. The soil is shallow (40 cm depth) and sandy and has low fertility (0.253% organic matter), with furrow irrigation. In March 2000, the following treatments were applied in two lines 50 m each: 1) 3 kg of dry manure plant⁻¹ plus oat straw mulching, 15 cm thick; 2) 3 kg of dry manure plant⁻¹ plus pine sawdust mulching, 15 cm thick; and 3) 3 kg of dry manure plant⁻¹. Results showed that the flowering of blackberry cv. Cheyenne evades late frost. The period between flowering and fruit ready to harvest was 47 to 55 days. Average fruit weight was 4.5 g. The harvest period is from the third week of June to the third week of August. Dry manure plus oat straw resulted in the best cane growth, fructification, and yield. All treatments increased the content of organic matter in soil.

Index words: *Rubus spp.*, *organic matter*, *phenology*.

INTRODUCCIÓN

La zarzamora (*Rubus spp.*) se cultiva extensamente en algunos países de Europa y Norteamérica, en menor grado en América Central, América del Sur, Australia y Nueva Zelanda. En México, las primeras introducciones se hicieron en 1974 en el área de Chapingo, estado de México, donde el Colegio de Postgraduados evaluó algunos cultivares como "Brazos", el cual es el más cultivado en México; sin embargo, en los últimos años, éste se ha sustituido por otros cultivares, como Choctaw, Comanche y Cheyenne (Parra *et al.*, 1999). De ahí se extendió a otros estados, como Puebla, Hidalgo, Michoacán, Jalisco y Guanajuato, pero no se ha

extendido a la zona norte del país, como es el caso del estado de Chihuahua, donde el manzano es el frutal predominante. No obstante, los productores tienen interés por probar nuevas opciones de cultivo, por lo que zarzamora se considera una buena opción, ya que permite una rápida recuperación de la inversión (segundo año), además de representar una alternativa para el mercado nacional y de exportación, pues la demanda mundial es alta, produciéndose en México 7600 toneladas anuales de zarzamora, principalmente en la zona de Los Reyes, Uruapan y Morelia en el estado de Michoacán (Ramírez, 1999). De la fruta de zarzamora que se produce en México se exporta 90% a los Estados Unidos y el resto es para el mercado nacional en fresco y para la industria de mermeladas y helados principalmente. Chihuahua, por su cercanía con el sur de EUA (5 h a la frontera por autopista), presenta ventajas que deben ser aprovechadas para exportar fruta, aun cuando en EUA haya producción, pues las zonas productoras más fuertes como Washington y Oregon están más retirados que Michoacán. El mercado nacional cada vez demanda nuevos productos y zarzamora, en la actualidad, se encuentra en algunas cadenas de supermercados en forma fresca y congelada.

La zarzamora requiere para su desarrollo de suelos fértiles, con buen drenaje, y profundos, condición que se encuentra en las zonas subtropicales y tropicales donde se cultiva en México; sin embargo, en la zona árida y semiárida del norte de México, los suelos en promedio presentan 0.5% de materia orgánica, son delgados y, en algunos casos, tienen un mal drenaje. Sin embargo, esta condición puede ser mejorada como lo anotan Clark y Moore (1991), al indicar que en arándanos se mejora la sobrevivencia de la planta y ésta es más productiva cuando se adicionan cubiertas orgánicas como corteza de pino, con un espesor entre 10 y 12 cm. Esta respuesta la atribuyen a una mejor conservación de la humedad en el suelo y a un aumento en la fertilidad del mismo. Este efecto lo atribuyeron a que se favorece la conservación de la humedad en el suelo y se incrementa la fertilidad del mismo. Clark y Moore (1991) indicaron que, en arándano, se mejora la sobrevivencia de la planta y es más productiva cuando se adicionan cubiertas orgánicas con corteza de pino, con un espesor entre 10 y 12 cm. Esta respuesta la atribuyeron a una mejor conservación de la humedad en el suelo y a un aumento en la fertilidad del mismo. Por su parte, NeSmith (2003) indicó que cuando se utilizan algunas cubiertas orgánicas, en el momento de controlar

algunas malezas, se mezcla con el suelo y el contenido de materia orgánica se incrementa y, con ello, la respuesta de la planta es mejor. En huertos de manzano orgánico, el manejo del suelo, la maleza y la fertilidad son una constante preocupación, pero Merwin *et al.* (1994) encontraron que el contenido de materia orgánica (MO), después de cinco años, baja cuando se cultiva mecánicamente y cuando se aplica herbicida, pero se incrementa cuando se mantienen coberteras vivas entre hileras y cuando se aplican cubiertas orgánicas periódicamente con un espesor de 10 a 15 cm.

Una condición en el noroeste de Chihuahua es la presencia de heladas tardías, las cuales afectan fuertemente a manzano y, año tras año, hay pérdidas fuertes donde no hay tecnología para su prevención, o bien, el costo para su prevención es cada día más caro y, en el caso de calentones, altamente contaminante. Por lo tanto, una especie como zarzamora, que florece a partir de mayo hasta agosto en climas templados, evade en forma natural la presencia de heladas (Sloan y Matta, 1996).

Los cultivares de zarzamora que se han introducido a México son de hábito de crecimiento erecto, por lo tanto, no requieren de soporte (Clark, 1992; Strike, 1992). El rendimiento de los cv. Shawnee, Cherokee, Comanche y Cheyenne en Arkansas, EEUU, es de 14.96, 5.97, 5.73 y 6.14 t ha⁻¹, respectivamente, en un promedio de tres años, con un periodo de producción de un mes y medio (Moore *et al.*, 1985). El peso promedio del fruto varía de un año a otro y va de 3.3 a 6.1 g (Perkins *et al.*, 1996).

El objetivo del presente trabajo fue conocer el efecto de cubiertas orgánicas en el contenido de materia orgánica en el suelo, así como en el crecimiento y en la producción de zarzamora cv. Cheyenne en Guerrero, Chihuahua.

MATERIALES Y MÉTODOS

En junio de 1999, se establecieron 500 plantas de zarzamora cv. Cheyenne en el valle de Guerrero, Chihuahua, México, zona con una precipitación media anual de 310.9 mm (promedio de 2000, 2001 y 2002) distribuida principalmente en los meses de junio a septiembre, con temperaturas mínimas extremas hasta -25 °C y máximas en verano hasta 36 °C. La acumulación de frío es hasta de 1655 h frío (método de Damota). Las plantas utilizadas en este trabajo provenían de un vivero comercial en Toluca, estado de México. Éstas se recibieron a raíz desnuda,

en empaque especial para evitar la deshidratación, con hojas y con 20 cm de altura, y se transportaron por avión. Se trataron con Bactrol en inmersión rápida, funguicida para prevenir Agalla de la Corona (*Agrobacterium tumefaciens*); posteriormente, se plantaron en el lomo del surco a una distancia entre plantas de 1 m y a 1.5 m entre hileras, estableciéndose 10 surcos de 50 m de largo con 50 plantas cada uno, representando una densidad de 6667 plantas ha⁻¹. Después de la plantación, con una barrena tipo Veihmeyer se muestreó suelo (de 0 a 20 cm de profundidad) para estimar, en forma visual, el contenido de humedad, considerando que cuando el suelo, después de presionarlo con la mano, no formaba terrón, se procedía a regar con agua rodada, hasta que la planta se estableció. Posteriormente, las plantas brotaron en julio y alcanzaron, en octubre de 1999, 40 cm de altura. En noviembre de 1999, se realizó un análisis de suelo para determinar el contenido de materia orgánica y se encontró 0.259%, considerado como extremadamente pobre; por lo tanto, en marzo de 2000, se aplicaron los siguientes tratamientos de cubiertas orgánicas al suelo: 1) aplicación de 3 kg de estiércol seco planta⁻¹ más una cubierta de paja de avena en la hilera con 15 cm de espesor; 2) aplicación de 3 kg de estiércol seco planta⁻¹ más una cubierta con aserrín seco en la hilera con un espesor de 15 cm; 3) aplicación de 3 kg de estiércol seco planta⁻¹. Se utilizó un diseño de tratamientos de bloques al azar y como prueba de medias (Duncan, 95% de probabilidad), utilizando el paquete CoStat 3.03 (COSTAT, 1989). En marzo 2001, se realizó otro análisis del suelo para ver el efecto de la aplicación del abono orgánico.

En la planta, se tomaron las siguientes variables:

Crecimiento del brote. En cada hilera de 50 m, se marcaron tres cañas, en las cuales se midió el crecimiento (en cm) cada semana.

Número de laterales. En las tres cañas, en que se midió el crecimiento vegetativo, también se contó el número de laterales emitidas.

Número de yemas. En diciembre de 2000 y de 2001, se contó el número de yemas totales por caña.

Diámetro de tallo. En esas tres cañas, se midió el diámetro de la caña a 20 cm del nivel del suelo al final de la temporada.

Inicio de brotación. Se consideró cuando 50% de la caña presentó brotes vegetativos o florales visibles.

Inicio de floración. Cuando 50% de las flores de la caña estaban abiertas.

Inicio de cosecha. Cuando inició la maduración de los frutos.

Período de cosecha. Tiempo (en días) de inicio a final de cosecha.

Rendimiento total. Se hicieron dos cosechas por semana y se sumaron las cosechas parciales para obtener el rendimiento total, considerando los 50 m lineales de surco como unidad experimental, con dos repeticiones.

Peso del fruto. En cada cosecha parcial se tomaron, al azar, 25 frutos por tratamiento, se pesaron y se determinó el peso promedio del fruto (g).

Pérdida de peso del fruto (%). Los 25 frutos considerados para obtener el peso del fruto, se pusieron en refrigeración a 1 °C por tres y siete días, en los cuales se obtuvo el peso del mismo y se determinó la pérdida de peso a través del tiempo.

Análisis foliar. En julio de 2000, se tomaron hojas maduras de la parte media de la caña sin producir, se lavaron con agua corriente, posteriormente se enjuagaron con agua destilada y desionizada y se analizaron. En ellas, se determinó el N por el método microkjeldahl; P mediante colorimetría; K por emisión atómica; B mediante la metodología de la curcumina y Ca, Mg, Mn, Cu, Fe y Zn por espectrofotometría de absorción atómica. La información obtenida del análisis foliar se sometió a un análisis estadístico completamente al azar, con tres tratamientos y dos repeticiones.

En 2000, se despuntaron las cañas a 90 cm y, en 2001, a 180 cm, con el objetivo de promover la formación de laterales. Se dieron 10 riegos rodados año⁻¹, con una lámina aproximada de 4 cm cada uno. La maleza se controló con desvaradora mecánica en la calle y con azadón en la hilera. Se fertilizó con la fórmula 120-70-100 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente, en tres aplicaciones; además, se dieron dos aplicaciones de fertilizante foliar con Green Top en dosis de 3 L ha⁻¹, el cual aportó principalmente N, P y K, pero también elementos menores. Se detectó la presencia de frailecillo (*Macrodactylus* spp.), así como pudrición del fruto (*Botritis cinerea*), sin embargo, en ambos casos, la incidencia fue mínima y no se aplicaron pesticidas para su control.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento

En 2000, se observó el inicio de la brotación vegetativa el 11 de abril y, aunque se presentaron heladas tardías, la yema es múltiple y rebrotó. Posteriormente, el brote creció y se presentaron tres flujos de floración, el primero a finales de abril y continuó hasta finales de junio. Este comportamiento de la floración evade las heladas tardías (Figura 1). El período de flor a fruto es de 47 a 55 días. El peso promedio del fruto es de 4.5 g, similar a lo encontrado por Sloan y Matta (1996). El período de cosecha va de la tercera semana de junio a la tercera de agosto. El crecimiento de los brotes alcanzó 130 cm en algunos casos, pero se realizó una poda de despunte a 90 cm para promover la formación de ramas laterales, en las que se presentó la floración en 2001. Los resultados indican que el Tratamiento 2 (estiércol más aserrín) promovió un mayor número de laterales y un mayor diámetro de tronco (Cuadro 1). El número de brotes nuevos es igual entre tratamientos.

En 2001, el inicio de la brotación en zarzamora cv. Cheyenne inició el 16 de abril y, para el 30 de abril, se cuantificó 25% de yemas brotadas, así como las primeras flores, por lo tanto la probabilidad de heladas tardías es muy baja. Los brotes vegetativos

Cuadro 1. Comportamiento de zarzamora cv. Cheyenne con cubierta orgánica en Guerrero, Chihuahua. 2000.

Tratamiento	Características de la planta	
	No. de laterales	Diámetro de tronco
		cm
Estiércol + paja de avena	11.83 b [†]	1.21 b
Estiércol + aserrín	15.25 a	1.38 a
Estiércol	12.25 b	1.06 c

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

originados de yemas adventicias de la raíz alcanzaban más de 1 m de altura y la floración continuó. En 2001, el crecimiento de la caña fue más vigoroso que en 2000, alcanzando 180 cm de altura (100% más) (Figura 2). Esto se podría atribuir a que la planta estableció muy bien su sistema radical en 2000, por efecto del riego, así como por una mayor conservación de la humedad con las cubiertas (Merwin *et al.*, 1994; Ibáñez *et al.*, 2000), pero además a que el estiércol aplicado, más la adición de aserrín y paja de avena empezaron a mineralizarse y aportaron nutrimentos. Cabe indicar que el espesor de la cubierta fue de 15 cm; sin embargo, en el tratamiento estiércol más aserrín y de estiércol solo, en el momento de controlar maleza con azadón en la hilera, se incorporó al suelo parte de la cubierta (NeSmith, 2003).

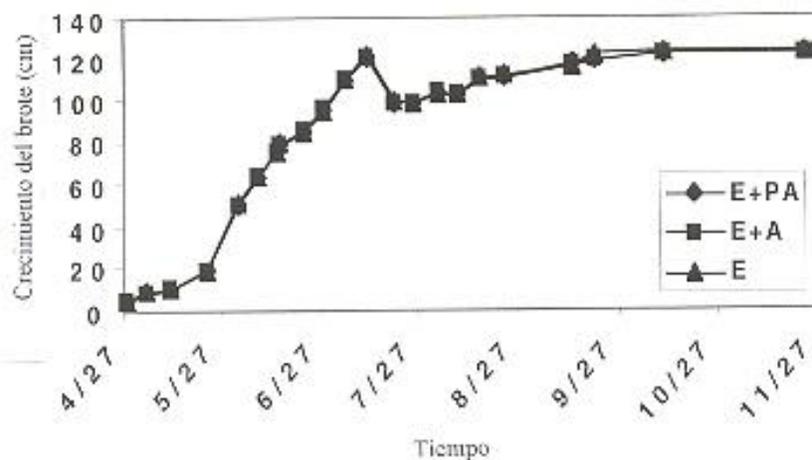


Figura 1. Dinámica de crecimiento del brote de zarzamora cv. Cheyenne en Guerrero, Chihuahua, durante 2000. E+PA = estiércol + paja de avena; E+A = estiércol + aserrín; E = estiércol.

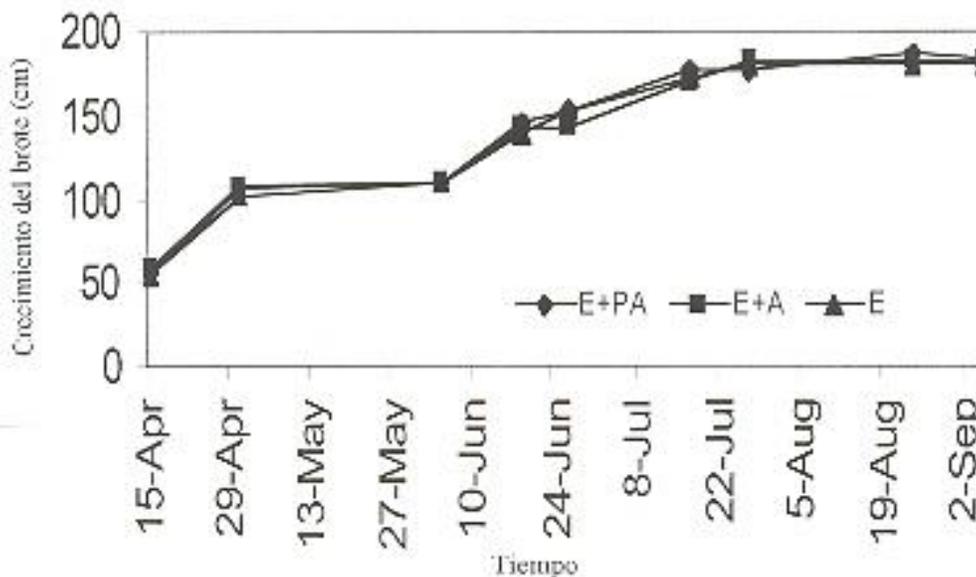


Figura 2. Dinámica de crecimiento de brotes de zarzamora cv. Cheyenne afectados por diferentes cubiertas orgánicas en Guerrero, Chihuahua, durante 2001. E+PA = estiércol + paja de avena; E+A = estiércol + aserrín; E = estiércol.

Materia Orgánica en el Suelo

El contenido de materia orgánica en el suelo aumentó en 184, 119 y 54% en los tratamientos de estiércol más aserrín, estiércol más paja de avena y estiércol solo, respectivamente, un año después de la aplicación (Cuadro 2). Con las cubiertas se aumenta la capacidad de retención de humedad en el suelo (Ibáñez *et al.*, 2000), se mejora la infiltración del agua y se aumenta el contenido de materia orgánica en el suelo (Clark y Moore, 1991; Merwin *et al.*, 1994). Esta información indica que, aunque el suelo presenta solo 40 cm de profundidad y es de baja fertilidad, la aplicación de estiércol más cubiertas orgánicas permite un buen desarrollo de la planta, en suelos considerados marginales para este cultivo.

Producción

Durante 2000, la producción fue mínima y no se cuantificó. Durante 2001, la primera cosecha fue el 18 de junio y de ahí continuó con dos cosechas por semana hasta finales de agosto (Figura 3). En esta figura, se observa que el tratamiento de estiércol más paja de avena presentó la mayor producción de fruta en el mes de julio, lo que marcó la diferencia entre estos tratamientos. Lo anterior indica varias cosas: la primera es que la zarzamora evade el problema de

heladas tardías, y aun cuando florece en la última semana de abril y en la primera de mayo, cuando aún hay probabilidad de heladas, la yema es múltiple y continúa brotando hasta mediados de junio.

El segundo aspecto es que la fruta se cosecha cuando las otras zonas productoras de zarzamora en México no están en producción y se puede abastecer el mercado nacional. Sin embargo, en Estados Unidos, si coincide con las fechas de cosecha (Sloan y Matta, 1996; Muñoz y Juárez, 1997), limitaría su exportación a la parte centro y norte de EUA, pero no a la zona sur, donde existen mercados potenciales para zarzamora. La tercera observación es que la producción puede ampliarse hasta el mes de octubre con manejo de agua y nutrimentos, aspecto que aún

Cuadro 2. Incremento de materia orgánica (MO) en el suelo 12 meses después de aplicadas las cubiertas orgánicas más el estiércol.

Tratamiento	MO		Incremento de MO
	Antes	1 año después	
	----- % -----		
Estiércol + paja de avena	0.259	0.569	119
Estiércol + aserrín	0.259	0.737	184
Estiércol	0.259	0.399	54

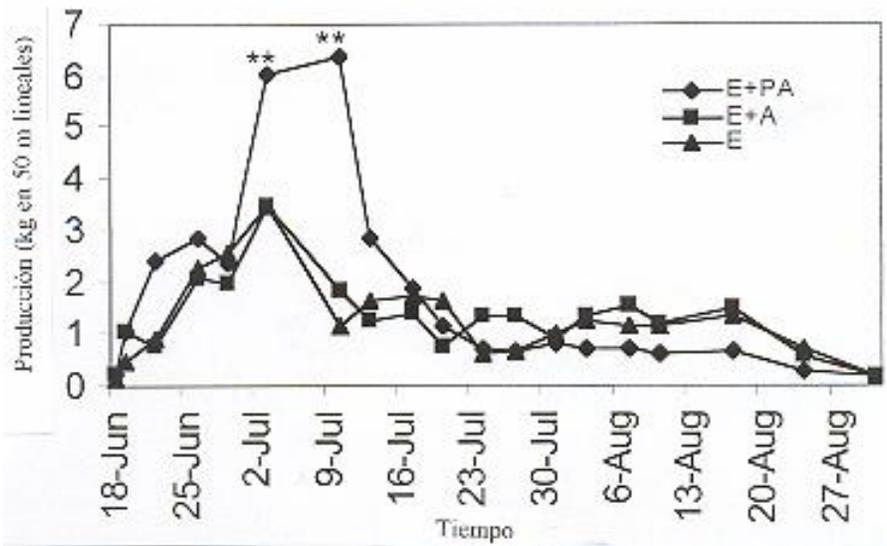


Figura 3. Producción de zarcamora cv. Cheyenne afectada por cubiertas orgánicas en Guerrero, Chihuahua, durante 2001. (** = $\alpha \leq 0.01$; * = $\alpha \leq 0.05$). E+PA = estiércol + paja de avena; E+A = estiércol + aserrín; E = estiércol.

se debe de investigar, pero si se logra ampliar la fecha de cosecha hasta octubre, se garantiza un mercado internacional con menos competencia en el mes de septiembre.

En 2001, el crecimiento del brote fue 100% mayor que en 2000 (Figuras 1 y 2), lo que indica un potencial de rendimiento mayor para 2002. El rendimiento estimado para 2001 (Cuadro 3) es muy importante, ya que es el primer año de producción comercial de fruto, y está acorde con lo obtenido en otras áreas productoras (Moore *et al.*, 1985) y superior a lo encontrado por Galletta *et al.* (1998) en el primer año de producción.

Calidad del Fruto

El peso del fruto no presentó diferencias significativas entre tratamientos, a excepción de dos fechas de muestreo (Figura 4). Los primeros frutos son de mayor tamaño que los intermedios, provocado por una mayor cantidad de frutos en la planta; al final de la cosecha el peso nuevamente aumenta y esto se debe a una menor cantidad de frutos. Los sólidos solubles encontrados durante cinco fechas de muestreo (22 y 29 de junio, 10 y 17 de julio y 3 de agosto) fueron de 11, 9.5, 10, 9.5 y 11%, respectivamente, y superior a lo encontrado por Busby y Himelrick (1998) en el cultivar Cheyenne y

Shawnee. Esto indica que la calidad del fruto está dentro de los estándares normales para su comercialización en fresco, tanto en el mercado nacional, como para exportación.

El comportamiento del fruto en refrigeración se presenta en el Cuadro 4, en el cual se observa que no hay efecto de los tratamientos de cubierta orgánica en la pérdida de peso del fruto y que puede almacenarse hasta por siete días entre 1 y 0 °C. Esto permite, en un plazo de 24 h, transportar el fruto a los centros de consumo de fruto en fresco.

Comportamiento Nutricional

El estado nutricional de las hojas de zarcamora, en 2000 indicó que en N, Zn y Fe hay diferencias

Cuadro 3. Producción de zarcamora cv. Cheyenne con cubiertas orgánicas en Guerrero, Chihuahua, 2001.

Tratamiento	Rendimiento t ha ⁻¹
Estiércol + paja de avena	4.363 a [†]
Estiércol + aserrín	3.313 b
Estiércol	3.233 b

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

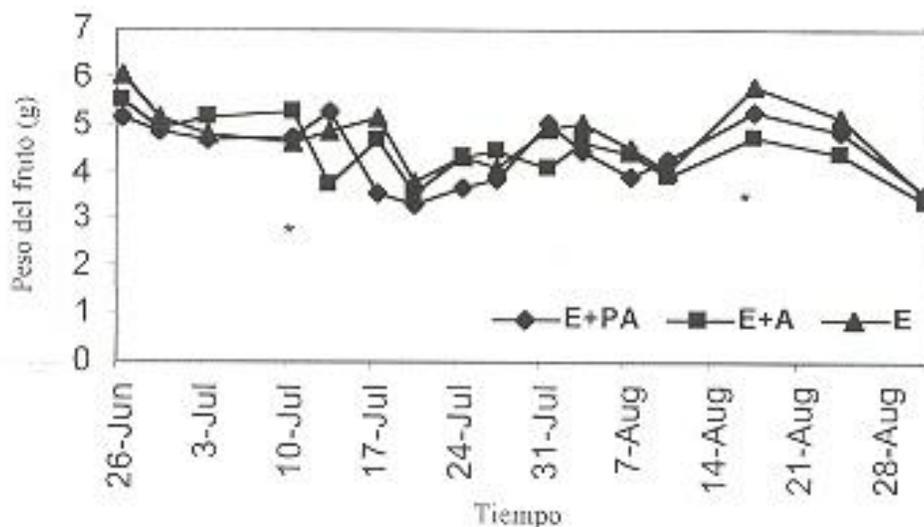


Figura 4. Peso del fruto cv. Cheyenne afectado por cubiertas orgánicas en Guerrero, Chihuahua, durante 2001. (* = $\alpha \leq 0.05$). E+PA = estiércol + paja de avena; E+A = estiércol + aserrín; E = estiércol.

significativas entre tratamientos (Cuadro 5). El tratamiento de estiércol más paja de avena presentó las concentraciones más bajas para N y Fe, y lo contrario para Zn; el tratamiento de estiércol presentó las concentraciones más altas, a excepción de B y Zn. Sin embargo, lo importante del análisis foliar es que, de acuerdo con los estándares para zarzamora propuestos por Pritts y Handley (1991), la concentración de K es deficiente con 1.09% en el tratamiento de estiércol más paja de avena. En los tres tratamientos, los valores de Ca y Cu son bajos, aunque están dentro de los estándares indicados. Los valores de Mg y Zn son deficientes en los tres tratamientos y, en el caso de los valores de B, éstos son deficientes en los tratamientos estiércol más aserrín y estiércol. El único nutrimento que se encontró en altas concentraciones en la hoja fue el Mn, en el intervalo de toxicidad (Cuadro 5). En términos generales, esta información indica que en suelos delgados (40 cm de

Cuadro 4. Porcentaje de pérdida de peso del fruto cv. Cheyenne en refrigeración a 1 °C durante siete días, afectado por cubiertas orgánicas en Guerrero, Chihuahua.

Tratamiento	Fecha de corte	Pérdida de peso		
		0 días	3 días	7 días
		----- % -----		
Estiércol + paja de avena	17 Jul	0	1.10	2.28
Estiércol + aserrín		0	1.04	2.28
Estiércol		0	0.77	1.88
Estiércol + paja de avena	20 Jul	0	0.47	0.91
Estiércol + aserrín		0	0.79	1.74
Estiércol		0	0.62	1.13
Estiércol + paja de avena	27 Jul	0	1.5	3.59
Estiércol + aserrín		0	1.5	4.2
Estiércol		0	1.5	4.2

profundidad), migajón arenosos, con baja fertilidad, en el cv. Cheyenne, la mayoría de los nutrimentos son

Cuadro 5. Concentración de nutrimentos en la hoja de zarzamora cv. Cheyenne en tres tratamientos con cubierta orgánica al suelo, en Guerrero, Chihuahua.

Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	B	Zn	Fe	Cu	Mn
Estiércol + paja de avena	25.6 b [†]	3.54	10.9	7.95	1.65	60.4	8.0 a	83.0 b	8.3	881.3
Estiércol + aserrín	28.8 a	3.51	12.9	7.55	1.95	31.5	4.0 ab	91.8 a	11.3	1317.5
Estiércol	28.8 a	3.75	13.9	8.20	2.20	28.5	3.8 b	95.5 a	9.3	1222.5
Sig.	0.05*	NS	NS	NS	NS	NS	0.05*	0.006**	NS	NS

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

deficientes; por lo tanto, debe realizarse un programa de fertilización con base en la extracción de nutrimentos por la planta, combinándolo con el análisis foliar y de suelo. Este último indica deficiencia en Ca, nitratos, Zn y Cu y bajo contenido de materia orgánica. El Mn en el suelo es medianamente bajo, pero en la planta es muy alto, lo que indica una gran facilidad de la planta para absorber y trasladar nutrimentos hacia la parte aérea (Crandall, 1995).

CONCLUSIONES

- La adición de estiércol más las diferentes fuentes de materia orgánica (MO) como cubierta incrementó el contenido de MO en el suelo.
- La cubierta de paja de avena más estiércol incrementó significativamente el rendimiento de la zarzamora; sin embargo, el crecimiento del brote, el número de laterales, el número de yemas, el diámetro de tronco y el número de brotes no se afectaron significativamente.
- La zarzamora evade el problema de heladas tardías en la zona templada del estado de Chihuahua y representa una alternativa de cultivo para el productor.

LITERATURA CITADA

- Arguello-Mendoza, C. 1983. Adaptación de diversas especies frutales a las condiciones ecológicas de Bachíniva, Chih. pp. 36-39. *In: Avances de Investigación Agrícola 1982*. Vol. II, Campo Experimental Sierra de Chihuahua. Cd. Cuauhtémoc, Chih.
- Bernal-García, M.A. y A. Muratalla-Lua. 1994. Comportamiento vegetativo de zarzamosas erectas. XL Reunión Anual, Programa y Memoria de Resúmenes, Interamerican Soc. for Tropical Horticulture, Campeche, Camp. p 94.
- Busby, A.L. y D.G. Himelrick. 1998. Hand and mechanical pruning of thorny, erect-type blackberries in Alabama. *Fruit Var. J.* 52: 32-37.
- Clark, J.R. 1992. Blackberry production and cultivars in North America East of the Rocky Mountains. *Fruit Var. J.* 46: 217-222.
- Clark, J.R. y J.N. Moore. 1991. Southern highbush blueberry response to mulch. *HortTechnology* 1: 52-54.
- COSTAT. 1989. CoStat 3.03. CoHort Software. Berkeley, CA.
- Crandall, P.C. 1995. Bramble production: The management and marketing of raspberries and blackberries. Food Products Press. New York.
- Galletta, G.J., J.L. Maas, J.R. Clark y C.E. Finn. 1998. "Tripe Crown" thornless blackberry. *Fruit Var. J.* 52: 124-127.
- Ibañez-Martínez, A., A.E. Becerril-Román, A. Castillo-Morales, R.A. Parra-Quezada y C. López Castañeda. 2000. Efecto de cubiertas, riego y fertilización foliar en el desarrollo radical del manzano. *Terra* 18: 225-237.
- Merwin, I.A., W.C. Stiles y H.M. van Es. 1994. Orchard groundcover management impacts on soil physical properties. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 119: 209-215.
- Moore, J.N., W.A. Sistrunk y J.B. Buckley. 1985. 'Shawnee' blackberry. *HortScience* 20: 311-312.
- Muñoz-Rodríguez, M. y M.R. Juárez-Delfina. 1997. El mercado de frutas menores. El caso de la frambuesa y la zarzamora. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial-Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- NeSmith, D.S. 2003. Survival and vigor of southern highbush blueberry genotypes with and without pine bark mulch. *Small Fruits Rev.* 2: 81-86.
- Parra-Quezada, R.A., J.L. Rodríguez-Ontiveros y V.A. González-Hernández. 1999. Transpiración, potencial hídrico y prolina en zarzamora bajo déficit hídrico. *Terra* 17: 125-130.
- Perkins-Veazie, P., J.K. Collins y J.R. Clark. 1996. Cultivar and maturity affect postharvest quality of fruit from erect blackberry. *HortScience* 31: 258-261.
- Pritts, M. y D. Handley. 1991. Bramble production guide. NRAES 35. Natural Resource, Agriculture and Engineering Service, Cooperative Extension. Ithaca, New York.
- Ramírez-Farías, L. 1999. El potencial de los productos agropecuarios comerciales no tradicionales. *Claridades Agropecuarias* 73: 1-12.
- Sloan, R.C. y F.B. Matta. 1996. Performance of blackberry and raspberry cultivars in northern, 1992-1995. *Mississippi Agricultural and Forestry Experimental Station Research Report* 21(5): 1-3.
- Strike, B.C. 1992. Blackberry cultivars and production trends in the Pacific Northwest. *Fruit Var. J.* 46: 202-206.

PRODUCCIÓN DE JITOMATE CON ESTIÉRCOL LÍQUIDO DE BOVINO, ACIDULADO CON ÁCIDOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS

Tomato Production with Liquid Extract of Cattle Manure, Acidulated with Organic and Inorganic Acids

Juan Capulín-Grande¹, Roberto Núñez-Escobar^{1‡}, Prometeo Sánchez-García¹,
Ángel Martínez-Garza² y Marcos Soto-Hernández¹

RESUMEN

La fracción líquida del estiércol, usada como solución nutritiva, es una fuente importante de nutrimentos para las plantas en hidroponía; sin embargo, requiere de un acondicionamiento previo para abatir su pH y su alta salinidad reflejada en su elevada conductividad eléctrica (CE). El ensayo, en una primera fase, consistió en probar el uso de ácidos cítrico y fosfórico para reducir el pH del extracto líquido de estiércol bovino (ELEB) con dos valores de CE (1.8 y 3.6 dS m⁻¹). En la segunda fase, se usaron ácido nítrico, ácido fosfórico y la mezcla de ambos para abatir el pH del ELEB. Además, el ELEB se complementó en su contenido nutrimental con nitrato de calcio, sulfato de potasio y Fe-EDTA. Los resultados, en la primera fase, muestran superioridad del ácido fosfórico como acidulante, ya que las plantas de jitomate presentaron diferencia significativa en altura, rendimiento, número de frutos y contenido de clorofila. En la segunda fase, aunque no hubo diferencias entre acidulantes para altura de plantas, número de frutos y peso unitario del fruto, el mejor acidulante fue la mezcla de ácidos nítrico y fosfórico (relación 2:1), obteniéndose con ella los mayores valores en rendimiento, número de inflorescencias, número de entrenudos y diámetro del fruto.

Palabras clave: *Lycopersicon esculentum Mill., acidulantes, ácido fosfórico, ácido cítrico, ácido nítrico, hidroponía orgánica.*

¹ Instituto de Recursos Naturales, ² Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Estado de México.

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

SUMMARY

The liquid fraction of manure, used as a nutrient solution, is an important source of nutrients for plants in hydroponics; however, it requires previous conditioning in order to reduce pH and salinity, reflected in high electrical conductivity (EC). The experiment, in its first phase, consisted of testing the use of citric and phosphoric acids to reduce pH of the liquid extract of cattle manure (LECM) with two EC values (1.8 and 3.6 dS m⁻¹). In the second phase, nitric and phosphoric acids, and the mixture of both acids were used to reduce pH of LECM. Also, LECM was complemented in its nutrient content with calcium nitrate, potassium sulphate and Fe-EDTA. Results of the first phase show the superiority of phosphoric acid used as acidulant, since tomato plants exhibited a significant difference in height, yield, number of fruits, and chlorophyll content. In the second phase, although there was no difference between acidulants for plant height, number of fruits, and weight per fruit; the best acidulant was the mixture of nitric and phosphoric acids (2:1 ratio), which produced the highest values for yield, number of inflorescences, internodes, and fruit diameter.

Index words: *Lycopersicon esculentum Mill., acidulants, phosphoric acid, citric acid, nitric acid, organic hydroponics.*

INTRODUCCIÓN

Los estiércoles líquidos, comúnmente conocidos como purines, se obtienen a partir de excrementos de ganado mayor y menor. Son excrementos de animales, diluidos en el agua, que se obtienen al realizar la limpieza de sus alojamientos. Estos materiales se barren, se recogen o se arrastran con agua para almacenarlos en depósitos donde se guardan hasta que son usados (Simpson, 1986).

La utilización del estiércol en fresco y específicamente de la fracción líquida (purines),

aplicada al suelo directamente o por medio del fertirriego, ya sea en riego por goteo o hidroponía para la nutrición de cultivos, es una práctica que ofrece varias ventajas, ya que el estiércol contiene todos los nutrimentos esenciales para el desarrollo vegetal. Este material líquido es muy manejable pues contiene sólo 5 a 7% de material sólido. Además, permite la reutilización de los nutrimentos, ya que más de 50% de éstos se acumulan en el agua y ayudan a reducir la contaminación que pudieran generar estos materiales en los cauces naturales y depósitos de agua.

Uno de los problemas que presenta el estiércol líquido al usarse en los cultivos es la alta salinidad, reflejada en su elevada conductividad eléctrica. El cultivo de jitomate presenta una tolerancia media a la concentración de sales en el suelo durante su desarrollo y producción. Cornish (1992) probó el efecto de la conductividad eléctrica (CE), presente en la solución nutritiva, sobre los sólidos solubles totales y calidad del fruto de jitomate. Para tal efecto, dicho autor empleó un intervalo de CE de 1.5 a 9.0 mS cm⁻¹ y reportó que al incrementarse la CE de la solución también hubo un aumento en los sólidos solubles totales y firmeza del fruto; pero una reducción en el rendimiento y tamaño.

Nichols *et al.* (1994) demostraron que la salinidad tiene influencia en el tamaño de frutos, ya que al desarrollar plantas de jitomate en sistema hidropónico, usando cuatro valores de CE (2, 4, 6 y 8 mS cm⁻¹), observaron que, a medida que aumentó la salinidad en la solución, hubo disminución en el tamaño y número de frutos por planta. Al trabajar con plántulas de tomate de 30 días de crecimiento en invernadero, Armenta *et al.* (2001) reportaron que los valores más altos de peso seco de follaje y raíces, altura de plantas, diámetro de tallos y extracción de N, K, Ca y Mg se lograron cuando la solución nutritiva presentó una presión osmótica (PO) de 0.7 atm. Con un valor de 0.9 atm de PO hubo disminución de esos parámetros, y argumentaron que la planta realizó un mayor esfuerzo para absorber agua y nutrimentos, en detrimento de la energía metabólica, lo que se reflejó en una disminución del crecimiento y desarrollo de la planta.

Muchos insumos están restringidos para su uso en la producción orgánica de jitomate. Bajo este criterio, los estiércoles líquidos (purines) y orinas se consideran como materiales restringidos (IFOAM, 1992). Sin embargo, el reglamento de la CCE No. 2092/91, menciona que los excrementos líquidos de animales (estiércoles semilíquidos, orina, etc.) se pueden utilizar tras una fermentación controlada o

dilución adecuada (Salazar, 1999). La Norma Oficial Mexicana (Nom-037-fito-1995), publicada en el Diario Oficial de la Federación en septiembre de 1995, establece que son productos permitidos en la agricultura orgánica, el estiércol líquido u orina después de haber sido sometidos a una fermentación controlada y/o dilución apropiada, pero cuando este material proceda de cerdo, sólo se acepta con un proceso previo de composteo. En ningún caso se acepta el uso de estiércol fresco. Además, esta norma autoriza el uso de ácido cítrico (Gómez *et al.*, 1999).

En la agricultura orgánica, el empleo de compuestos de origen inorgánico y sintético no son aceptados, tal es el caso de productos acidulantes como el ácido sulfúrico, el cual, empleado como agente acidulante, además ha mostrado ser perjudicial para los cultivos por precipitación de calcio y la alta acumulación de sulfatos en la solución, ya que se requiere una gran cantidad del mismo para bajar el pH del extracto líquido de estiércol bovino (ELEB) (Capulin-Grande *et al.*, 2001). Por lo tanto, en la presente investigación se probaron un acidulante inorgánico y otro orgánico en el ELEB, intentando producir cosechas totalmente orgánicas. Bajo esta perspectiva se planteó el siguiente objetivo: Determinar la forma idónea de acondicionamiento de extracto líquido de estiércol bovino (ELEB), acidulado con dos ácidos y usado como solución nutritiva en la producción hidropónica de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.).

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se desarrolló en invernadero en las instalaciones del Colegio de Postgraduados (CP) en Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2240 m, 19° 29' N y 98° 54' O. El extracto líquido de estiércol bovino (ELEB) se recolectó del establo del Programa de Ganadería del CP. Para la separación del ELEB se utilizó la metodología descrita por Capulin-Grande *et al.* (2001), la cual consiste en diluir el estiércol fresco en agua en una relación 2:1 y filtrarla a presión a través de un tamiz de 1 mm de abertura.

Este experimento se desarrolló en dos fases.

Primera Fase Experimental

En esta fase, se usó ácido fosfórico grado reactivo como acidulante inorgánico y ácido cítrico grado industrial como acidulante orgánico, ambos ácidos preparados a una concentración 1M. Se empleó como

planta indicadora al jitomate híbrido FA-906 Gabriela. La siembra se realizó el 13 febrero de 2001 en una charola de poliestireno usando agrolita como sustrato. La emergencia se dio entre 10 y 13 días después de la siembra (DDS). El trasplante se realizó el 2 de abril y el ensayo terminó el 30 de junio de 2001. La duración del experimento fue de 134 días. Se realizaron cuatro cortes de frutos cuando éstos presentaron una coloración rojiza.

Las macetas de 10 L se llenaron a 90% de su capacidad con tezontle de tamaño sello (granulometría de 0.5 a 1.0 cm de diámetro), se colocó una planta en el centro de cada maceta cubriéndola con el sustrato. Se empleó un sistema de riego por subirrigación. Se realizaron cinco cambios de solución durante el desarrollo del experimento, con un intervalo entre ellos de 15 días. Durante los primeros 10 días después del transplante (DDT), las plantas se regaron con agua de la llave, después se prepararon soluciones nutritivas con base en ELEB con la mitad de la CE de acuerdo con los tratamientos, los cuales se regaron durante 12 días y a partir del 24 de abril se regaron con las soluciones a 100%. En las soluciones se ajustó el pH a un valor de 5.5 a 6.0 con el respectivo acidulante. Durante todo el desarrollo del cultivo se realizaron dos riegos diarios.

Se empleó un diseño de tratamientos en factorial 2 x 2: como primer factor, dos acidulantes (ácido fosfórico y ácido cítrico) y como segundo factor, dos valores de CE (1.8 y 3.6 dS m⁻¹). El diseño experimental empleado fue completamente al azar con cinco repeticiones.

Se tomó una muestra de las soluciones nutritivas antes de iniciar el riego y al finalizar éste, para su caracterización físico-química. Las variables que se tomaron para evaluar los tratamientos fueron: altura de plantas, tomada a partir de la superficie del tezontle hasta el ápice; rendimiento de frutos cosechados, con la suma del peso de los frutos en cada corte; número de frutos por planta, considerando la suma de todos los frutos de cada corte; el grado de color verde en las hojas, el cual se midió durante el periodo de crecimiento con un medidor de clorofila portátil SPAD-502 marca Minolta, usando el promedio de cinco hojas de la parte superior y a una misma altura de cada planta. Los datos de las variables tomadas se sometieron a un análisis de varianza empleando el paquete estadístico SAS, Versión 6.12 (SAS Institute, 1997).

Segunda Fase Experimental

La segunda fase del experimento consistió en aprovechar las plantas de la primera fase y sólo se cambiaron los tratamientos. Se empleó el ELEB como fuente nutrimental acidulado con ácido nítrico, fosfórico y sus mezclas, y completando la solución en su contenido nutrimental con fertilizantes inorgánicos (nitrato de calcio, sulfato de potasio y Fe-EDTA), ya que los principales elementos deficientes de acuerdo con el análisis químico que se realizó en las soluciones de la fase anterior fueron Ca, S, Fe y N. Así, se preparó una solución nutritiva completa con la cantidad de nutrimentos similar a la que presenta la solución nutritiva de Steiner (1984). Se empleó una CE de 4.0 dS m⁻¹ en todos los tratamientos.

Para completar las cantidades adecuadas de nutrimentos, se prepararon soluciones madre de los fertilizantes inorgánicos (nitrato de calcio 1 N, sulfato de potasio 0.5 N y Fe-EDTA 5 mg L⁻¹). Para preparar 10 L de solución nutritiva, se tomó la siguiente cantidad de solución madre: 150 mL de nitrato de calcio, 40 mL de sulfato de potasio y 10 mL de Fe-EDTA, éstos se depositaron en un recipiente que tenía 50% de agua y, posteriormente, se completó con la cantidad necesaria de ELEB y agua hasta alcanzar el volumen indicado y una CE de 4.0 dS m⁻¹.

Esta fase del experimento se desarrolló del 1 de julio al 15 de diciembre de 2001. Durante este periodo se hicieron siete cambios de solución. También se realizaron 10 cortes cuando los frutos presentaron una coloración rojiza. Un mes antes de terminar el ensayo se eliminó el punto de crecimiento de las plantas, tanto apical como lateral, para evitar más crecimiento y así promover el desarrollo y la maduración de todos los frutos.

Las variables que se evaluaron en esta fase fueron: a) rendimiento de frutos por planta; b) altura de plantas; c) número de entrenudos por planta; d) número de inflorescencias totales por planta; e) número de frutos por planta, f) diámetro de los frutos, g) peso por fruto, y h) número de frutos por racimo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de la Solución Nutritiva

Se realizó un análisis químico al estiércol líquido antes y después de acidularlo, para medir el efecto de los ácidos en la composición nutrimental del mismo y

después compararlos en su contenido nutrimental con la solución nutritiva Steiner (SNS) (Cuadro 1). Los resultados confirman que el nitrógeno es el nutriente en menor cantidad en las soluciones de ELEB. La concentración de nitratos y amonio, encontrada en las muestras de ELEB sin acidular, es inferior respecto al ELEB acidulado con ácido fosfórico, pero éstos tuvieron más nitratos y amonio que el ELEB acidulado con ácido cítrico; sin embargo, todas las formas de ELEB presentaron un contenido menor de nitratos que la solución nutritiva Steiner (1984). El amonio es la forma del nitrógeno que se presentó en mayor cantidad en el ELEB, puesto que los compuestos nitrogenados del estiércol recién evacuado son principalmente urea y amoníaco. Al respecto, Veenhuizen (1997) reportó que la pérdida del amoníaco procedente de la descomposición de la urea es escasa debido a su estabilidad en el agua en forma de amonio soluble cuando el pH es menor que 7.5.

Destaca un mayor contenido para la mayoría de nutrientes en el ELEB acidulado con ácido fosfórico, seguido del ELEB sin acidular y, por último, el ELEB acidulado con ácido cítrico. Sin embargo, el contenido nutrimental de los ELEB comparado con la SNS es inferior en calcio, azufre, hierro y fósforo a excepción del ELEB acidulado con ácido fosfórico; similar en potasio y superiores en magnesio, boro, cobre, manganeso y zinc. Esto confirma que el ELEB es una fuente que contiene los nutrientes esenciales y que sólo requiere de un

Cuadro 1. Contenido nutrimental del extracto líquido de estiércol bovino (ELEB) antes y después de ser acidulado y de la solución nutritiva Steiner, con conductividad eléctrica de 2.0 dS m⁻¹.

Ion	Sol. nut. [†] Steiner	ELEB sin ácido	ELEB+ H ₃ PO ₄	ELEB+ ac. cit. [‡]
N-NO ₃ ⁻	168	25	28	11
N-NH ₄ ⁺	--	46	69	27
P-H ₂ PO ₄ ⁻	31	14	308	13
K ⁺	273	207	236	174
Ca ²⁺	180	72	105	68
Mg ²⁺	48	74	79	63
S-SO ₄ ²⁻	112	48	53	21
Na ⁺	--	59	81	58
B	0.5	0.38	0.72	0.39
Cu	0.05	0.31	0.42	0.41
Fe	5.0	1.34	1.83	0.53
Mn	0.05	0.96	1.01	0.82
Zn	0.05	0.90	0.71	0.78

[†] Sol. nut. = solución nutritiva; [‡] ac. cit. = ácido cítrico.

complemento de N, P, Ca, S y Fe para formar una solución nutritiva completa y balanceada.

Las muestras de ELEB, tomadas al iniciar un periodo de riego (Cuadro 2), muestran que hubo más nutrientes en los tratamientos con mayor CE, y entre éstos, los valores máximos se obtuvieron cuando se aciduló con ácido fosfórico. Sin embargo, al final del periodo, el contenido nutrimental indicó una reducción en los tratamientos acidulados con ácido fosfórico a excepción del P, ocasionado por la absorción de la planta. Los tratamientos con ácido

Cuadro 2. Concentración nutrimental inicial y final del extracto líquido de estiércol bovino (ELEB) usado en el riego de jitomate y acidulado con dos ácidos en dos niveles de conductividad eléctrica.

Ion	ELEB + H ₃ PO ₄ 1.8 dS m ⁻¹		ELEB + ac. cit. 1.8 dS m ⁻¹		ELEB + H ₃ PO ₄ 3.6 dS m ⁻¹		ELEB + ac. cit. 3.6 dS m ⁻¹	
	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final
	----- mg L ⁻¹ -----							
N-NO ₃ ⁻	20	10	10	3	33	2	25	5
N-NH ₄ ⁺	78	2	12	2	184	4	32	2
P-H ₂ PO ₄ ⁻	275	207	11	6	526	257	19	12
K ⁺	223	23	222	122	476	56	465	159
Ca ²⁺	35	21	32	32	59	41	46	37
Mg ²⁺	73	45	40	36	99	83	71	46
S-SO ₄ ²⁻	53	87	21	32	44	106	24	34
Na ⁺	143	127	108	82	185	157	187	116
B	0.25	0.20	0.12	0.10	0.47	0.33	0.25	0.20
Cu	0.17	0.06	0.08	0.03	0.25	0.02	0.07	0.03
Fe	0.14	0.07	0.05	0.08	0.12	0.01	0.14	0.03
Mn	0.19	0.07	0.06	0.06	0.41	0.16	0.14	0.14
Zn	0.07	0.27	0.06	0.12	0.16	0.34	0.14	0.14

ac. cit. = ácidocítrico.

cítrico tuvieron valores similares debido al pobre desarrollo de la planta.

Evaluación Agronómica

En la primera fase del experimento, se observó una variación muy marcada, con significancia estadística entre tratamientos, en el desarrollo de las plantas de jitomate (Cuadro 3), destacando 50% mayor altura de aquellos tratamientos que se regaron con ELEB acidulado con ácido fosfórico, en comparación con las plantas tratadas con ELEB y ácido cítrico. Además, estas últimas mostraron un amarillamiento marcado en las hojas, lo cual se asocia con deficiencias nutrimentales. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Neumann *et al.* (2000) quienes mencionaron un pobre crecimiento de las plantas de *Lupinus* deficientes en fósforo, causado por desórdenes fisiológicos que son asociados con un incremento en la concentración de ácidos orgánicos en la rizósfera.

El rendimiento y el número de frutos producidos por cada planta fueron superiores estadísticamente en los tratamientos acidulados con ácido fosfórico respecto a aquellos tratados con ácido cítrico (Cuadro 3). Esto significa que el ácido fosfórico fue mejor acidulante del ELEB que el ácido cítrico. El mayor rendimiento y número de frutos con diferencia significativa se tuvieron en las plantas regadas con ELEB acidulado con ácido fosfórico y con la mayor CE de 3.6 dS m⁻¹. Esto debido a que fue necesario el empleo de una mayor cantidad tanto de ELEB en su elaboración, como de ácido fosfórico para su acidulación, lo que equivale a un mayor contenido de nutrimentos y, en particular, de fósforo en la solución. Estos resultados contrastan con los de Cornish (1992), quien encontró que al aumentar la CE de 1.5 a 9.0 dS m⁻¹ en la solución nutritiva hubo una

disminución en el rendimiento y tamaño de fruto de jitomate. Los peores tratamientos fueron aquellos acidulados con ácido cítrico en cualquier nivel de CE.

El ácido cítrico no tuvo una buena respuesta ya que funcionó como un agente quelatante que secuestró algunos nutrimentos y los hizo menos disponibles para las plantas, observándose visualmente deficiencias nutrimentales, menor número de frutos y bajo rendimiento en la planta de jitomate. Jones (1998) indicó el acomplejamiento de Ca²⁺ por el citrato, formando un precipitado de citrato de calcio en la rizósfera de la planta en condiciones de alcalinidad.

El contenido de clorofila en las hojas se midió indirectamente con el SPAD, resultando una mayor cantidad de unidades SPAD en aquellos tratamientos acidulados con ácido fosfórico, respecto al ácido cítrico, lo que indica una mejor nutrición y desarrollo del cultivo (Cuadro 3). Estos resultados son similares a los encontrados por Marquard y Tipton (1987), quienes reportaron valores de 40 a 55 unidades SPAD en varias hortalizas.

Los resultados de la segunda fase del estudio se muestran en el Cuadro 4. Se observan valores más altos para la mayoría de las variables evaluadas, en aquellas plantas regadas con la solución acidulada con la mezcla de ácido nítrico y fosfórico con relación 2:1, aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa respecto a los otros tratamientos.

El mayor rendimiento por planta se logró cuando las plantas se regaron con ELEB acidulado con la mezcla ácido nítrico y fosfórico 2:1 (1932.7 g) con diferencia estadística respecto al menor rendimiento logrado con ELEB acidulado con ácido fosfórico (1159.3 g). Esto se explica ya que el principal elemento deficiente en el ELEB fue el N, que en los demás tratamientos se suministró con ácido nítrico y funcionó como fuente nutrimental y acidulante. Estos

Cuadro 3. Características de plantas de jitomate regadas con extracto líquido de estiércol bovino (ELEB) con dos conductividades eléctricas y dos acidulantes.

Tratamiento	Acidulante	Conductividad eléctrica	Altura de plantas	Rendimiento de fruto	Frutos por planta	Unidades SPAD
		dS m ⁻¹	cm	g planta ⁻¹		
1	Fosfórico	1.8	96.0 a [†]	384.6 b	13.3 ab	45.6 a
2	Cítrico	1.8	50.2 c	136.9 c	4.9 b	39.5 b
3	Fosfórico	3.6	85.8 ab	624.6 a	17.5 a	49.5 a
4	Cítrico	3.6	67.6 bc	170.8 c	6.9 ab	40.9 b
CV (%)			17.39	28.07	27.01	5.95
Prob. de F			0.0002	0.0001	0.0001	0.0001

[†] Medias seguidas de la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 4. Variables de respuesta de plantas de jitomate al ser regadas con extracto líquido de estiércol bovino (ELEB) y fertilizantes minerales en solución y una conductividad eléctrica de 4.0 dS m⁻¹.

Acidulante del ELEB [†]	Diámetro de fruto cm	Rendi-miento de fruto g planta ⁻¹	No. de entre-nudos	No. de inflores-cencias
Ácido fosfórico	4.82 b	1159 b	45.4 ab	11.4 b
Ácido nítrico	5.15 ab	1538 ab	43.8 b	11.6 b
Ác. nítrico + ác. fos. (1:1)	4.78 b	1659 ab	44.0 b	12.0 ab
Ác. nítrico + ác. fos. (2:1)	5.36 a	1933 a	48.4 a	13.4 a
DSH	0.419	595.15	3.96	1.75
Prob. de F	0.0237	0.0417	0.0392	0.0406

[†] Ác = ácido; fos. = fosfórico. [‡] Medias seguidas con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

resultados concuerdan con lo reportado por varios autores como Marschner (1995) quien mencionó que el N es el principal elemento requerido por la planta, puesto que forma parte de la estructura de proteínas y ácidos nucleicos. Estos rendimientos, comparados con aquellos de la primera fase, indican que precisamente el factor limitativo fueron los nutrimentos Ca, N y Fe, al no encontrarse en las cantidades adecuadas; mientras que en esta segunda fase se adicionaron a la solución nutritiva.

La altura de plantas, el número de frutos por planta, el peso por fruto y el número de frutos por racimo no mostraron diferencia significativa en la comparación de medias de los tratamientos (Cuadro 4); sin embargo, se observa la tendencia de mayores valores en dichos parámetros cuando el ELEB se aciduló con la mezcla de ácidos nítrico y fosfórico, seguido del ácido nítrico y, por último, el ácido fosfórico.

El mayor tamaño de fruto y, por consiguiente, el mayor diámetro de éste, se obtuvieron cuando las plantas se regaron con ELEB acidulado con la mezcla de ácidos nítrico y fosfórico (relación 2:1). También podrá observarse que hubo una relación inversa muy estrecha entre el número de frutos y el peso por fruto sin diferencia estadística, correspondiendo un menor peso por fruto cuando éstos fueron en mayor número, principalmente para el tratamiento con la mezcla de ácido nítrico y fosfórico relación 1:1 (Cuadro 4). El diámetro del fruto fue mayor cuando las plantas se regaron con ELEB acidulado con ácido nítrico y fosfórico relación 2:1.

El número de entrenudos y las inflorescencias son dos parámetros importantes dentro de la evaluación, el primero indica el tamaño de la planta y, el segundo, el número de frutos que potencialmente puede producir una planta durante un periodo determinado de tiempo. Estas dos variables presentan una relación muy

estrecha; la inflorescencia sale a cada tres y cuatro entrenudos, pero cuando se disminuye el crecimiento, hay la formación de entrenudos y no la formación de inflorescencias. También el número de entrenudos en la planta tuvo una correlación muy estrecha con la altura de plantas, pues a mayor altura correspondió un mayor número de entrenudos.

CONCLUSIONES

- El extracto líquido de estiércol bovino (ELEB) acidulado con ácido cítrico y con una conductividad eléctrica de 1.8 dS m⁻¹ es deficiente en N, P, Ca, S y Fe. El ELEB acidulado con ácido fosfórico y con una conductividad eléctrica de 1.8 dS m⁻¹ es deficiente en N, Ca, S y Fe. El ELEB acidulado con ácido cítrico presenta un fuerte abatimiento de NH₄⁺.
- El ELEB usado como solución nutritiva con una conductividad eléctrica de 3.6 dS m⁻¹ y acidulado con ácido fosfórico, fue superior en la producción de jitomate comparado con el ácido cítrico.
- El ELEB como fuente nutrimental produjo el mejor rendimiento de jitomate cuando se complementó con Ca(NO₃)₂, K₂SO₄ y Fe-EDTA, diluido hasta una conductividad eléctrica de 4.0 dS m⁻¹ y acidulado con una mezcla de ácidos nítrico y fosfórico en relación 2:1, porque éstos, además, funcionan como fuente de nutrimentos.

LITERATURA CITADA

- Armenta-Bojórquez, A.D., G. Baca-Castillo, G. Alcántar-González, J. Kohashi Shibata, J.G. Valenzuela-Ureta y A. Martínez-Garza. 2001. Relaciones de nitratos y potasio en fertirriego sobre la producción, calidad y absorción nutrimental de tomate. Revista Chapingo, Serie Horticultura 7: 61-68.
- Capulin-Grande, J., R. Núñez-Escobar, J.D. Etchevers-Barra y G.A. Baca-Castillo. 2001. Evaluación del extracto líquido de

- estiércol bovino como insumo de nutrición vegetal en hidroponía. *Agrociencia* 35: 287-299.
- Cornish, P.S. 1992. Use of high electric conductivity of nutrient solution to improve the quality of salad tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) grown in hydroponic culture. *Austr. J. Exp. Agric.* 32: 513-520.
- Gómez-Tovar, L., M.A. Gómez-Cruz y R. Sch. Rindermann. 1999. Desafíos de la agricultura orgánica en México. Comercialización y Certificación. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial-Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- IFOAM (Internat. Fed. of Organic Agriculture Movements). 1992. Normas básicas para la agricultura ecológica y el procesamiento ecológico. Sao Paulo, Brasil.
- Jones, D.L. 1998. Organic acids in the rhizosphere: a critical review. *Plant Soil* 205: 25-44.
- Marquard, D.R. y J.L. Tipton. 1987. Relationship between extractable chlorophyll *in situ* method to estimate leaf greenness. *Horticulturae Sci.* 22: 1327.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition. Academic Press. London, UK.
- Neumann, G., A. Massonneau, N. Langlade, B. Dinkelaker, C. Hengeler, V. Römhel y E. Martinoia. 2000. Physiological aspects of cluster root function and development in phosphorus-deficient white lupin (*Lupinus albus* L.). *Ann. Bot. (London)* 85: 909-919.
- Nichols, A.M., K.J. Fisher, L.S. Morgan y A. Simon. 1994. Osmotic stress yield and quality of hydroponic tomatoes. *Acta Horticulturae* 361: 302-311.
- SAS Institute, Inc. 1997. SAS/STAT user's guide: Statistics. Release 6.12. Cary, NC.
- Simpson, K. 1986. Abonos y estiércoles. ACRIBIA. Zaragoza, España.
- Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. pp. 633-649. *In: Proceedings of Sixth International Congress on Soilless Culture*. International Society for Soilless Culture. Lunteren, The Netherlands.
- Veenhuizen, M.A. 1997. Ohio livestock manure and management guide. Bulletin 604. Ohio State University. Columbus, OH.

CÁLCULO DEL TRATAMIENTO ÓPTIMO ECONÓMICO DE INSUMOS AGRÍCOLAS MEDIANTE UN PROCEDIMIENTO NUMÉRICO DISCRETO

Calculation of the Optimum Economic Treatment of Agricultural Inputs Using a Discrete Numeric Procedure

Ernesto Aceves-Ruiz¹, Antonio Turrent-Fernández^{2‡}, José I. Cortés-Flores³ y Víctor Volke-Haller³

RESUMEN

Con el propósito de reducir los costos de la generación de recomendaciones para el manejo de los cultivos, se propone un método en el que se realiza el modelaje de los niveles del óptimo económico de N, P, K y densidad de población (Dp) en el cultivo de maíz, mediante una aproximación binomial. Por cada factor de estudio, se seleccionaron cinco factores de diagnóstico, que minimizaran la discrepancia entre los niveles de los óptimos observados y los calculados mediante un modelo aditivo. El espacio de exploración y el incremento de los factores de diagnóstico se realizaron arbitrariamente y el proceso de selección involucró un gran número de corridas. Se usaron, como factores potenciales de diagnóstico, la materia orgánica, P disponible, Ca, Mg y K intercambiable, pH, índice de sequía e índice de enfermedad. Los niveles del óptimo observado y los valores de los factores incontrolables se obtuvieron de nueve experimentos de campo, conducidos entre 1993 y 1995.

Palabras clave: Aproximación binomial, modelo aditivo discreto, maíz.

SUMMARY

Modelling economically optimum rates of N, P, K fertilizers and population density in maize by binomial approximation is tested in an effort to reduce the cost of developing recommendations for crop management. An additive model for five uncontrolled diagnostic factors that minimizes discrepancy between

computed and observed optimum rates was selected for each controlled factor. The selection process involved a large number of runs from arbitrarily selected factorial space and factor increment. Organic matter, available P, exchangeable Ca, Mg, and K, pH, drought index, and disease index were used as potential diagnostic factors. Nine field experiments conducted in years 1993 to 1995 provided both the observed optimum rates and values of the uncontrolled factors.

Index words: Binomial approximation, discrete additive model, maize.

INTRODUCCIÓN

La investigación para generar tecnologías que involucren la optimización de prácticas de producción en México, en general, se realiza en terrenos de los productores, y se le conoce como método de campo (Laird *et al.*, 1993). Este método se ha utilizado como procedimiento de cotejo sobre el tiempo y el espacio, para medir las interacciones de los factores controlables e incontrolables de un cultivo, en una región específica. De esto se ha generado conocimiento, del cual se han derivado soluciones al manejo de los factores controlables, según la expresión de los factores incontrolables, las relaciones de precios insumo-producto y el capital disponible por el productor. Se han utilizado diversos enfoques para el diseño de recomendaciones, como: la agrupación indiscriminada, el método CP para el diseño de agrosistemas (Turrent, 1985), el método de la ecuación empírica generalizada (Estrella *et al.*, 1975; Villalpando *et al.*, 1979) y otros procedimientos (Peña *et al.*, 1975).

Un enfoque que ha recibido atención en México es el de la ecuación empírica generalizada (EEG). Este enfoque consiste en obtener una ecuación que relaciona el rendimiento con los factores controlables experimentales y los factores de suelo, clima y manejo que afecten el aprovechamiento y aporte del suelo y/o

¹ Campus Puebla, Colegio de Postgraduados. 72130 Puebla, Puebla, México.

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

[‡] Autor responsable (aturrent@att.net.mx)

³ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

modifiquen la respuesta del cultivo al nutrimento, de una serie de ensayos conducidos en una región determinada. Esta EEG permite estimar al tratamiento óptimo económico (TOE) de los factores de estudio para cada uno de los sitios experimentales, a través de la interacción de esos factores de estudio y los de sitio. No obstante el avance en el mejoramiento de este enfoque, aún hay ciertos problemas, como: 1) el cálculo de la EEG, respecto a las diferencias en los modelos de respuesta a escala de sitio experimental, 2) la casi-multicolinealidad que se presenta entre las variables de sitio que entran en el modelo, y 3) el alto costo del ejercicio, ya que éste requiere de una gran cantidad de experimentos de campo. Para solucionar una parte de este problema, Volke y Etchevers (1988) sugirieron que es práctico definir una función en la que el tratamiento óptimo de cada uno de los factores de parcela a escala de sitio experimental, se exprese como función de los factores de clima, suelo y manejo que los modifican. De estas funciones, se predecirían directamente las dosis óptimas de cada factor de parcela, a partir del conjunto de valores de los factores de sitio. Esta manera de generar los TOE factor por factor simplifica el problema del cálculo de la EEG; más no así, el problema del alto costo asociado a los experimentos de campo.

Turrent *et al.* (1994) propusieron un procedimiento numérico discreto, apoyado en el método de campo, para la generación de recomendaciones sobre prácticas de producción de una región. Este procedimiento reducirá, de manera sustantiva, el costo de generación de recomendaciones. Este método propone que el TOE de un factor de parcela puede aproximarse con un modelo aditivo-binomial, o bien, con un no-aditivo-binomial, que involucren a los factores de sitio.

Turrent *et al.* (1993), apoyados en información histórica sobre la respuesta del maíz al N, P, K y densidad de población y en principios “putativos”, elaboraron un manual de diagnóstico-prescripción para el cultivo de maíz en el estado de Puebla. Este manual es un diseño *a priori* que habría de ser validado. En este trabajo, se retomaron los factores de diagnóstico que se consideraron en el manual, además se incluyeron otros.

Los objetivos del presente trabajo son: 1) Analizar la factibilidad de reducir el número de experimentos de campo para la generación de TOE, mediante soluciones numéricas apoyadas en modelos aditivos, y 2) validar el manual de diagnóstico-prescripción para el cultivo de maíz del Estado de Puebla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Kemphorne (1952) propuso el modelo aditivo (Ecuación 1) y el no-aditivo (Ecuación 2) para la realización de interacciones en los factoriales 2^k . Turrent *et al.* (1994) propusieron que la dosis óptima económica (DOE) de factor de parcela, por ejemplo N, puede aproximarse con estos modelos para un conjunto factorial 2^n agrosistemas definidos por f factores de sitio, en los que cada factor de sitio asume sólo dos valores: bajo o alto, es decir, se aproximan mediante una distribución binomial.

$$N_{ijk\dots n} = M + 1/2[\pm(A)\pm(B)\pm\dots\pm(F)] \quad (1)$$

$$N_{ijk\dots n} = M + 1/2[\pm(A)\pm(B)\pm(A*B)\pm\dots] \quad (2)$$

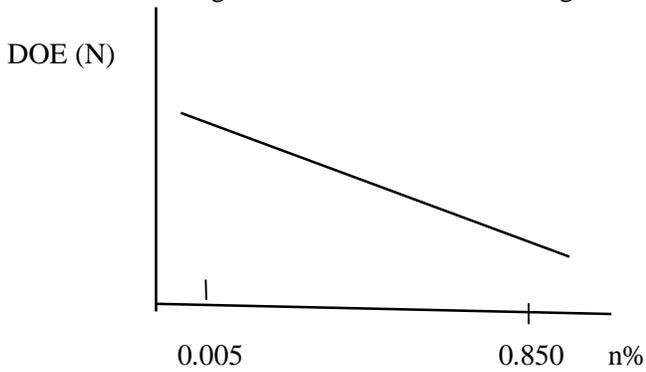
donde: $N_{ijk\dots n}$ es el TOE calculado para un conjunto de agrosistemas; M es el TOE medio para el conjunto de agrosistemas; A es el efecto principal (EP) del primer factor de sitio sobre la DOE de N. Cuando el primer factor de sitio asume el valor bajo, el efecto principal de A es afectado por el signo negativo, y cuando asume el valor alto, el EP es afectado por el signo positivo; B es el EP del segundo factor de sitio sobre la DOE de N y F es el EP del F^{avo} factor de sitio sobre la DOE de N. Estos factores son afectados por el signo negativo o positivo, igual que el primer factor; $A*B$ es la interacción entre los factores A y B sobre la DOE de N.

En el caso hipotético de que la DOE de N en una región dependiera sólo del contenido de N total del suelo, n, y que esta relación fuera lineal:

$$N_i = a + bn \quad (3)$$

donde: N es la DOE del fertilizante nitrogenado, n es el contenido de nitrógeno total del suelo, expresado en %, a es la ordenada al origen y b es la pendiente.

Esta relación gráficamente se vería como sigue:



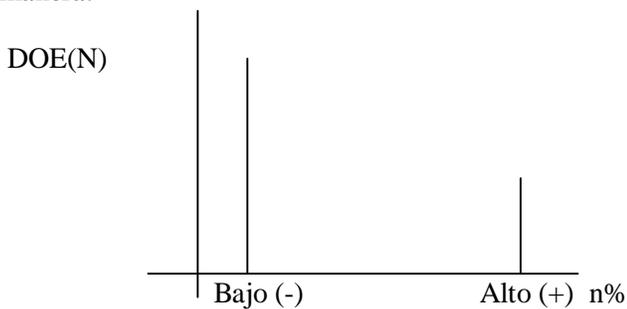
La relación anterior puede llevarse a una aproximación binomial, trinomial, tetranomial y pentanomial. Las Ecuaciones 1 y 2 únicamente son aplicables en el caso de aproximación binomial. Cuando se desee realizar las otras aproximaciones, los modelos deben ser modificados. En este ejercicio únicamente se realizará la aproximación binomial.

Para llevar la relación anterior a una aproximación binomial, puede usarse el modelo discreto binomial (Kempthorne, 1952) y, de esta forma, generar los dos agrosistemas: uno, con el valor bajo de n y, otro, con el valor alto de n, para lo cual, se requiere de imponer la condición de que si $n \leq \bar{N}$, entonces $n = -1$, y, si $n > \bar{N}$, entonces $n = +1$; de esta forma se pasa de la variable n (cuantitativa) a la n binomial, que tiene dos valores posibles: -1 (bajo) y +1 (alto). Con esto la relación se transforma a:

$$N_i = a + bn \Rightarrow N_i = M + 1/2[\pm(N^*)] \quad (4)$$

donde: n puede asumir valores de -1 ó +1, cuando n es el valor bajo, se usa el signo negativo y, si n es alto, se usa el signo positivo; M es la media de la DOE de N de los dos agrosistemas; N* es la diferencia entre N para el valor alto de n y N para el valor bajo de n.

Gráficamente, la relación se vería de la siguiente manera:



Considérese el caso hipotético en el que la DOE de nitrógeno, N, del maíz en una región, estuviera definida por la expresión:

$$N_{opkrcmsefd} \quad (5)$$

donde: N se expresa en $kg\ ha^{-1}$, el subíndice o representa al factor potencial de diagnóstico (FPD) contenido de materia orgánica de la capa arable, que puede asumir dos valores: -1 (bajo) y +1 (alto). El valor de o es bajo, cuando el contenido de materia orgánica es igual o inferior a la media de o en la región y es alto cuando lo rebase. El subíndice p representa al fósforo aprovechable en la capa arable, pudiendo también asumir los valores de -1 y +1; k representa al contenido de potasio intercambiable, r es el pH, c es el contenido de calcio intercambiable, m es el magnesio intercambiable, s es el índice de sequía, e es el índice de enfermedad, f es la fecha de siembra y d es la profundidad del suelo. Cada uno de estos FPD puede asumir dos valores dentro del modelo binomial: bajo y alto, según se define para el FPD de materia orgánica.

De la misma manera como para la DOE de N, puede haber expresiones para las DOE de los fertilizantes fósforo y potasio, y para la densidad de población.

Cuando se retoma el caso del nitrógeno: la Expresión 5 representa uno de los 2^{10} valores exactos posibles de la DOE de N, para igual número de agrosistemas, definidos por la combinación específica de dos niveles y 10 propiedades del agrosistema. Si se conocieran los 2^{10} valores exactos de las DOE de N para esos agrosistemas y considerando ahora al modelo empírico aditivo para calcular los estimadores adecuados de esas 2^{10} DOE de N para maíz en la región, aquel quedaría como:

$$N_{opkrcmsefd} = \bar{N} + 1/2[\pm(O^*)\pm(P^*)\pm(K^*)\pm(R^*)\pm(C^*)\pm(M^*)\pm(S^*)\pm(E^*)\pm(F^*)\pm(D^*)] \quad (6)$$

donde: \bar{N} es la media de las DOE de N en los 2^{10} agrosistemas posibles, O^* , P^* , K^* , R^* , C^* , M^* , S^* , E^* , F^* y D^* son los efectos principales de los siguientes FPD, sobre la dosis óptima económica de N: el contenido de materia orgánica, el contenido de fósforo en el suelo, el de potasio, del pH, del calcio intercambiable, del magnesio intercambiable, del índice de sequía; del índice de enfermedad, de la fecha

de siembra y de la profundidad del suelo, respectivamente.

Normalmente se desconoce los valores del vector \bar{N} , O^* , P^* , K^* , R^* , C^* , M^* , S^* , E^* , F^* , D^* para poder calcular los 2^{10} valores de la DOE de N de los agrosistemas. Sin embargo, se puede, por un proceso iterativo (o de barrido) seleccionar, de un número muy grande de vectores arbitrarios, aquel que mejor aproxime al vector exacto, si es que se dispusiera de un criterio de selección.

El Cuadro 1 muestra un ámbito arbitrario de valores de \bar{N} , O^* , P^* , K^* , R^* , C^* , M^* , S^* , E^* , F^* , D^* que da origen a 5^{11} vectores (48.8 millones de vectores) de posibles valores de los efectos principales, que surgen de la combinación de cada uno de sus valores. De este gran grupo de vectores considérese al primero:

$$\bar{N} = 60, O^* = 10, P^* = 10, K^* = 10, R^* = 10, C^* = 10, M^* = 10, S^* = 10, E^* = 10, F^* = 10, D^* = 10.$$

Al operar este vector sobre la Expresión 6, se está en condiciones de generar las 2^{10} posibles DOE de N, calculadas para ese primer vector. Si se dispusiera de los DOE de N observados en campo de cada uno de los 2^{10} agrosistemas, se podría obtener las discrepancias entre las DOE calculados con el vector y las observadas en campo; estas discrepancias se podrían expresar en términos de la media y desviación estándar de esas discrepancias. La media de las discrepancias mide el sesgo de las DOE calculadas respecto a las observadas, en tanto que la desviación estándar de las discrepancias mediría la precisión de la estimación. Si se realizara este ejercicio para los 5^{11} posibles vectores, algunos de ellos se aproximarían más a la combinación de media y desviación estándar igual a cero. La mejor solución será aquel vector que haga mínimo a esos dos valores simultáneamente.

El hecho de realizar el cálculo de la media y desviación estándar de las discrepancias sobre un número muy grande de observaciones, 2^{10} , haría improbable que un vector al azar, esto es, que surgiera de una combinación de números al azar, se colara como una solución numérica aceptable. Obviamente, no se tiene acceso a un número grande de observaciones de DOE de N por lo caro del método de campo, pero sí se podría aspirar a acumular de 10 a 20 observaciones, las cuales seguirían siendo una barrera para que se colaran soluciones al azar. Si, en cambio,

Cuadro 1. Lista de factores potenciales de diagnóstico y valores de los efectos principales por explorar, para la DOE de nitrógeno.

Factor potencial de diagnóstico		Valores por explorar de los efectos principales				
		kg ha ⁻¹				
Media de N	\bar{N}	60	70	80	90	100
Materia orgánica	O^*	-10	-5	0	+5	+10
Fósforo aprovechable	P^*	-10	-5	0	+5	+10
Potasio intercambiable	K^*	-10	-5	0	+5	+10
Calcio intercambiable	C^*	-10	-5	0	+5	+10
Magnesio intercambiable	M^*	-10	-5	0	+5	+10
pH	R^*	-10	-5	0	+5	+10
Índice de sequía	S^*	-10	-5	0	+5	+10
Índice de enfermedad	E^*	-10	-5	0	+5	+10
Fecha de siembra	F^*	-10	-5	0	+5	+10
Profundidad del suelo	D^*	-10	-5	0	+5	+10

se tuviera una sola observación de DOE de N, se sabe intuitivamente que la probabilidad de que apareciera al azar una solución numérica aceptable, sería alta.

En la actualidad, con computadoras de alta capacidad, es posible realizar el ejercicio con 5^{11} vectores. Esta tecnología electrónica permitiría reducir ampliamente el número de experimentos de campo necesarios para el diseño de recomendaciones. Sin embargo, con el modelo no-aditivo (Ecuación 2), se avanzaría más en precisión, pero el ejercicio de computación se incrementaría de manera amplia. Mientras que con el modelo aditivo, siguiendo el mismo ejemplo, tiene 11 elementos en el vector, en el modelo no-aditivo que incluye a las 55 interacciones de dos factores, además de los efectos principales; habría 5^{66} vectores posibles, si por cada efecto principal se explorarían cinco valores posibles. Como puede apreciarse, el número de vectores y de elementos por vector que resulta es inmanejable para el estado actual de la tecnología electrónica. Este problema puede superarse, si se seleccionaran *a priori* un cierto número de interacciones, que agrónomicamente tuvieran sentido, de tal forma que se limitara el número de vectores, por ejemplo, a 5^{20} .

Estrategia

Se dispuso de nueve experimentos (conducidos en 1993, 1994 y 1995) y 15 factores potenciales de diagnóstico (FPD), para este estudio, que son examinados agrónomicamente en otra publicación (Aceves *et al.*, 2002).

Se supuso que el valor medio, observado de cada factor potencial de diagnóstico en los nueve experimentos, se aproximaba razonablemente a la media correspondiente de ese FPD en la región del Distrito de Desarrollo Rural de Cholula, Puebla. De esta manera, los mismos nueve experimentos se clasificaron en sus agrosistemas correspondientes, de acuerdo con la distribución binomial, suponiendo que todos los factores potenciales de diagnóstico eran factores de diagnóstico. En el Cuadro 2, se muestra esta clasificación.

Posteriormente, se seleccionaron cuatro o cinco factores de diagnóstico por factor de estudio. Esto se llevo a cabo realizando un análisis de regresión, con el procedimiento MAXR, entre las DOE de cada factor de estudio y los FPD, seleccionando los primeros cuatro o cinco factores que entraran al modelo. La selección de cuatro o cinco fue por que no se contaba con un equipo de cómputo capaz de procesar a todos los factores de diagnóstico.

A los factores seleccionados, se les asignó un ámbito arbitrario de exploración con 13 niveles o coeficientes. En el Cuadro 3, se presentan los factores potenciales de diagnóstico y el ámbito arbitrario de exploración de sus coeficientes para la DOE de N. El número posible de vectores arbitrarios de coeficientes es de $11 \cdot 13^5 = 4'084,223$. Nótese que entre los 13 niveles de cada FPD se incluye al valor 0,

para explorar la hipótesis de si el FPD es factor de diagnóstico o no.

Los mismos factores potenciales de diagnóstico y su ámbito arbitrario de exploración, se utilizaron para estimar la DOE de N de los dos genotipos de maíz. Para los casos de DOE de fósforo, potasio y densidad de población, se realizó el mismo proceso, pero con diferentes factores de diagnóstico. Los factores para DOE de fósforo fueron: P, O, acidez del suelo (A), índice de sequía (S) y índice de enfermedad (E); para DOE de potasio: O, K, índice de enfermedad (E), Y; para densidad de población: Y, E, A, FF, K.

Para realizar el proceso descrito anteriormente, se preparó un programa en lenguaje SAS, para que calculara de forma secuencial la DOE de N de cada vector en cada uno de los agrosistemas en que se incluían los nueve experimentos de campo. El mismo programa calculó la media y la desviación estándar de las discrepancias entre la DOE calculada con el primer vector de coeficientes y la DOE observada, en los $11 \cdot 13^5 = 4'084,223$ vectores posibles.

Primera etapa. Se adoptó la táctica de realizar el proceso anterior tres veces; en cada uno de ellos, se separó al azar a uno de los nueve experimentos, es decir, una DOE de N observada. En cada uno de los procesos, se seleccionó a los mejores 500 vectores, por factor y variedad, que presentaran las menores medias y desviaciones estándar de las discrepancias

Cuadro 2. Clasificación de nueve experimentos en agrosistemas de acuerdo con una distribución binomial de los factores de sitio.

Experimento	GEN [‡]	Factores de sitio [†]														
		Y	P	Ca	M	K	A	R	O	Ar	I	T	FM	FF	S	E
PT93	C	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
	H	-1											-1	-1	+1	+1
PC93	C	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
	H	-1											+1	+1	+1	+1
HC93	C	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1
	H	+1											-1	-1	-1	+1
PC193	C	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1
	H	+1											-1	-1	-1	-1
HX94	C	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
	H	+1											+1	+1	+1	+1
PC94	C	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
	H	-1											+1	+1	+1	+1
HT94	C	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1
	H	+1											+1	+1	-1	+1
HT95	C	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
	H	+1											+1	+1	-1	-1
PC95	C	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
	H	+1											+1	-1	-1	-1

[†] Y, P, Ca, M, K, A, R, O, Ar, I, T, FM, FF, S y E significan rendimiento de grano, fósforo aprovechable, calcio, magnesio potasio intercambiable, acidez del suelo, pH, materia orgánica, % de arena, % de limo, % de arcilla, días a floración masculina, días a floración femenina, sequía e índice de enfermedad, respectivamente. [‡] C = criollo, H = híbrido, H-137.

Cuadro 3 Lista de factores de diagnóstico para la DOE de N y su ámbito arbitrario de exploración.

Factor de diagnóstico		Ámbito arbitrario de exploración													
		kg ha ⁻¹													
Media de N	\bar{N}	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200			
Materia orgánica	O	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	
Sequía	S	-40	-45	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	
Días a floración femenina	FF	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	
Arcilla, %	T	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	
Calcio intercambiable	C	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	

entre las ocho DOE calculados y las ocho DOE observados. De esta manera, al final de los tres procesos, se disponía de 1500 vectores para la DOE (N) en ambas variedades. El mismo proceso se repitió para las DOE de P, K y D, para ambas variedades.

Segunda etapa. Los 1500 vectores, seleccionados por cada factor y variedad en la primera etapa, se utilizaron para realizar una nueva corrida, ahora con los tres experimentos eliminados previamente al azar. De éstos se seleccionó al vector de coeficientes que generara la menor media y desviación estándar de las discrepancias entre la DOE calculada y la DOE observada. Los valores de cada uno de los elementos del vector constituyen los coeficientes de los factores de diagnóstico que se utilizarían en la región de estudio para generar las DOE de los factores N, P, K y D, en ambas variedades.

Tercera etapa. El mejor vector de la segunda etapa se utilizó para realizar una nueva corrida con los nueve experimentos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar la segunda etapa del proceso, se encontraron varios vectores con la misma media y desviación estándar de discrepancias. Esto fue más severo en el caso del nitrógeno y fósforo. Se decidió realizar la tercera etapa con los vectores que presentaran la misma media y desviación estándar, y que, además, presentaran consistencia agronómica. Continuó presentándose el problema únicamente para el caso de la densidad de población en el genotipo criollo.

En el Cuadro 4, se presentan los mejores vectores para los factores N, P, K y D de las dos variedades, además de su media y desviación estándar correspondiente. Si se toma de este cuadro al vector de la DOE de nitrógeno para el genotipo criollo, este vector corresponde al modelo aditivo:

$$N_{\text{osfftc}} = 120 + 1/2[\pm(-40) \pm (-25) \pm (-20) \pm (-30) \pm (10)]$$

En este caso, se tiene que la O, T, S y FF en los sitios donde se encuentra a valores bajos incrementan la DOE de N, en tanto que donde se encuentra a valores altos lo disminuyen. La O presenta este efecto sobre la DOE de N, debido a que ésta es un gran reservorio de nitrógeno y, por lo tanto, al encontrarse a valores altos, proporciona mayor cantidad de nitrógeno. El contenido alto de arcilla, debido a las cargas que presentan en su superficie, favorece la fijación del nitrógeno, principalmente en forma de amonio, y lo libera lentamente, evitando, de esta forma, pérdidas de éste por lixiviación y volatilización. La sequía provoca que la planta disminuya su actividad metabólica, por lo que disminuye la absorción de nutrientes. Todo lo anterior es agronómicamente consistente. En cuanto a la variable FF, de acuerdo con el modelo, su efecto es contradictorio, ya que a valores bajos incrementa la DOE de N y a valores altos la disminuye, para lo cual no hay una explicación clara, sin embargo, su efecto probablemente se deba a que es una variable “proxy”, es decir, que ésta refleja el efecto de otra variable que no se evaluó en el presente estudio, pero esto con la información con que se cuenta no se puede demostrar.

En el Cuadro 4, puede apreciarse que el procedimiento numérico y de barrido, con los factores de diagnóstico seleccionados, sobreestima las DOE de N y P (la discrepancia media es mayor que cero), mientras que, para el K y la D, las subestima (la discrepancia media es menor que cero), en ambos genotipos. El mejor modelo obtenido muestra una desviación estándar de 33.6 kg ha⁻¹ de N en cada DOE calculada para el maíz criollo; en cambio, la desviación estándar es de 13.2 kg ha⁻¹ de N en el caso del H-137.

En el mismo Cuadro 4, puede apreciarse que la materia orgánica (O), juega un papel importante en el

Cuadro 4. Lista de los vectores seleccionados, con su media (MED) y desviación estándar (D. EST.) de las discrepancias de los tratamientos óptimos económicos observados y calculados.

Factor de diagnóstico	Vectores seleccionados por nutrimento y genotipo							
	N		P ₂ O ₅		K ₂ O		D	
	C	H	C	H	C	H	C	H
O	-40	-45	-10	-15	-5	-10	-10	-5
S	-25	-30	-25	-10	-	-	-	-
P	-	-	0	0	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-25	-40	10	-15
FF	-20	0	-	-	-	-	-20	0
E	-	-	-5	-	0	0	-5	5
T	-30	-40	-	-	-	-	-	-
Ca	10	5	-	-	-	-	-	-
A	-	-	-15	-20	-	-	0	10
Y	-	-	-	-	10	10	-10	-5
M	120	120	40	50	20	20	60	60
MED	3.611	0.00	0.833	4.722	-6.11	-4.44	-4.16	-4.72
D. EST.	33.61	13.22	22.22	17.87	5.46	15.50	6.12	17.69

O = materia orgánica, S = índice de sequía, P = fósforo aprovechable, K = potasio intercambiable, FF = días a 50% de floración femenina, E = índice de enfermedad, T = % de arcilla, Ca = calcio intercambiable, A = acidez del suelo, Y = rendimiento de grano, M = tratamiento óptimo económico medio para el conjunto de agrosistemas, N = nitrógeno, P = fósforo, K = potasio, D = densidad de población, C = maíz criollo, H = maíz híbrido.

TOE de N, P y K. Para este factor, el manual de Diagnóstico-Prescripción (MDP) considera tres categorías (< 1%, de 1 a 3%, > 3%), mientras que el contenido de O observado en los nueve experimentos no sale de la primer categoría (< 1%) considerada en el MDP, por lo cual, para que sea útil en el distrito de Cholula, las categorías del MDP deben de ajustarse.

En el Cuadro 5, se presentan las DOE de N, P, K y D, observados, calculados y los recomendados por el MDP para el cultivo de maíz del estado de Puebla. En este cuadro puede observarse que el MDP sobreestima a la recomendación de N, P y D con 35, 36.2 kg ha⁻¹ y 4.4 miles de plantas en el genotipo criollo [estos valores se obtienen restando al valor promedio de cada uno de los nutrimentos o factor, del método referido, el valor promedio obtenido con el método de campo (observado) para el mismo nutrimento y variedad], mientras que para el potasio en el mismo material lo subestima en 31.1 kg ha⁻¹. Con los datos del Cuadro 5, se puede calcular las desviaciones estándar de las discrepancias de las DOE observadas y las recomendadas en el MDP para el genotipo criollo y éstas son de 51.08 kg ha⁻¹, 44.9 kg ha⁻¹, 36.83 kg ha⁻¹ y 11.46 miles de plantas ha⁻¹ para N, P, K y D, respectivamente, mientras que para el maíz híbrido son 62.1 kg ha⁻¹, 46.77 kg ha⁻¹, 42.57 kg ha⁻¹ y 13.23 miles de plantas ha⁻¹ para N, P, K y D, respectivamente. Si se comparan estas desviaciones con las obtenidas con el procedimiento propuesto en este estudio, se encuentra que las del MDP son más

imprecisas. Esto indica que los coeficientes que se utilizaron para obtener las DOE en el MDP deben modificarse y, además, deben incluirse los factores de diagnóstico S, FF, T, Ca, E, y A para mejorar la precisión y disminuir el sesgo en las recomendaciones.

Al parecer, con el procedimiento numérico y de barrido, se reduce el número de experimentos para generar recomendaciones óptimas económicas; sin embargo, es necesario seguir realizando más investigación con el procedimiento, en el cual se incluyan un mayor número de factores de diagnóstico, y compararlo con otros enfoques para la generación de recomendaciones.

CONCLUSIONES

- Los coeficientes de los factores de diagnóstico utilizados para generar las recomendaciones en el manual deben de modificarse y es necesario incluir a otros factores de diagnóstico, para tener una mayor precisión y menor sesgo en las recomendaciones que se generen.
- El método numérico y barrido parece ser una alternativa para generar recomendaciones de fórmulas de producción para el cultivo de maíz.
- El método propuesto tiende a sobreestimar la DOE de nitrógeno y fósforo, mientras que para el potasio y para la densidad de población los subestima.

Cuadro 5. Tratamientos óptimos económicos observados, del manual de diagnóstico-prescripción y calculados, en nueve sitios experimentales.

Experi- mento	V	Tratamiento óptimo económico											
		Observado				MDP [†]				Numérico y barrido			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	D	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	D	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	D
----- kg ha ⁻¹ -----													
PT93	C	100	45	50	65	155	80	0	60	117.5	42.5	40	62.5
	H	100	60	40	60	175	90	0	70	105.0	62.5	40	67.5
PC93	C	170	60	0	60	155	80	0	60	87.5	32.5	0	62.5
	H	110	60	0	60	175	90	0	70	100.0	47.5	0	52.5
HC93	C	100	60	45	60	155	80	0	60	112.5	52.5	35	57.5
	H	100	60	70	60	175	90	0	70	95.0	57.5	40	62.5
PC193	C	170	75	20	70	155	80	0	60	172.5	67.5	15	72.5
	H	195	85	30	80	175	90	0	70	175.0	72.5	10	42.5
HX94	C	135	10	15	60	155	80	0	60	147.5	22.5	15	67.5
	H	150	55	5	65	175	90	0	70	145.0	42.5	10	57.5
PC94	C	125	35	40	40	155	80	0	60	127.5	37.5	30	47.5
	H	125	35	40	40	175	90	0	70	145.0	62.5	40	67.5
HT94	C	110	50	30	40	155	80	0	60	122.5	47.5	30	52.5
	H	140	45	65	75	175	90	0	70	135.0	52.5	50	72.5
HT95	C	60	55	40	55	155	80	0	60	92.5	42.5	25	52.5
	H	95	30	25	75	175	90	0	70	95.0	37.5	40	67.5
PC95	C	110	5	40	50	155	80	0	60	132.5	57.5	35	62.5
	H	110	20	25	75	175	90	0	70	130.0	57.5	40	57.5
Promedio	C	120	43.8	31.11	55.55	155	80	0	60	123.6	44.72	25	59.72
	H	125	50	33.33	65.5	175	90	0	70	125.0	54.72	30	60.83
Diferencias [‡]	C	-	-	-	-	35.0	36.2	-31.1	4.4	3.6	0.9	-6.1	4.17
	H	-	-	-	-	50.0	40.0	-33.3	4.5	0.0	4.7	-3.3	-4.67

[†] MDP es Manual de Diagnóstico-Prescripción. La primera letra significa régimen de humedad (P = punta de riego, H = temporal con humedad residual), segunda letra significa localidad (T = San Pedro Tlaltenango C = San Mateo Capultitlan, X = Santa Ana Xalmimilulco), el número es el año en que se llevó a cabo; V = variedad (C = criollo, H = híbrido H-137); N = dosis óptima económica de nitrógeno; P₂O₅ = dosis óptima económica de fósforo; K₂O = dosis óptima económica de potasio; D = dosis óptima económica de densidad de población. [‡] Las diferencias de los tratamientos óptimos económicos por nutrimento y variedad se obtienen restando a los valores promedio obtenidos con los métodos MDP y numérico y barrido el valor promedio observado por cada nutrimento y variedad.

LITERATURA CITADA

- Aceves-Ruiz, E., A. Turrent-Fernández, J.I. Cortés-Flores y V. Volke-Haller. 2002. Comportamiento agronómico del híbrido H-137 y materiales criollos de maíz en el valle de Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25: 339-347.
- Estrella-Chulin, N., A. Turrent-Fernández y R. Núñez-Escobar. 1975. Relaciones empíricas entre el rendimiento de maíz de temporal y algunos factores ambientales en la región Chalco-Amecameca. *Agrociencia* 19: 159-188.
- Kemphorne, O. 1952. *The design and analysis of experiments*. Wiley. New York.
- Laird, J.R., A. Turrent-Fernández, V. Volke-Haller y J.I. Cortés-Flores. 1993. La investigación en productividad de agrosistemas. Cuadernos de Edafología 18. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Peña-Olvera, B., A. Turrent-Fernández y H. Cuanalo-de la Cerda. 1975. Evaluación de un levantamiento fisiográfico cuando se utiliza como base para desarrollar recomendaciones sobre prácticas de producción de cultivos. *Agrociencia* 19: 93-106.
- Turrent-Fernández, A. 1985. El agrosistema, un concepto útil dentro de la disciplina de productividad. *Escritos de la metodología de la investigación en productividad de agrosistemas* 3. Colegio de Postgraduados. Chapingo, estado de México.
- Turrent-Fernández, A., R. Avendaño-Salazar, R. Mendoza-Robles, J.I. Cortés-Flores, A. Espinosa-Calderón, R. Moreno-Dahme, F. Alemán y R. Garza-García. 1993. Manual de diagnóstico-prescripción para el cultivo de maíz en el estado de Puebla: Provincias agronómicas de riego y temporal de muy buena y buena productividad. *Centreo de Investigaciones de la Región Centro. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias*. Texcoco, estado de México.
- Turrent-Fernández, A., J.L. Zuñiga-González, R. Moreno-Dahme y R. Avendaño-Salazar. 1994. El sistema PRONAMAT de diagnóstico-prescripción para el cultivo de maíz: II. El diseño de manuales de diagnóstico-prescripción. *Terra* 12: 159-168.
- Villalpando-I., J.F., A. Turrent-Fernández y F. Puente-F. 1979. Efecto de algunos factores ambientales sobre la respuesta del maíz de temporal al fertilizante fosfórico en la planicie de Huamantla. *Agrociencia* 36: 163-178.
- Volke-Haller, V. y J.D. Etchevers-Barra. 1988. Calibración del análisis de suelo para nitrógeno y fósforo en maíz de temporal en suelos de la Mixteca de Cardenas, Oaxaca. *Agrociencia* 73: 19-42.

ROTACIÓN MAÍZ-AVENA FORRAJERA CON LABRANZA DE CONSERVACIÓN EN EL ALTIPLANO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Corn-Forage Oats Rotation with Conservation Tillage in the Plateau of San Luis Potosi, Mexico

M.A. Martínez-Gamiño^{1‡} y C. Jasso-Chaverría¹

RESUMEN

La labranza de conservación en la región del Altiplano de San Luis Potosí, México no ha tenido el éxito de adopción como en otros países latinoamericanos, debido, principalmente, al uso intensivo de los esquilmos en la alimentación de ganado. Como una alternativa a esta problemática se estableció una rotación maíz-avena forrajera con el objetivo de evaluar el efecto de siete métodos de manejo del suelo antes de la siembra sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, el rendimiento de grano, rastrojo de maíz y avena forrajera, la cantidad de forraje disponible para los animales, y la rentabilidad. De 1996 a 2001, se trabajó con una rotación maíz-avena forrajera con riego donde el maíz se estableció durante el ciclo de primavera-verano y la avena durante el de otoño-invierno. Se evaluaron los siguientes métodos de preparación del suelo: tradicional con un barbecho y rastra (B+R), inversión de los primeros 10 cm, sin inversión de los primeros 10 cm, y labranza cero con 0, 33, 66 y 100% de cobertura. Con labranza cero + 66% de cobertura, la densidad aparente se redujo en 6%, la infiltración inicial y la humedad del suelo se incrementaron 32 y 57%, respectivamente; el rendimiento de grano y rastrojo de maíz fueron mayores en 87 y 49% con relación al método B+R. Con el forraje de avena producido durante el ciclo otoño-invierno, la cantidad de forraje fue mayor. La labranza cero + 66% de cobertura obtuvo una relación beneficio-coste de 2.72 contra 2.27 en labranza convencional.

Palabras clave: *propiedades del suelo, rentabilidad, rendimiento.*

¹ Campo Experimental San Luis, Centro de Investigación Regional del Noreste, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Santos Degollado 1015-A, Col. Cuauhtémoc, 78270 San Luis Potosí, S.L.P., México

[‡] Autor responsable (martinez.miguelangel@inifap.gob.mx)

Recibido: Agosto de 2003. Aceptado: Septiembre de 2004.
Publicado como nota de investigación en
Terra Latinoamericana 23: 257-263.

SUMMARY

Conservation tillage in the Plateau of San Luis Potosi, Mexico has not had the success of adoption as in other Latin American countries because of the intensive use of crop residues to feed animals. As an alternative to this problem, a rotation of corn and forage oats was established to assess the effect of seven soil management methods before planting on physical and chemical soil properties, corn and forage oat yields, quantity of forage available for animals, and profitability. From 1996 to 2001, a rotation of corn and forage oats under irrigation was used, where corn was established in the spring-summer growing season and oats during the fall-winter season. The following tillage methods were evaluated: traditional with plow and disk (B+R), disturbing the upper 0-10 cm layer, without disturbing the upper 0-10 cm layer, and zero tillage plus 0, 33, 66, and 100% mulch. With zero tillage plus 66% mulch, bulk density was reduced 6%, initial soil infiltration and soil moisture were increased 32 and 57%, respectively; grain and corn stubble yield was improved by 87 and 49% compared to that of B+R. With the oat forage produced during the fall-winter season, the quantity of forage increased. The zero tillage plus 66% mulch treatment allowed a benefit/cost ratio of 2.72 compared to 2.27 with B+R.

Index words: *soil properties, profitability, yield.*

INTRODUCCIÓN

“La verdad es que nadie ha expuesto jamás una razón científica para arar”. Esta frase fue mencionada por Edward H. Faulkner en la década de los cuarenta y demostró que la erosión, el empobrecimiento de los suelos y la reducción en rendimiento son el resultado de prácticas inadecuadas en la preparación de la cama de siembra. A pesar de haber sido fuertemente criticado en su época, en la actualidad se le está dando la razón al cuestionar la eficiencia del uso del arado para producir cosechas. Aseguró que, al dejar los residuos del cultivo anterior sobre la superficie en

lugar de enviarla al fondo del perfil invertido por el arado y por efectos del intemperismo, se produciría la materia orgánica necesaria para el próximo cultivo (Faulkner, 1974). Por más de un siglo, tanto científicos como productores han empleado el barbecho, sin ninguna reserva, en la producción agrícola a escala mundial (Phillips *et al.*, 1980; Figueroa, 1983).

La labranza de conservación es una de las opciones más viables para lograr la sostenibilidad de los recursos naturales suelo y agua, así como del rendimiento de los cultivos (Lal *et al.*, 1990), debido a que se protege al suelo de ser removido por el agua y el viento, reduciendo las pérdidas de nutrimentos, además de incrementar la materia orgánica, velocidad de infiltración, flora y fauna del suelo, y retener mayor cantidad de agua aprovechable para las plantas (Mannering y Fenster, 1983; Benites, 1992). Sin embargo, no debe aceptarse sin evidencias científicas locales como se hizo con el barbecho y rastreo (Braunack y Dexter, 1989; Navarro *et al.*, 2000).

En el centro-norte de México, de manera tradicional se ha recomendado el barbecho y uno o dos pasos de rastra como la única alternativa en la preparación del terreno sin considerar el tipo de suelo, cultivo y condición de humedad (riego o temporal). Las principales limitantes para la adopción de la labranza de conservación en esta región del país son: baja difusión de esta tecnología entre los productores, necesidad de maquinaria especializada, empleo de herbicida para el control de malezas y sobre todo la utilización de los esquilmos como forraje para el ganado (Osuna, 2000). El empleo de los residuos de cultivos es un factor clave para el éxito de la labranza de conservación, dado que entre mayor sea la cantidad dejada en la superficie, mayor será la protección que se tenga contra la erosión. El uso del rastrojo como alimento del ganado es un factor limitativo, principalmente en la zona centro-norte de México, por lo que deben generarse opciones que contemplen sistemas de producción en los cuales se diversifique e incremente la cantidad de forraje producido, de tal forma que el productor pueda dejar una parte de los mismos como cobertura del suelo (Erenstein, 1999; Martínez-Gamiño, 2000).

Para solucionar la problemática del uso del rastrojo como forraje, se evaluaron alternativas de preparación del suelo con un sistema de producción que favorece la diversificación en la producción de forraje, permitiendo a los productores dejar parte de la producción de rastrojo en la superficie de sus parcelas.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de siete métodos de manejo del suelo antes de la siembra sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, el rendimiento de grano y rastrojo de maíz y avena forrajera, además sobre la cantidad de forraje disponible para los animales y rentabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el período de 1996 a 2001, se estableció un experimento en condiciones de riego con una rotación maíz-avena forrajera en el Campo Experimental San Luis, con localización geográfica de 22° 14' 03" N y 100° 52' 11" O, el cual es representativo de las principales zonas de producción en el Altiplano Potosino, México (Hernández-Alatorre *et al.*, 1993). La clasificación del suelo corresponde a un Castañozem cálcico (FAO-UNESCO-ISRIC, 1988), de textura arcillosa y con pendiente menor que 2%, con un clima seco-templado (BSk), una temperatura media anual de 16.2 °C, un período libre de heladas de abril a septiembre y una precipitación media anual de 306 mm (INEGI, 1995). Los tratamientos de labranza que se evaluaron fueron: tradicional con un barbecho más rastra (B+R), inversión de los primeros 10 cm con un paso de rastra (R), no-inversión de los primeros 10 cm con el uso de un multirado (C), labranza cero más 0% de cobertura (LC+0%C), labranza cero más 33% de cobertura (LC+33%C), labranza cero más 66% de cobertura (LC+66%C) y labranza cero más 100% de cobertura (LC+100%C). Cada tratamiento se estableció en parcelas de 10.0 m de ancho por 30.0 m de longitud. Se utilizó un diseño de bloques al azar con dos repeticiones. En el ciclo primavera-verano, se sembró el híbrido de maíz H-311 con una densidad de 60 000 plantas ha⁻¹ y, durante el de otoño-invierno, la variedad de avena Cuauhtémoc con una densidad de 60 kg ha⁻¹. Se empleó una sembradora de labranza cero con disco ondulado al frente para trozar el rastrojo y roturar el suelo para depositar la semilla en un solo paso. Para la fertilización y para el control de plagas se siguieron las recomendaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) para la zona de estudio (Hernández-Alatorre *et al.*, 2001). Antes de la siembra de maíz y avena, la maleza en los tratamientos de labranza cero se controló con Glifosfato (2 L ha⁻¹) y después de la siembra con herbicida desecante (2 L ha⁻¹), que se aplicaron con aspersores protegidos por una campana para no dañar al cultivo. Se regó

cuando se registró un abatimiento de 40% de la humedad aprovechable. Para facilitar la conducción del agua, se construyeron camas de siembra con surcos a 1.70 m de ancho. El maíz se sembró en hileras separadas 0.85 m entre sí, con una distancia de 0.20 m entre plantas. Cada año después de cosechar el maíz, el rastrojo se cortó sobre la zona de siembra, se reconstruyeron los surcos y se sembró la avena siguiendo las hileras dejadas por el maíz pero a doble hilera. Durante el ciclo vegetativo de otoño-invierno 2000-2001 y durante el de primavera-verano 2001, se evaluó la humedad del suelo gravimétricamente en los cultivos de avena y maíz en los estratos de 0 a 15 y de 15 a 30 cm, respectivamente. En 2001 al final del ciclo de maíz, se cuantificaron la densidad aparente con el procedimiento de la parafina (0 a 5, 5 a 10, y 10 a 15 cm); la infiltración del agua con la técnica del doble cilindro; la materia orgánica con el método de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982), y el C y N mineralizable se estimaron de las cantidades de $\text{CO}_2\text{-C}$ y $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ que se generaron en muestras no fumigadas durante 10 días de incubación a $29\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ y previamente pre-incubadas a temperatura ambiente durante cinco días con un contenido de humedad aproximado a capacidad de campo (Campbell *et al.*, 1991). El rendimiento de grano y rastrojo de maíz y forraje de avena se evaluó mediante muestreos en parcelas de 9.6 m^2 en cada tratamiento y se presenta el promedio de seis años. Los resultados se analizaron de acuerdo con el diseño experimental empleado, utilizando el paquete Statistical Analysis System (SAS Institute, 1995). Con los costos proporcionados por productores, casas comerciales y el Distrito de Desarrollo Rural 126 de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) para el año 2003, se realizó un análisis de rentabilidad y se determinó la relación beneficio/costo (B/C).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad Aparente e Infiltración

Una de las bondades de mantener el suelo sin inversión del perfil es la conservación de la estructura del suelo. Al conservar la estructura del suelo, la densidad aparente y, más específicamente, la porosidad, permiten mantener mejores condiciones para el movimiento del aire y agua, y el desarrollo de las raíces. Al barbechar se destruye la porosidad, provocando un aumento en la densidad aparente y una

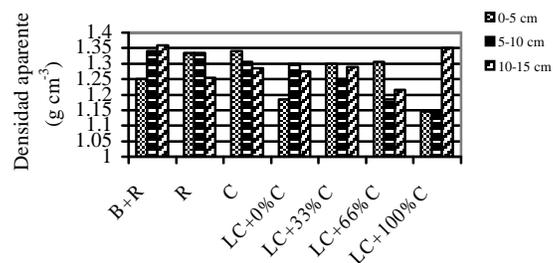


Figura 1. Densidad aparente con diferentes métodos de labranza al final del ciclo del maíz en 2001.

reducción en la velocidad de infiltración del agua en el suelo.

En la Figura 1, se presentan los resultados de densidad aparente del suelo (Da) al final del ciclo del maíz en 2001. Los tratamientos B+R, R y C registraron los valores más altos de Da en el perfil del suelo de 0 a 5 cm (1.25 , 1.34 y 1.34 g cm^{-3} , respectivamente) en comparación con los obtenidos en LC+0%C y LC+100%C (1.19 y 1.15 g cm^{-3}). En los estratos de 5 a 10 y de 10 a 15 cm, los valores de Da más altos correspondieron al B+R, 1.35 g cm^{-3} , contra 1.24 g cm^{-3} en LC+66%C. La reducción de la Da en los tratamientos con labranza de conservación sugieren una mayor proporción de espacios porosos al no destruir la estructura del suelo con el barbecho.

Asociada con una menor Da y mayor porosidad en el tratamiento de LC+0%C, la velocidad de infiltración, tanto inicial como final (9.35 y 0.83 cm h^{-1}), fue mayor que la obtenida en B+R (0.39 y 0.02 cm h^{-1}) (Figura 2). En la Figura 2, no se presentó la velocidad de infiltración en los tratamientos

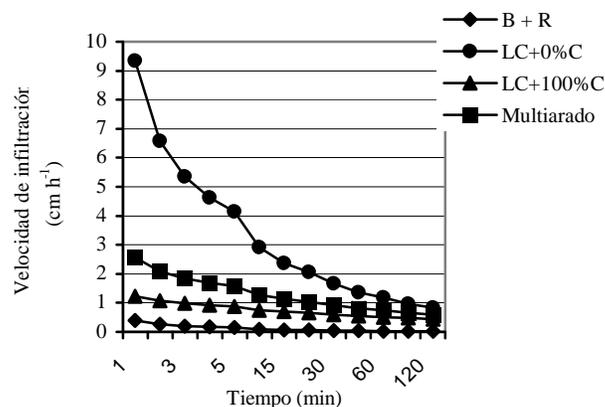


Figura 2. Velocidad de infiltración con diferentes métodos de labranza al final del ciclo del maíz en 2001.

tres días, mientras que, en LC+0%C, el agua se infiltró en menos de una hora después de finalizar el riego.

Humedad del Suelo

Durante el otoño-invierno 2000-2001, se observó, en el cultivo de avena, una tendencia a mantener mayor humedad en el suelo a 68, 92 y 124 días después de la siembra (DDS) con LC+100%C, superado en 25.7, 17.4 y 57.25%, respectivamente, a la registrada con B+R (Figura 3). Para el caso del maíz, la humedad del suelo a 35 y 42 DDS fue superior 13 y 47% en LC+100%C con relación a la registrada en B+R (Figura 4). En ambos cultivos, al dejar residuos de cosecha en la superficie, se provocó una mayor retención de humedad.

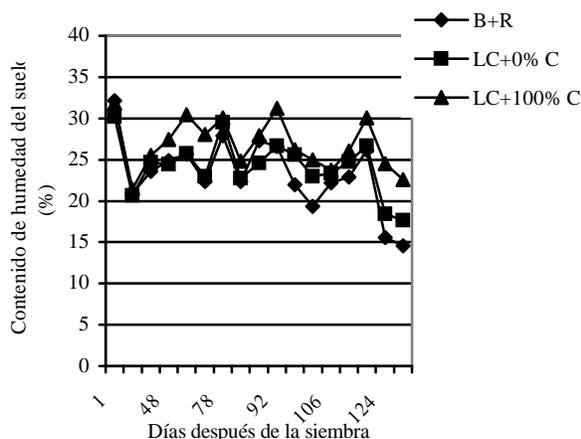


Figura 3. Humedad del suelo (0 a 15 cm) durante el cultivo de avena forrajera con diferentes métodos de labranza, año 2001.

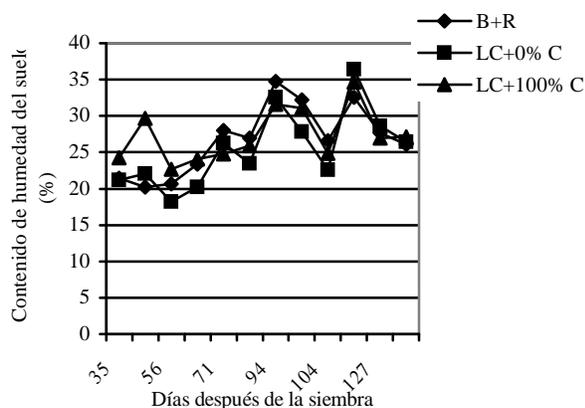


Figura 4. Humedad del suelo (0 a 15 cm) durante el cultivo de maíz con diferentes métodos de labranza, año 2001.

Con los métodos de labranza, la principal diferencia en la respuesta entre la avena y el maíz fue la mayor demanda evapotranspirativa en el ciclo primavera-verano, época en que se cultivó el maíz, a la del otoño-invierno, cuando se desarrolló la avena. Un posible efecto del rastrojo durante el ciclo de maíz fue la reducción de la evaporación del agua, incrementando la humedad del suelo disponible al cultivo y provocando un mejor rendimiento de maíz. De hecho, para el caso de la avena forrajera, no se tuvo una reducción en el número de riegos entre tratamientos, mientras que, en el caso del maíz, considerando lámina de riego iguales en todos los tratamientos, se obtuvo un ahorro de dos riegos en los tratamientos con LC en relación con aquellos en los cuales el suelo no se protegió con residuos de cosecha.

Materia Orgánica y Relación Carbono/Nitrógeno

El contenido de materia orgánica (MO) registró un incremento en los tratamientos de LC con cobertura, en el estrato de 0 a 5 cm, es decir, suponiendo que el contenido inicial de MO fue igual, su porcentaje de MO se incrementó de 2.5% en B+R, tratamiento en el cual no se dejó rastrojo en la superficie del suelo, a 3.1% en LC + 100% C. Dado que no se invirtió el perfil en LC, la cantidad de MO en los estratos de 5 a 10 y de 10 a 25 cm se mantuvieron en el mismo nivel que el resto de los tratamientos incluyendo B+R (Figura 5).

Un parámetro para determinar la cantidad de residuos en el suelo que está en equilibrio con la demanda de nitrógeno por los microorganismos es la relación carbón/nitrógeno (C/N). En la Figura 6,

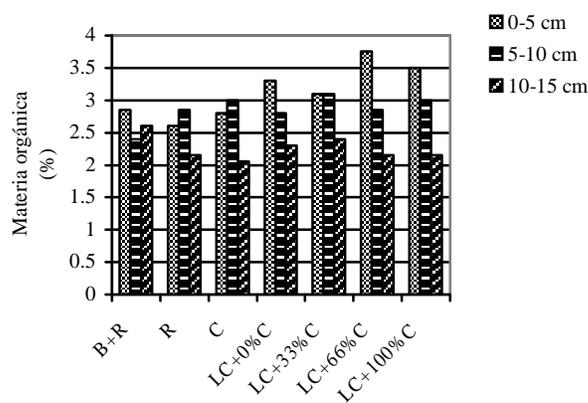


Figura 5. Materia orgánica del suelo con diferentes métodos de labranza al final del ciclo del maíz en 2001.

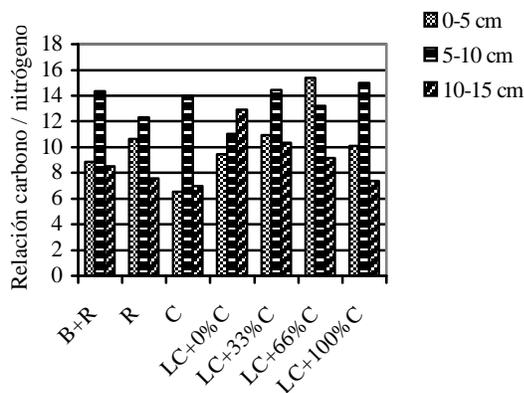


Figura 6. Relación carbono/nitrógeno en el suelo con diferentes métodos de labranza al final del ciclo del maíz en 2001.

se aprecia una tendencia a incrementar en 31 y 21% el valor de C/N en los tratamientos con cobertura en relación con el B+R para los estrato de 0 a 5 cm y de 5 a 15 cm, por lo que la competencia por nitrógeno entre el cultivo y los micro-organismos que mineralizan el rastrojo aumentó en los tratamientos con LC y residuos de cosecha. Dado que el rastrojo no se incorporó en el perfil del suelo, los valores C/N en los estratos de 5 a 10 y de 10 a 15 cm en los tratamientos con labranza de conservación fue 23% menor que la registrada en B+R, tratamiento que incorporó la MO que se acumuló en la superficie del suelo.

Rendimiento

El rendimiento promedio (1996-2001), obtenido en la rotación maíz-avena forrajera en el Altiplano Potosino, se presenta en el Cuadro 1. La producción de avena forrajera fue estadísticamente igual

($P \geq 0.05$) en los métodos de labranza evaluados, pero se presentó una tendencia a incrementar la productividad de este cultivo con LC+0%C en 16% con respecto al B+R. Esto resulta ser un indicador de que la destrucción de la estructura del suelo al invertir el perfil con el barbecho y luego pulverizar los terrones con la rastra para formar una cama de siembra mullida y suave no es una condicionante para la germinación, la emergencia, el establecimiento, el desarrollo y la producción de avena.

Con R, LC+33%C, LC+66%C y LC+100%C, se obtuvo una reducción en el rendimiento de avena de 39, 9, 17 y 34%, respectivamente, en comparación con B+R. Para el caso de la R, posiblemente se compactó el suelo después de los primeros 20 cm, impidiendo un adecuado desarrollo radical de la avena y, en los tratamientos con labranza de conservación, la reducción del rendimiento fue generada por la competencia con los residuos de rastrojo.

En la producción de maíz para grano, se obtuvieron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre tratamientos. El mejor rendimiento se registró en LC+66%C con 6.871 t ha⁻¹, lo que representó un aumento de 90% con relación al B+R.

La disponibilidad de rastrojo en este sistema de producción es de vital importancia para la implementación de la labranza de conservación con residuos de cosecha en la superficie del suelo, debido a la cultura de empleo de este esquileo, por parte de los productores, como alimento para el ganado.

Estadísticamente, no se tuvieron diferencias ($P \geq 0.05$) entre tratamientos en el rendimiento de rastrojo, sin embargo con LC+33%C y LC+66%C, la producción promedio se incrementó en 49% con relación a la registrada en B+R. Esta diferencia de 3.448 t ha⁻¹ equivale a la posibilidad de dejar

Cuadro 1. Rendimiento en la rotación maíz-avena forrajera de riego con diferentes métodos de labranza en el Altiplano de San Luis Potosí, México.

Tratamiento	Avena forrajera (MS) [†]	Maíz grano (14% H) [‡]	Maíz rastrojo (MS)	Forraje total (MS)
----- t ha ⁻¹ -----				
Barbecho + rastra (B+R)	5.922 a [§]	3.604 c	7.035 a	12.957 a
Inversión de los primeros 10 cm (R)	3.633 a	4.638 bc	7.592 a	11.225 a
No-inversión de los primeros 10 cm (C)	6.030 a	6.008 ab	10.376 a	16.406 a
Labranza cero + 0% de cobertura (LC+0%C)	6.874 a	6.743 a	9.677 a	16.551 a
Labranza cero + 33% de cobertura (LC+33%C)	5.403 a	6.414 ab	10.499 a	15.902 a
Labranza cero + 66% de cobertura (LC+66%C)	4.888 a	6.871 a	10.466 a	15.354 a
Labranza cero + 100% de cobertura (LC+100%C)	3.894 a	6.472 a	10.273 a	14.167 a

[†] MS = materia seca. [‡] H = humedad en el grano. [§] Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes, ($P \geq 0.05$).

un mantillo de 2.0 t ha⁻¹ para obtener una cobertura de 30% de la superficie del suelo, sin reducir la cantidad que se cosecha de rastrojo con B+R. Aún más, de acuerdo con los datos obtenidos, después de dejar las 2.0 t ha⁻¹ en los tratamientos con LC+33%C y LC+66%C, se dispondría de 8.483 t ha⁻¹ como forraje para el ganado, lo cual es 20% mayor que el cosechado con B+R.

El tratamiento C, en el cual se empleó el multiarado, fue el segundo mejor tratamiento en rendimiento de maíz para grano. Debido a que este método de labranza no invierte el perfil del suelo es recomendable su uso en terrenos que se compactan demasiado y con problemas de drenaje. En este tratamiento se trabajó sin rastrojo en la superficie del suelo, quedando la posibilidad de un incremento en el rendimiento de avena forrajera y maíz para grano al emplear por lo menos 2 t ha⁻¹ de residuos como cobertura del suelo.

Al considerar el rendimiento de rastrojo y de forraje de avena, fue evidente como la disponibilidad de forraje se incrementó hasta 20% con LC+33%C y LC+66%C en comparación con B+R, sin descartar que el mayor incremento con respecto a B+R se registró con C y LC+0%C con 27%. Sin embargo, la bondad de dejar residuos de cosecha en la superficie del suelo se justifica por el ahorro de agua de riego durante el ciclo del maíz, así como el incremento en la materia orgánica y conservación de la estructura del suelo.

Relación Beneficio/Costo

La relación beneficio/costo (B/C) para cada tratamiento se presenta en el Cuadro 2. Los menores costos totales de producción, \$ 7129, 7221 y 7601 se obtuvieron en los tratamientos LC+0%C, R y C,

respectivamente, con una reducción de 12, 11 y 6% en relación con los costos del B+R. La mejor relación B/C se obtuvo en LC+0%C con 3.74 seguido por C con 3.34 y LC+33%C con 3.14 contra 2.27 del B+R. Lo anterior implica que, para el caso de los tratamientos de LC con residuos de cosecha, los costos de producción se incrementaron a causa del valor dado a la cantidad de rastrojo empleado como cobertura del suelo.

Es comprensible que al considerar el valor del rastrojo no se reflejen los mayores beneficios brutos de la LC con cobertura, los cuales, en promedio, superaron en \$7229.00 a los obtenidos con B+R. Se debe buscar una estrategia motivadora para que los productores dejen residuos de cosecha en la superficie del suelo, factor detonante para mejorar las condiciones edáficas, así como el rendimiento de maíz y rastrojo, pero que económicamente no se reflejan, dado que no se considera un precio al suelo y a los nutrimentos perdidos por erosión.

CONCLUSIONES

- La cantidad de forraje, rastrojo más forraje de avena, se incrementó en 20% con labranza cero más 33% y 66% de cobertura en comparación con el barbecho más rastra.
- En la rotación maíz-avena forrajera en condiciones de riego en el Altiplano Potosino, los tratamientos de labranza cero con cobertura en relación con el barbecho más rastra redujeron en 6% la densidad aparente, aumentaron en 32% la velocidad de infiltración inicial del agua, incrementaron hasta en 57% la humedad en el suelo, e incrementaron en 24% la materia orgánica.
- El rendimiento de grano y de rastrojo en maíz en labranza cero con cobertura se incrementaron

Cuadro 2. Relación beneficio/costo (B/C) en la rotación maíz-avena forrajera de riego con diferentes métodos de labranza en el Altiplano de San Luis Potosí, México.

Tratamiento	Costos de producción		Costos totales	Beneficios brutos	B/C
	Avena	Maíz			
	----- \$ kg ⁻¹ -----			----- \$ ha ⁻¹ -----	
Barbecho + rastra	0.65	1.18	8097	18 363	2.27
Inversión de los primeros 10 cm	0.93	0.83	7221	18 182	2.52
No-inversión de los primeros 10 cm	0.58	0.68	7601	25 418	3.34
Labranza cero + 0 % de cobertura	0.48	0.57	7129	26 666	3.74
Labranza cero + 33% de cobertura	0.72	0.66	8120	25 523	3.14
Labranza cero + 66% de cobertura	0.93	0.71	9422	25 661	2.72
Labranza cero + 100% de cobertura	1.33	0.86	10 710	23 875	2.23

83 y 48%, respectivamente, en relación con el barbecho más rastra, mientras que el rendimiento de forraje de avena se redujo, en los mismos tratamientos, 20%.

- La mejor relación beneficio/costo se obtuvo con labranza cero más 0% de cobertura.

LITERATURA CITADA

- Benites, J.R. 1992. Clasificación de los sistemas de labranza. pp. 7-8. *In: Manual de sistemas de labranza para América Latina. Boletín de Suelos 66. Food and Agricultural Organization. Roma, Italia.*
- 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.
- Campbell, C.A., V.O. Brederbeck, R.P. Zentner y G.P. Lafond. 1991. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71: 363-376.
- Erenstein, O. 1999. La conservación de los residuos en los sistemas de producción de maíz en Ciudad Guzmán y San Gabriel, Jalisco. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México, D.F.
- FAO-UNESCO-ISRIC (Food and Agriculture Organization-International Soil Reference and Information Centre). 1988. FAO/UNESCO soil map of the world, revised legend. World Resources Report 60. Rome, Italy.
- Faulkner, E.H. 1974. Plowman's folly. Oklahoma University Press. Stillwater, OK.
- Figuroa-Sandoval, B. 1983. La investigación en labranza en México. *Terra* 1: 37-43.
- Hernández-Alatorre, J.A., C. Jasso-Chaverría, S. Beltrán-López, J.L. Barrón-Contreras, E. Aguirre-Álvarez, F. Rocha-Ortiz, E. Céspedes-Torres, A. Ramiro-Córdova, R. Martínez-Parra, A. Turrent-Fernández, M. Ortiz-Valdés, R. Aveldano-Salazar y D.R. González-Eguiarte. 1993. Provincias agronómicas y catálogo de tecnología para el cultivo de maíz en el Estado de San Luis Potosí. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. San Luis Potosí, México.
- Hernández-Alatorre, J., C. Jasso-Chaverría, y M.A. Martínez-Gamiño. 2001. Tecnología para la producción rentable de maíz bajo riego en el Altiplano de San Luis Potosí. Folleto para Productores 25. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional del Noreste. San Luis Potosí, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1995. Cuaderno Municipal de Soledad de Graciano Sánchez, Estado de San Luis Potosí. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Lal, R., D.J. Eckert, N.R. Fausey y W.M. Edwards. 1990. Conservation tillage in sustainable agriculture. pp. 203-225. *In: Sustainable agricultural systems. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, Iowa.*
- Mannering, J.V. y C.R. Fenster. 1983. What is conservation tillage. *J. Soil Water Conserv.* 38: 141-143.
- Martínez-Gamiño, M.A. 2000. Sistema de producción con un enfoque sostenible para el Altiplano Potosino, México. pp. 155-160. *In: Quintero-Lizaola, R., T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta y N.E. García-Calderón. La Edafología y sus Perspectivas al Siglo XXI. Tomo I. Colegio de Postgraduados-Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Autónoma Chapingo. México, D.F.*
- Navarro-Bravo, A., B. Figuroa-Sandoval, V.M. Ordaz-Chaparro y F.V. González-Cossio. 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *Terra* 18: 61-69.
- Nelson, D.W. y L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. pp. 539-579. *In: Page, A.L. (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. Part 2. Chemical and microbiological properties. Second edition. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.*
- Osuna, C.E.S. 2000. Desarrollo de sistemas de producción sostenible para uso y conservación de suelo y agua en las zonas áridas y semiáridas del Norte-Centro de México. SIGHO. Querétaro, México.
- Phillips, R.E., R.L. Blevins, G.W. Thomas, W.W. Frye y S.H. Phillips. 1980. No-tillage agriculture. *Science* 208: 1108-1113.
- SAS Institute Inc. 1995. SAS/ATAT User's guide: Statistics. Release 6.11. Cary, NC.

CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN LA AGRICULTURA MEXICANA: I. PRODUCCIÓN Y SOSTENIBILIDAD

Science and Technology in Mexican Agriculture: I. Food Production and Sustainability

Antonio Turrent-Fernández^{1‡} y José Isabel Cortés-Flores²

RESUMEN

En este ensayo se reseña y discute la aparición de los tipos de agricultura (a) científica, (b) industrial, (c) alternativa y (d) revolución verde. Los tres primeros tipos se desarrollaron en los países industrializados, mientras que la revolución verde tuvo lugar en los países en desarrollo. Se resalta la necesidad de formular marcos jurídicos sobre el uso de los recursos naturales en la agricultura, para acotar el daño al ecosistema: procesos de eutrofización, contaminación de acuíferos, erosión, salinización y emisión de gases termoactivos. Se discute que la investigación agrícola de México ha abordado casi exclusivamente al agroecosistema más productivo, desarrollando su versión de revolución verde. Se ha desatendido a la agricultura marginal y se ha ignorado a la etnoagricultura. Se destaca que el paradigma de la agricultura alternativa (a) mantiene el linaje de la agricultura científica, (b) es económicamente viable para la agricultura en pequeño en el mundo globalizado y (c) es la menos agresiva contra el ecosistema. Se concluye que la adopción y el desarrollo de este paradigma contribuiría a rescatar al sector mayoritario de agricultura en pequeño y a la seguridad alimenticia del país. El análisis del marco jurídico mexicano muestra que los problemas más severos ambientales del sector agropecuario: erosión hídrica, eutrofización de cuerpos de agua superficial, contaminación de acuíferos profundos y pérdida de germoplasma nativo de especies cultivadas se han ignorado.

Palabras clave: agricultura científica, agricultura industrial, agricultura alternativa, revolución verde, marco jurídico para el uso agrícola de los recursos naturales.

SUMMARY

Four types of farming (a) scientific, (b) industrial, (c) alternative, and (d) green revolution are reviewed and discussed in this paper. The three first types were developed by industrial countries while the green revolution appeared in developing countries. The need to formulate legal frameworks that regulate the use of natural resources in agriculture so as to limit eutrophication, deep aquifer contamination, soil erosion, soil salinization and thermoactive gases is stressed. It is also discussed that Mexican research has focused historically on the more productive agroecosystem, with little regard for marginal agroecosystems and ignoring ethnoagriculture. The alternative agriculture paradigm is presented as (a) pertaining to the lineage of scientific agriculture, (b) economically viable for small farming, and (c) the least aggressive against the natural ecosystem. It is suggested that adopting this paradigm will help to rescue the small farm sector and the country's food self-sufficiency. Analysis of the Mexican legal system shows that the most pressing environmental problems: soil erosion, eutrophication, deep aquifer contamination and loss of native plant germplasm have been ignored.

Index words: scientific agriculture, industrial agriculture, alternative agriculture, green revolution, legal frame for using natural resources in agriculture.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta serie de dos artículos es compartir con colegas académicos del ámbito agropecuario algunas reflexiones sobre dos tesis que parecen pertinentes al desarrollo del campo mexicano en los albores del siglo XXI. **Primera tesis:** *El marco jurídico para el aprovechamiento de los recursos*

¹ Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 56230 Chapingo, estado de México.

[‡] Autor responsable (aturrent@att.net.mx)

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

naturales en la agricultura de México requiere actualizarse a la luz del conocimiento científico y tecnológico, para acotar el efecto nocivo de algunas prácticas agrícolas al ecosistema. Segunda tesis: El campo mexicano cuenta con los recursos humanos y los recursos naturales que potencialmente le permiten producir de manera sostenible los alimentos y fibras que requiere una población por lo menos 50% mayor que la que México tiene en la actualidad.

Se abordará la primera tesis en este ensayo y la segunda tesis en otro ensayo en serie (Turrent y Cortés, 2005).

El marco jurídico mexicano que regula directamente el aprovechamiento del campo tiene como eje central al Artículo 27 Constitucional (que dicta la estructura y posesión de la tierra) con tres leyes reglamentarias: Ley Agraria, Ley Forestal y Ley de Aguas Nacionales. Complementan este ordenamiento las siguientes leyes: Ley Federal de Sanidad Vegetal, Ley Federal de Sanidad Animal, Ley de Desarrollo Rural Sustentable, Ley de Producción Certificación y Comercio de Semillas, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, y Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente. Este marco de leyes, sus reglamentos y normas oficiales mexicanas ha guiado el aprovechamiento del campo para los fines definidos por la historia del país mismo. Sin embargo, las experiencias agropecuaria y ecológica mundiales del último tercio del siglo XX aportan enseñanzas críticas sobre el agroecosistema global, como productor de alimentos y fibras, y la relación entre ese agroecosistema y el ecosistema natural, las cuales no están explícitamente abordadas en el marco jurídico de México (leyes, reglamentos y normas oficiales mexicanas) para el aprovechamiento del campo. Entre esas enseñanzas están: (1) la revolución verde como factor clave del incremento en la producción de alimentos y, a la vez, causa central de erosión de la diversidad genética de cultivos básicos en los países del tercer mundo, (2) la erosión de los suelos, (3) la eutrofización de los cuerpos de agua, (4) la contaminación de acuíferos subterráneos, y (5) la emisión de gases termoactivos, como externalidades de la actividad agrícola. Estas experiencias han de ser asimiladas al marco jurídico de todos los países para buscar la sostenibilidad de los recursos naturales, mientras se producen los alimentos y las fibras que reclama la humanidad.

Se seguirá el método de hacer un análisis histórico *ad hoc* del desarrollo mundial del conocimiento agrícola, como antecedente para alertar sobre las áreas

del marco jurídico mexicano que requieren enriquecimiento conceptual.

CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN LA AGRICULTURA

En el período desde la invención de la Agricultura, posiblemente 80 siglos AC, hasta el siglo XVIII, la humanidad acumuló gran cantidad de conocimiento empírico sobre el cultivo y el aprovechamiento de plantas y animales, lo que permitió el florecimiento de sus grandes civilizaciones. La fermentación, la nixtamalización, la irrigación, el arado, la rueda, los arneses para la tracción animal, los estiércoles, los abonos verdes y la cal ya se conocían y se usaban en el cultivo y aprovechamiento de un extenso inventario de especies de cereales, leguminosas, oleaginosas, raíces y tubérculos y otras especies productoras de alimentos y fibras útiles. Según Asimov (1989), hacia el Siglo XVIII, la ciencia, separada ya de la teología, había producido el método científico (Descartes en 1637), descubierto el mundo de los microorganismos (Van Leeuwenhoek, 1676), Brand había descubierto en 1669 al elemento fósforo, Rutherford en 1772 al nitrógeno, Priestley al oxígeno en 1774 y también la relación entre las plantas y el CO₂ e Ingenhousz en 1779 al fenómeno de la fotosíntesis; Linneo había ya publicado, en 1735, su obra sobre los Sistemas de la Naturaleza.

El Siglo XIX trajo la aplicación del pensamiento científico a la agricultura (Tisdale y Nelson, 1975; Asimov, 1989). Fueron químicos los científicos que más aportaron a su desarrollo inicial. Jean Baptist Boussingault estableció las bases del método de experimentación de campo; Justus von Liebig formuló su Ley del Mínimo en la respuesta de los cultivos; Lawes patentó el primer proceso de obtención del fertilizante superfosfato simple; Lawes y Gilbert iniciaron en 1843 los primeros experimentos clásicos en Rothamsted, Inglaterra (que continúan sin interrupción 160 años después); Thomas Way demostró, en 1852, la propiedad de intercambio de cationes del suelo. Microbiólogos del último cuarto del siglo demostraron la acción bacteriana en la oxidación del nitrógeno amoniacal del suelo, mientras que Hellriegel y Wilfarth concluyeron que tendría que haber organismos bacterianos en los nódulos radicales de las leguminosas y que esos organismos tenían la capacidad de asimilar el nitrógeno atmosférico y convertirlo a formas aprovechables por las plantas.

En 1865, el monje austriaco Gregorio Mendel publicó su trabajo sobre la herencia de algunos caracteres simples del chícharo; más tarde, en 1915, Morgan publicó su trabajo sobre la herencia de caracteres ligados en el mismo cromosoma. En 1939, el químico Müller encontró que la molécula orgánica DDT, conocida desde 1873, era tóxica para los insectos y aparentemente no dañaba a los organismos de sangre caliente. Fisher contribuyó de manera sustantiva durante el segundo tercio del Siglo XX al desarrollo de la estadística como apoyo al método de campo. Mitscherlich, en 1909, y Jenny, en 1941, formularon expresiones de la ley del rendimiento de los cultivos. El segundo autor enunció en su ley que el rendimiento de un cultivo es una función del suelo, del clima, de la planta, del manejo y de la biota. En 1953, Watson y Crick propusieron la estructura del ADN; Kary Mullis descubre, en la década de los 1980, la reacción en cadena de la polimerasa; en 1965, De Witt publica su trabajo de modelaje del desarrollo de la cubierta vegetal de un cultivo, mientras que en el último tercio del siglo sobreviene un desarrollo espectacular en la capacidad tecnológica de la computación, así como la notable reducción del costo para sus usuarios.

En la medida en que el conocimiento científico se aplicó a las regiones agrícolas del mundo, resultó evidente que una parte sustantiva de ese conocimiento era notablemente dependiente de las condiciones locales. Así, la dosis óptima de fertilizante para un cultivo y su rendimiento dependían de las manifestaciones de factores incontrolables para el productor, como el suelo, el clima y la biota, además de su manejo agronómico (variedad, fecha de siembra, densidad de población, protección, etc.). Resultó evidente que los factores del rendimiento de los cultivos eran inaditivos, es decir, que la suma de los efectos de dos de esos factores aplicados de manera individual era diferente al efecto de los dos factores aplicados simultáneamente. Esta interacción podía ser positiva o negativa. En suma, la experiencia demostró inequívocamente que una parte del conocimiento agrícola alcanzado no era universalmente extrapolable. Además, la agricultura científica demandaba el conocimiento de los recursos naturales suelo, clima y biota *per se* para ser sostenible. Como resultado y como regla, la aplicación práctica del conocimiento a una región agrícola requeriría esfuerzos de investigación *in situ*, en enseñanza y divulgación del conocimiento, que sólo con la intervención del Estado, en planes e inversiones a largo plazo, podrían abordarse con éxito.

Revolución Verde

Hacia finales del segundo tercio del Siglo XX, el mundo se dividía ya entre aquellos países que habían logrado realizar su tarea en el sector agrícola y los que no. Entre estos últimos los había en Asia y África, en los que la amenaza de hambruna era inminente debido al desequilibrio observable entre sus tasas: de desarrollo demográfico, de aumento en la producción de alimentos y de su escasez de divisas. Aunque en esos países, y en muchos otros, había extensas regiones con suelos y climas benignos para la producción de alimentos o que contaban con infraestructura de riego, poco se invertía en investigación agrícola, enseñanza y divulgación del conocimiento. El rendimiento agrícola era bajo aún en sus regiones potencialmente más productivas. No era la solución extrapolar el conocimiento científico y sus herramientas de los países desarrollados, porque aquéllos no funcionarían sin adaptación elaborada *in situ*.

Un reducido grupo de agrónomos encontró una vía genética para romper parcialmente la barrera de la no-extrapolabilidad en la aplicación del conocimiento agronómico en dos de los tres cereales de mayor consumo en el mundo: el arroz y el trigo. En el caso del trigo, el conocimiento fue desarrollado en México por Borlaug y sus colaboradores, en las décadas de los 1950 y 1960. La barrera podía superarse mediante los conocimientos de la genética clásica, reuniendo en una sola planta a los alelos adecuados: (a) de la herencia del carácter “paja corta” (para eliminar el problema del acame del cultivo en presencia de fertilizantes y riego), (b) de la resistencia genética a las enfermedades prevaletentes y (c) que confieren adaptabilidad amplia a condiciones agroclimáticas diferentes. Mientras el carácter “paja corta” era de solución permanente, el de la resistencia genética a las enfermedades requería un abordaje de conocimiento epidemiológico y de búsqueda continua e incorporación de alelos de resistencia ante una amenaza genéticamente cambiante. El objetivo se logró dentro de México, mediante una estrategia exhaustiva de cruzamientos, inoculaciones y alternancia entre un ambiente de selección casi al nivel del mar (ciclo otoño-invierno) y otro a una altitud de 2600 m en los Valles Altos de México (ciclo primavera-verano). Este tratamiento permitió a Borlaug y a sus colaboradores romper la barrera de la no-extrapolabilidad genética, en una franja mundial con desarrollo latitudinal similar al de México.

En esta franja se ubica una sección densamente poblada de Asia y África, en ese entonces amenazada por hambruna. Las nuevas variedades de trigo expresaron su potencialidad productiva indistintamente a lo largo de esta franja mundial. Otros factores del manejo agrícola de los cultivos como la fertilización, la densidad de población, la protección contra plagas, la labranza, etc. tuvieron un tratamiento científicamente menos elegante, en respuesta a la aguda escasez de recursos humanos profesionales e infraestructura en el área objetivo de la estrategia. Esos factores se abordaron con enfoque de gran visión que pasaba por alto mucho de lo aprendido en la agronomía clásica: la rotación de cultivos, la protección del epipedon del suelo y los procedimientos para las dosificaciones de fertilizantes y de pesticidas. Tal es el origen del segundo componente de la estrategia que se reconoció como “paquete tecnológico”. Por esta limitación es que los autores de la estrategia, después bautizada como “revolución verde”, acotaron su dominio a las tierras planas de mayor calidad agrícola, o bien, que dispusieran de infraestructura de riego.

El reconocido éxito de la revolución verde, en cuanto al incremento de los rendimientos, condujo a la adopción a ultranza de la estrategia ya que se aplicó en otros cultivos y también a tierras ecológicamente frágiles. Los cultivos alimenticios múltiples y compuestos, los centenares de ecotipos de especies y de variedades criollas, todos típicos de la agricultura tradicional, fueron sustituidos por los cultivos simples de pocas especies y de variedades mejoradas bajo el régimen de monocultivo. Esta simplificación abrió fronteras para la amplia adopción de los agroquímicos bajo normas mínimas de regulación. La erosión genética tuvo magnitud sustantiva (Santikarn-Kaosaard y Rerkasem, 2000); también se alentó la erosión hídrica en centenares de cuencas hidrológicas. La revolución verde también se consideró agente causal de profundización de las diferencias en ingreso entre los productores de corte empresarial y los productores en pequeño. La mayor escala de producción y el acceso expedito a los servicios de los primeros, incrementó su competitividad y poder de gestión respecto de los segundos.

Infelizmente, el éxito neto de la revolución verde en la producción de alimentos se interpretó erróneamente, fuera de la academia, como una demostración de que las inversiones en investigación agrícola local, en el conocimiento de los recursos naturales *per se* y en la formación de recursos

humanos, no serían estrictamente prioritarias para lograr la seguridad alimenticia. Es lugar común que esta posición es compartida en la actualidad por muchos gobiernos de los países del mundo en desarrollo, México entre ellos.

En la búsqueda para corregir los problemas causados por la revolución verde, progresaron en el mundo en desarrollo las estrategias conocidas como LEISA (low-external-input-sustainable-agriculture), la agricultura orgánica y una corrección del paradigma de la revolución verde (Turrent-Fernández y Moreno-Dahme, 1998).

Agricultura de los Países Industriales

Las tareas de realizar la investigación agrícola local y estratégica, de desarrollar el conocimiento de los recursos naturales *per se* y de formar recursos humanos profesionales, se cumplieron con creces y se aplicaron al desarrollo rural en los países industriales durante el Siglo XX. Su estrategia fue, consistentemente, la de aplicar el conocimiento científico a un modelo de incrementar la productividad de la mano de obra en el contexto de abundancias relativas de tierra y capital. Así surge lo que se llama agricultura moderna. Es necesario deslindar los conceptos de agricultura científica y de agricultura moderna, como opciones para los países que han invertido visionariamente en la investigación, en el desarrollo de sus recursos humanos y en la divulgación del conocimiento. Se consideran las siguientes definiciones operativas de ambos tipos de Agricultura. Agricultura Científica: *Usa todos los conocimientos científicos y tecnológicos pertinentes sobre los recursos naturales (suelo, agua, clima y biota) per se y sobre sus productividades agrícolas, para el objetivo conjunto de (a) la producción de alimentos y fibras, y (b) hacer mínimo el impacto sobre los recursos naturales.* Agricultura Moderna: *Usa todos los conocimientos científicos y tecnológicos pertinentes para la producción de alimentos y fibras, buscando hacer mínimo el costo financiero por unidad de producto, dentro del marco jurídico del uso de los recursos naturales en la agricultura.*

No habría diferencia notable entre ambas definiciones si el marco jurídico que norma el uso de los recursos naturales en la agricultura respondiera de inmediato al avance en el conocimiento científico sobre los recursos naturales y sobre su grado de perturbación.

Por un tiempo, y hasta finales de los 1970, la agricultura científica se practicó en los países desarrollados bajo el paradigma de la “granja familiar”. En este modelo se cuidaban los recursos naturales contra el deterioro que advertía el conocimiento científico-agronómico de esa época: la erosión, la pérdida de materia orgánica y de nutrientes minerales, la acidificación; en suma, la pérdida de la fertilidad y productividad del suelo. El conocimiento científico y tecnológico de esa época definía como ecológicamente seguro el uso de fertilizantes y de pesticidas en dosificaciones agronómicas. Se reconocía la inestabilidad de muchas de las moléculas pesticidas, como resultado de reacciones fotoquímicas, de la acción microbiana y de las interacciones con los diversos componentes del suelo. El Estado, a través de la Academia, se hacía cargo de la definición de los protocolos científicos y de la dosificación oficial de los agroquímicos. Los protocolos eran continuamente evaluados y mejorados en la Academia. Las dosificaciones indicadas de fertilizantes y pesticidas servían como guía a los extensionistas del sector público, a las compañías de agroquímicos y a los agricultores para formular los planes de producción y protección de los cultivos. Las empresas de agroquímicos y de semillas mejoradas participaban de manera sustantiva en la transferencia de la tecnología. Esta época tocó su fin en los 1980, con (a) el descubrimiento de las externalidades ecológicas causadas por el uso excesivo de agroquímicos y (b) la falla del sector público de los países desarrollados en ajustar el marco jurídico del uso de recursos naturales y de invertir en más ciencia, para diseñar nuevas estrategias que hicieran mínimo el deterioro ambiental.

Los estudios de principios de los 1980, en el estado de Iowa, EEUU, mostraban nitratos y pesticidas agrícolas en las aguas extraídas de sus acuíferos profundos. La academia norteamericana intensificó el estudio de este fenómeno, mientras que el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura creó laboratorios para dar seguimiento a los procesos de impacto ambiental. El Consejo Nacional de la Investigación (National Research Council) comisionó al agrónomo John Pesek, de la Universidad Estatal de Iowa, para encabezar un comité nacional que estudiara sistemas agrícolas ecológicamente menos dañinos que la agricultura moderna. El informe se publicó como

el libro “Agricultura de Alternativa”, en el que se analizaron once estudios de caso dentro de EEUU (NAS, 1989). Estos casos ilustraron la viabilidad económica de varios sistemas agrícolas diferentes al de la agricultura industrial tipo EEUU. Tales sistemas tenían en común: (a) la diversificación y no el monocultivo; (b) el control biológico para reducir el uso de pesticidas; y (c) el mejoramiento genético de los cultivos para resistir sus plagas, enfermedades y sequía y para usar eficientemente los fertilizantes. El mismo Pesek informó en su discurso “From a Trail to a Path to Sustainable Agriculture” (2001) sobre la ausencia de reglamentación pública específica, en los albores del Siglo XXI, y del grado de conflicto entre el marco jurídico norteamericano y el cambio hacia sistemas agrícolas ecológicamente menos agresivos. La agricultura que seguía el paradigma de la granja familiar de los 1960, no sería ya agricultura científica en los albores del Siglo XXI, a menos que experimentara los cambios pertinentes.

Lo que siguió en los EEUU y en otros países desarrollados fue el paradigma de la agricultura industrial, hartamente conocido en la actualidad, a costa de la granja familiar. Los avances monumentales en la mecanización de las operaciones agrícolas, las abundantes disponibilidades de energía fósil y de otros recursos naturales, el conocimiento agrícola y el reconocimiento del valor geo-estratégico mundial de los alimentos (principalmente de los cereales) impulsaron, no sin oposición doméstica, el desarrollo de grandes complejos agroindustriales en esos países desarrollados, que así construyeron lo que denominaron ventajas comparativas en la producción de alimentos. En esta nueva estrategia, los consorcios agroquímicos transnacionales han buscado, hasta ahora con éxito, asumir la responsabilidad de la dosificación de los agroquímicos y de los insumos genéticos, otrora responsabilidad del Estado. También han logrado nulificar cualquier avance en la definición del marco jurídico sobre el uso de recursos naturales en la agricultura, que reduzca su ímpetu expansivo. Esta estrategia es subsidiada por el gobierno de los EEUU de dos formas por lo menos: económicamente y mediante la inacción ante externalidades ecológicas derivadas de la actividad agrícola, como (a) el proceso inminente de eutrofización de las aguas del golfo de México frente a la desembocadura del río Mississippi (este río drena 41% del territorio norteamericano), o bien, (b) la externalidad genética derivada del uso

insuficientemente regulado de los organismos transgénicos (OGM) en la agricultura (Kimbrell, 2002).

La estrategia de la agricultura de alternativa es menos agresiva a la ecología que la agricultura industrial porque mientras ésta (a) requiere de la gran escala de operación, y (b) se basa en el uso de agroquímicos y OGM para controlar los esfuerzos bióticos y abióticos del monocultivo, aquella (a) funciona a menor escala (tipo granja familiar) y (b) se basa en las interacciones biológicas, científicas o empíricas, y en las diversidades genética y agronómica, y busca hacer mínimo el uso de agroquímicos (Kimbrell, 2002). La agricultura de alternativa de los EEUU es un linaje de la granja familiar, dentro de la tradición de la agricultura científica que ha resistido el embate de la agricultura industrial y ha prosperado en un ambiente económico y normativo hostil. Es motivo de celebración el reencuentro de la agronomía, a través de la agricultura de alternativa, con (a) el manejo integrado de plagas y enfermedades (conocimiento de la biología de las plagas y enfermedades: uso de entomopatógenos, predadores y parásitos de plagas, resistencia genética de cultivares, agroquímicos históricos como el caldo bordelés y hasta el uso de los agroquímicos modernos como último recurso); (b) los principios clásicos de la agricultura (rotación de cultivos, fijación biológica de nitrógeno, eficiencia relativa de la tierra, etc.) y (c) la integración agropecuaria. El paradigma de la agricultura de alternativa (NAS, 1989; Pesek, 2001) reencarna a la agricultura científica, aparentemente sepultada por la agricultura industrial. Es sobresaliente también que este paradigma se formuló como reacción de los productores agrícolas al avance de la agricultura industrial. Éste se originó, en gran medida, al margen de la investigación agrícola institucionalizada, pero con la participación de agrónomos postgraduados involucrados en la producción primaria.

La agricultura orgánica es afín a la agricultura de alternativa pero difiere de ésta en su proscripción de los agroquímicos sintéticos y en su énfasis especial en el uso y reciclamiento de materiales orgánicos. Los autores la consideran como un caso especial de la agricultura de alternativa que prospera principalmente en cultivos (a) de alto valor comercial (frutas, hortalizas, ornato y algunas especies industriales: café, cacao, etc.), (b) agroecosistemas muy productivos y (c) mercados especiales. La agricultura orgánica se ha retomado en los EEUU, a partir de los 1990, y es

un sector de rápido crecimiento, si bien su monto actual todavía es pequeño: 0.3% del área agrícola nacional y 0.2% del área total de pastoreo (Greene y Kremen, 2003). También ha de citarse la agricultura de espacios protegidos que ha sido desarrollada en Europa y en Israel.

Agricultura de México

Una clasificación arbitraria de la agricultura de México que es útil para nuestros fines consta de cuatro categorías: (1) la agricultura tipo revolución verde (bajo riego o temporal benigno; norte del país, el Bajío, valles altos, costas tropicales y subtropicales del golfo de México y del Pacífico); (2) la agricultura marginal (por la calidad de sus tierras y su clima, por la pequeñez de sus predios y acceso a los servicios; ubicada en la meseta semiárida del norte, los valles altos, el Bajío semiárido, y las mixtecas); (3) la etnoagricultura (sedentaria o de roza-tumba-quema, desarrollada en las sierras, costas del golfo de México y Caribe y del Pacífico); y (4) la agricultura orgánica (nichos de alta calidad agrícola ubicada en sierras, costas, valles altos).

La investigación agrícola que históricamente se ha realizado en México se ha enfocado casi exclusivamente hacia la productividad de los recursos naturales (suelo, agua, clima y germoplasma) de las regiones más productivas, que aquí se clasifica como del tipo revolución verde. Sin embargo, en esas regiones casi se ha ignorado la investigación para el conocimiento de esos recursos *per se*; también se ha descuidado el estudio de los efectos negativos de las prácticas agrícolas: es decir, de las externalidades ecológicas. Las excepciones son lo que se ha aprendido sobre el drenaje y salinización en los distritos de riego y sobre la erosión hídrica en las laderas de algunos distritos de desarrollo rural.

Los Tipos de agricultura 2 y 3 han recibido poca atención: no existe campo experimental alguno en el país que, enclavado en las sierras, atienda formalmente a la etnoagricultura. Otro tanto ha pasado en cuanto a la formación de recursos humanos e institucionales. Tampoco hay planes de Estado que busquen corregir esta situación a mediano o a largo plazos. Esto es el síndrome agrícola de los países subdesarrollados asediados por su crecimiento demográfico. Es obvio que deben corregirse las omisiones de investigación sobre la productividad de los recursos naturales y sobre los recursos *per se* en las cuatro categorías agrícolas.

Sería pertinente, mientras se avanzara en la dirección de corregir omisiones en la agricultura mexicana, aprovechar el conocimiento adquirido en los países industriales sobre las externalidades ecológicas, para actualizar el marco jurídico del campo mexicano. Este marco habrá de servir principalmente como guía para la acción futura del sector público en materia de fomento a la producción sostenible agrícola y la protección del ecosistema nacional contra el deterioro excesivo. La eutrofización, la contaminación de los acuíferos profundos con nitritos y con moléculas de agroquímicos por su uso no-regulado, la salinización de las tierras bajo riego, y el uso no-profiláctico de agroquímicos son la amenaza inminente de las regiones con agricultura de tipo revolución verde en México. Esto puede inferirse a partir del uso y abuso de agroquímicos por períodos de más de 30 años. La erosión de las tierras en ladera en las categorías de agricultura marginal y etnoagricultura y el daño directo a los trabajadores y a las familias rurales por el uso no-profiláctico de herbicidas, de insecticidas en granos almacenados en la vivienda y la quema de los residuos agrícolas como recurso tecnológico, son su amenaza inminente.

Parece sensato abrazar, como país, el paradigma de la agricultura de alternativa con su caso especial de la agricultura orgánica, según apliquen, para el rescate de los Tipos agrícolas 2 a 4. Esta acción requiere redoblar esfuerzos de investigación en ámbitos (a) de la agronomía clásica que están en la actualidad en vías de abandono por parte del Estado: el mejoramiento clásico de cultivos, la entomología y la fitopatología para el combate integrado de plagas y enfermedades, la agronomía en productividad de agrosistemas, y (b) el ámbito del estudio de los recursos naturales usados en la agricultura.

ACTUALIZACIÓN DEL MARCO JURÍDICO MEXICANO

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente (LGEEPA), promulgada en 1998, en su artículo segundo transitorio deroga la Ley de Conservación de Suelo y Agua, a su vez promulgada en 1946. La LGEEPA aborda en varios de sus artículos lo pertinente a la protección del suelo, del agua, del aire y de la biota (incluyendo las fracciones de esos recursos dedicadas a la actividad agropecuaria). Esta ley se reformó en 2003 para delimitar áreas de competencia de otras leyes y

definir, a su vez, competencias de varias secretarías de Estado, como la de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Los reglamentos publicados de la LGEEPA cubren las áreas de impacto ambiental y del ordenamiento ecológico. Se creó la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) como instrumento para garantizar la aplicación de la LGEEPA. Se han publicado también 29 normas oficiales mexicanas de las que sólo dos, NOM-021-SEMARNAT-2000 y NOM-023-SEMARNAT-2001, son pertinentes al recurso suelo y las demás abordan temas más de tipo forestal que agropecuario. La Ley de Aguas Nacionales aborda en gran detalle, a través de su reglamento de 1994, aspectos sobre el uso del agua para fines de riego y otros usos no agropecuarios. No se dispone de otros reglamentos o normas oficiales mexicanas vigentes para la operación agrícola actual. Lo hasta ahora publicado indica que los problemas ecológicos más sobresalientes del campo mexicano como la erosión de los suelos de uso agropecuario, la eutrofización de cuerpos de agua, la contaminación de acuíferos y la erosión del germoplasma de más de 100 cultivos de interés económico para el país y el mundo, carecen de protección efectiva.

Hay conocimiento de tipo puntual desarrollado en México, así como conocimiento que proviene de los países industriales, que permitiría actualizar el marco jurídico mexicano (reglamentos, normas oficiales, instituciones) a manera de una primera aproximación que podría ser perfeccionada después de realizarse el esfuerzo nacional de investigación pertinente. Las normas oficiales mexicanas podrían comenzar por establecer límites máximos permisibles a los usos de fertilizantes y pesticidas y a la erosión hídrica, en función de los riesgos ecológicos involucrados. El riesgo inmediato del germoplasma nativo de cultivos domesticados en Mesoamérica proviene de la importación y posible desregulación del germoplasma transgénico emparentado. Tal es el caso del riesgo que asumen el maíz y sus parientes silvestres: Teocintle y *Tripsacum*, de los que nuestro país es megadiverso.

CONCLUSIONES

- La investigación agrícola históricamente practicada en México se ha enfocado a la productividad de los recursos naturales aprovechados en la agricultura (suelo, agua, germoplasma) de las regiones más productivas y ha desatendido a la investigación para el

conocimiento de los recursos naturales *per se*. También ha desatendido a la investigación en las regiones de agricultura marginal y de etnoagricultura.

- Es necesario aprender y aplicar la experiencia de los países industriales sobre las externalidades ecológicas de su agricultura industrial y su granja familiar del último tercio del Siglo XX, así como de la revolución verde en los países en desarrollo, para formular un marco jurídico para el uso sostenible de los recursos naturales en la actividad agrícola de México.

- Es recomendable para México abrazar, desarrollar y aplicar el paradigma de la agricultura alterna como solución que reconcilia a la seguridad alimentaria, a la agricultura en pequeño y a la protección del agroecosistema.

- Los problemas más urgentes del deterioro de los recursos agua, suelo y biota de uso agropecuario: erosión hídrica, eutrofización de cuerpos de agua superficiales, contaminación de acuíferos profundos y pérdida de germoplasma de las especies nativas de uso agrícola han sido ignorados hasta la fecha por el marco jurídico mexicano.

LITERATURA CITADA

- Asimov, I. 1989. Asimov's chronology of science and discovery. Harper Collins Publishers. New York.
- Greene, C. y A. Kremen. 2003. U.S. organic farming in 2000-2001. <http://www.ers.usda.gov/publications/aib780fm.pdf>
- Kimbrell, A. 2002. The fatal harvest reader: The tragedy of industrial agriculture. Island Press. Washington, DC.
- NAS (National Academy of Sciences). 1989. Alternative agriculture. The National Academy Press. Washington, DC.
- Pesek, J. 2001. From a trail to a path to sustainable agriculture. Lecture presented before The John Pesek Colloquium on Sustainable Agriculture on March 1st 2001. Iowa State University. Ames, IA. http://www.wallacechair.iastate.edu/endeavors/pesekcolloquium/pesek_lecture.doc
- Santikarn-Kaosa-ard, M. y B. Rerkasem. 2000. The growth and sustainability of agriculture in Asia. Oxford University Press. New York.
- Tisdale, S.L. y W.L. Nelson. 1975. Soil fertility and fertilizers. 3rd edition. MacMillan. New York.
- Turrent-Fernández, A. y J.I. Cortés-Flores. 2005. Ciencia y Tecnología en la Agricultura Mexicana: II. Producción de alimentos. *Terra Latinoamericana* 23: 273-281.
- Turrent-Fernández, A. y R. Moreno-Dahme. 1998. Producción sostenible de alimentos de origen vegetal en el mundo. *Terra* 16: 93-111.

CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN LA AGRICULTURA MEXICANA: II. PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Science and Technology in Mexican Agriculture: II. Food Production

Antonio Turrent-Fernández^{1‡} y José Isabel Cortés-Flores²

RESUMEN

En este artículo se analiza la producción nacional combinada de 16 cultivos básicos de ciclo corto durante el período 1980-2001 según la serie estadística de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Se enfoca al campo como un sistema con dimensiones de capacidad [superficie de labor dedicada a cultivos de ciclo corto (SL), índice de cultivo (IC) e índice de no-siniestro (INS)] y de intensidad [índice de rendimiento (IR)]. Se analizan los efectos de los períodos recientes de cambio estructural (1982-1993) y post-TLC (tratado trilateral de libre comercio de Norteamérica) (1993-2001). Se resalta la baja intensidad en el uso del factor escaso tierra de labor en México (IC = 0.697), en contraste con los valores de 1.05 de Asia Oriental y de 1.1 de Asia Meridional. Durante el período 1982-1993, los factores SL e IR, por su incremento, funcionaron como motores de la producción, mientras que IC actuó como freno; en el período 1993-2001 ocurrió lo contrario, IC fue motor en respuesta al subsidio Procampo, mientras que SL e IR frenaron la producción; la variación de INS no fue significativa en ambos períodos. Se resalta la existencia de una reserva de tierra de labor del orden de 9 millones de hectáreas y que un objetivo de política pública para el plazo mediano, podría ser hacer coincidir los valores máximos históricos de los factores IR = 2.28 t ha⁻¹ e IC = 0.84 con el uso de la reserva de tierras de labor para alcanzar el valor SL = 33 millones de hectáreas (en cultivos de ciclo corto); la política a plazo largo podría ser de aumentar simultáneamente IR e IC más allá de los valores máximos observados en la historia reciente.

Palabras clave: cultivos básicos, SAGARPA, tierra de labor, índice de cultivo, índice de no-siniestro, índice de rendimiento.

SUMMARY

Statistical information from the Mexican Ministry of Agriculture, Animal Husbandry, Rural Development and Fishery (SAGARPA) on combined production of 16 basic annual crops during the period 1980-2001 is analyzed in this paper. Mexican agriculture is addressed as a system with two dimensions: (a) capacity [amount of farm land (SL), crop index (IC), and non-failure index (INS)], and (b) intensity [yield index (IR)]. Two sub-periods are examined (a) structural change of the farm sector (1982-2001) and (b) post-NAFTA (North American Free Trade Agreement) (1993-2001). The very low intensity in use of the scarce farmland in Mexico (IC = 0.697), contrasting with East Asia (IC = 1.05) and Northern Asia (IC = 1.1), is highlighted. The increment in factors SL and IR acted as a driving force for production while IC acted as a braking force during the period 1982-1993; the opposite occurred in the 1993-2001 post-NAFTA period. Total variation of the INS factor was irrelevant to variation of food production in both periods. A 9-million hectare reserve of arable land and a policy that would aim at bringing together IR = 2.28 t ha⁻¹ and IC = 0.84 (maximum observed historical values) are stressed. Long term goals of increasing IR and IC to new maxima are attainable.

Index words: Staple grains, SAGARPA, farmland, cultivation index, crop non-failure index, yield index.

INTRODUCCIÓN

Éste es el segundo ensayo de una serie de dos, en la que se discuten dos tesis pertinentes al campo mexicano: **Primera tesis:** *El marco jurídico para el aprovechamiento de los recursos naturales en la agricultura de México requiere actualizarse a la luz del conocimiento científico y tecnológico, para acotar*

¹ Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 56230 Chapingo, estado de México.

[‡] Autor responsable (aturrent@att.net.mx)

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

el efecto nocivo de algunas prácticas agrícolas al ecosistema. Segunda tesis: El campo mexicano cuenta con los recursos humanos y los recursos naturales que potencialmente le permiten producir de manera sostenible los alimentos y fibras que requiere una población por lo menos 50% mayor que la que México tiene en la actualidad.

La primera tesis se trata en el primer ensayo (Turrent y Cortés, 2005), mientras que en éste se analiza el resultado de las políticas de fomento a la producción durante el período de 1980 a 2001 y se hace un ejercicio de predicción del potencial productivo del campo mexicano.

Se advierte al lector que la línea de evidencia examinada es de naturaleza empírica y se apoya en el comportamiento del campo mexicano en los términos registrados en las estadísticas de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) durante el período 1980-2001. Las conclusiones aplican, por lo tanto, al campo como es; es decir, con sus diversidades tipológica, agroecológica, de fomento y bajo los marcos macroeconómicos impuestos.

Para entender la evolución de la producción agrícola reciente de México es útil examinar la evolución de las políticas de fomento del gobierno mexicano durante el mismo período.

Evolución Reciente de las Políticas para el Campo Mexicano

Hacia finales de la década de los 1970, el gobierno mexicano había creado instituciones de tipo paraestatal, además de las estatales, que funcionaban como instrumentos de las políticas de fomento para el campo. Así, la política de crecimiento de la superficie bajo riego era atendida por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH); la Secretaría de Agricultura y Ganadería atendía (a) la política de ampliación de la llamada frontera agrícola, a través de su programa de desmontes y de apoyo a la mecanización agrícola; (b) investigación a través de sus institutos desconcentrados [Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), el Instituto Nacional de Investigaciones Pecuarias (INIP) y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF)]; (c) la enseñanza superior, a través de la Escuela Superior de Agricultura Antonio Narro (ESAAAN); (d) la enseñanza de postgrado a través del Colegio de Postgraduados (CP); (e) la asistencia técnica a través de su Dirección General de Extensión

Agrícola (DGEA); y (f) la conservación de suelos y aguas, a través de su Dirección General de Conservación de Suelos y Aguas (DGCSA). Como entidades paraestatales existían (a) la Productora Nacional de Semillas (PRONASE), (b) Fertilizantes Mexicanos (FERTIMEX), (c) la Comisión Nacional de Subsistencias Populares (CONASUPO), (d) el Banco de Crédito Rural (BANRURAL) y la Aseguradora Agrícola (AGROASEMEX). El estado ejecutaba su política superior de autosuficiencia alimentaria a través de este cuadro de instrumentos de política. A cambio, el campo cumplía tres funciones para el resto de la economía: (1) generaba divisas mediante la exportación de café, algodón, hortalizas y ganado en pie para financiar la industrialización del país, (2) proporcionaba mano de obra para el desarrollo industrial y (3) transfería valor al resto de la economía a través de la política federal de precios. El endeudamiento externo creciente derivado del colapso del petróleo, a principio de los 1980, el crecimiento de la cartera vencida crediticia rural y el monto del subsidio al consumo popular, impidieron la continuación de la política de fomento al campo. En los años 1981 y 1982 se ejecutó una política claramente orientada a la autosuficiencia alimentaria, por última vez en el período reciente, mediante el Sistema Alimentario Mexicano (SAM). El año 1982 se caracterizó por una sequía generalizada en el país, que condujo a magros resultados en materia de producción nacional de alimentos. En este mismo año, se realizó el relevo presidencial y con éste se dio inicio a nuevas políticas para el campo, esta vez condicionadas por el servicio de la deuda externa.

Durante el período de 1982 a 1994, el gobierno mexicano realizó profundos cambios estructurales en sus políticas hacia el campo mexicano, que culminaron con la firma, en 1993, de un Tratado Trilateral de Libre Comercio (TLC) con los gobiernos de EEUU y Canadá. Se siguió la política de reducir, hasta eliminar, los subsidios a la producción agropecuaria, por su "efecto deformador del mercado". Para tal propósito, se redujo la operación de BANRURAL (Calva *et al.*, 1992) y AGROASEMEX; se eliminaron los precios de garantía de todos los cultivos, excepto el maíz y frijol, se eliminaron las direcciones generales DGCSA y DGEA y se inició el proceso de desaparición de PRONASE; y se fusionaron los tres institutos de investigación para fundar, en 1985, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El presupuesto del INIFAP

se redujo de \$4778 millones de pesos, en 1982 (suma de presupuestos de los antecesores INIA, INIP e INIF) a \$2096 millones de pesos en 1989 (pesos constantes de 1978); la superficie sembrada bajo riego decreció de 5.5 millones de hectáreas, en 1981, a 4.3 millones, en 1988. En suma, la inversión del estado mexicano en el sector rural sufrió contracción de 82.9% en el período 1981 a 1996 (Calva, 1997). En 1986, México se adhirió al Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT) y asumió compromisos que limitaron a 50% el máximo arancel a la importación. En 1992, se reformó el Artículo 27 Constitucional para permitir la renta y la venta de las tierras ejidales y se decretó el fin del reparto agrario. Al firmar con sus vecinos de Norteamérica el Tratado Trilateral de Libre Comercio, México asumió compromisos para auspiciar el desarrollo de un mercado libre regional. México alineó su estructura de subsidios para el campo a la de los EEUU, aceptando las definiciones del GATT. Después de eliminar los subsidios a la producción y comercialización, sólo se instituyó el subsidio conocido como Procampo, originalmente equivalente a \$100 dólares por hectárea de labor sembrada. Este subsidio se ha pagado a los productores en moneda nacional y ha perdido valor real, con excepción de repuntes eventuales. En 1994 ocurrieron el levantamiento Zapatista y la gran crisis financiera que fueron factores del desmesurado crecimiento de ambas deudas públicas, externa e interna. En este período, 1982-1994, se gestó una crisis alimentaria debida al decrecimiento de la producción del campo, como resultado de las políticas instrumentadas. Hacia 1994, los productores requerían producir el doble de lo que producían en 1981 para mantener su ingreso (Rubio, 1997). En 1996, las reservas de grano de maíz se redujeron a su mínimo histórico. Para enfrentar esta crisis, en 1996 y en adelante, los gobiernos han recurrido a la importación de alimentos de manera creciente.

PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS EN EL PERÍODO 1980-2001

Se seguirá como guía al concepto de que el campo es un sistema con dimensiones de capacidad y de intensidad. La capacidad es la superficie cosechada y la intensidad deriva de la tecnología usada. Se desagregará a ambas dimensiones en componentes arbitrarios, tres componentes de capacidad y uno de intensidad. La dimensión de capacidad se desagrega según la siguiente expresión:

$$\text{Capacidad} = \text{superficie de labor} \times \text{índice de cultivo} \times \text{índice de no-siniestro} \quad (\text{a})$$

En la Expresión a, el índice de cultivo es la superficie sembrada en el año agrícola, como fracción del total de la tierra de labor; índice de no-siniestro es la superficie cosechada como fracción de la superficie sembrada. La dimensión de intensidad se representa por un índice de rendimiento:

$$\text{Intensidad} = \text{índice de rendimiento} \quad (\text{b})$$

En la Expresión b, el índice del rendimiento se obtiene como una combinación lineal de los rendimientos observados en un número arbitrario de cultivos.

Se usan las estadísticas agropecuarias de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2002) para examinar la evolución reciente del desempeño del campo. La dimensión de capacidad del campo mexicano según sus componentes en el quinquenio 1995-1999 fue:

$$19\,354\,531 \text{ ha} = 31\,104\,451 \text{ ha} \times 0.696691 \times 0.893141 \quad (\text{c})$$

El campo dispone de 31.1 millones de hectáreas de labor que podrían sembrarse y cosecharse más de una vez con cultivos de ciclo corto, en los ciclos primavera-verano y otoño-invierno. Sin embargo, sólo se cosecharon 19.354 millones de hectáreas anualmente con todos los cultivos anuales y perennes. Esta subutilización de la tierra de labor se asoció con la siembra de sólo el equivalente a 69.7% de la tierra de labor una vez al año y la cosecha de sólo 89.3% de lo sembrado. El índice de cultivo de México se compara con el del África Subsahariana (0.55), el de América Latina y el Caribe (0.61), el del Cercano Oriente y Norte de África (0.83), el del Asia Oriental (1.05) y del Asia Meridional (1.10) (FAO, 1995).

El desempeño del campo mexicano evolucionó en el período de 1980 a 2001 como resultado de las condiciones al inicio del período y de varios factores de política de fomento de tipos macro y micro instrumentadas por los tres niveles de gobierno: federal, estatal y municipal. Se comenzará enlistando algunas de las características del campo mexicano hacia finales de la década de los 1970. El V Censo Agrícola, Ganadero y Ejidal de 1970 indica la existencia de 2.816 millones de predios agrícolas en el país, de los que sólo 201 mil tuvieron desempeño

técnico moderno (contaban con 33 ha de tierra de labor en promedio), 1.140 millones tuvieron desempeño intermedio (tradicional) contando con 14 ha de labor y 1.474 millones más tuvieron desempeño de subsistencia (contaban con 8 ha de labor en promedio). El grupo empresarial contaba con riego en 71% de su superficie de labor y sólo dedicaba 32% de su superficie al cultivo de maíz; el grupo de subsistencia contaba con riego para 11% de su parcela, dedicando 56% de ésta al cultivo del maíz; el grupo intermedio se aproximaba al de subsistencia.

En el Cuadro 1, se presenta el desempeño agregado reciente (1980 a 2001) del campo mexicano, en lo que respecta a 16 cultivos básicos: seis cereales (maíz, sorgo, trigo, arroz, cebada y avena), seis leguminosas comestibles (frijol, haba, lenteja, arvejo, garbanzo blanco y cacahuete) y cuatro oleaginosas (soya, cártamo, ajonjolí y girasol). La superficie sembrada de estos 16 cultivos representó 89% de la superficie total sembrada con cultivos de ciclo corto y 69.2% de la superficie total sembrada con todos los cultivos. Se examinó la producción total anual de ese conjunto de cultivos básicos (ambos ciclos, bajo riego y en temporal), la superficie de labor dedicada a todos los cultivos de ciclo corto, el índice de cultivo y el índice de no-siniestro (estos dos agregados para todos los cultivos de ciclo corto) y el índice de rendimiento de los 16 cultivos básicos. El índice de rendimiento se calculó ponderando el rendimiento de cada cultivo con su superficie sembrada, tanto en riego, como en temporal, en ambos ciclos de cultivo. Son de notar, en el Cuadro 1, el alto índice de cultivo logrado en 1981, año de mayor impacto del Sistema Alimentario Mexicano¹ (SAM) y el mínimo valor histórico alcanzado en 1993, año en que se concretaron los arreglos para un Tratado Trilateral de Libre Comercio (TLC) entre México, Estados Unidos y Canadá. También es de notarse el alto valor del índice de rendimiento logrado en el año 2001.

En la Figura 1 se aprecian las tendencias relativas de las variables del desempeño del campo y del crecimiento demográfico, todas expresadas respecto al año 1981, como promedios móviles de tres años. En esta figura se aprecian los siguientes puntos: (1) en 1985, el crecimiento relativo de la producción de 16 cultivos básicos (PO) se vuelve inferior al crecimiento demográfico relativo (POB), pero PO

retoma un crecimiento similar al demográfico hasta 1996, año en que sufre estancamiento; (2) en el período del cambio estructural del campo, una o ambas variables [superficie de labor dedicada a cultivos anuales (SL) e índice de rendimiento (IR)] crecen (son motor de la producción), mientras el índice de cultivo se derrumba (frena); en cambio, en el período post-TLC, ambas variables (SL e IR) decrecen (frenan) o sufren estancamiento, mientras la variable IC repunta moderadamente (motor de la producción); (3) la variable INS se mantiene constante o irrelevante para la producción.

Es útil dividir el período de 21 años alrededor del año 1993, por la entrada en vigor del Tratado Trilateral de Libre Comercio de Norteamérica (TLC). En el Cuadro 2, se presentan para cada período parcial: a) las tasas anuales de evolución de las variables producción anual combinada de los 16 cultivos básicos, b) la superficie de labor dedicada a los cultivos de ciclo corto y su índice de cultivo y c) el índice de rendimiento de los 16 cultivos básicos. Para calcular las tasas anuales de crecimiento o decrecimiento se usaron como bases los trienios 1980-1982, 1991-1993 y 1999-2001. La producción nacional combinada de 16 cultivos básicos creció alrededor de 1% anual en ambos períodos parciales. En el período 1980-1993, el drástico decrecimiento del índice de cultivo actuó como freno al crecimiento de la producción combinada de 16 cultivos básicos, mientras que la superficie de labor y el índice de rendimiento crecían significativamente. En cambio, en el período 1993-2001, el crecimiento del índice de cultivo fue el motor único del crecimiento de la producción combinada de 16 cultivos básicos, mientras la superficie de labor dedicada a los cultivos de ciclo corto y el índice de rendimiento permanecían prácticamente estancados. Como se aprecia en esta sección, la variable índice de cultivo funciona de manera complementaria a las variables superficie de labor e índice de rendimiento para explicar los cambios en la variable producción nacional. Es de notarse la sensibilidad de la variable índice de cultivo a las políticas agrícolas que regulan el desempeño del campo. En el período 1980-1993, prevalecieron políticas agrícolas restrictivas que buscaron reducir el subsidio al campo y que alcanzaron su punto culminante en el ciclo primavera-verano de 1993. En respuesta, el índice de cultivo se derrumbó a razón de 2.95% anual (Cuadros 1 y 2). A partir del ciclo otoño-invierno 1993/1994 aparece el subsidio Procampo, que sería formalmente creado por decreto

¹ El Sistema Alimentario Mexicano fue establecido por el Gobierno Mexicano en el sexenio del Presidente José López Portillo: 1976-1982. Lograr la autosuficiencia alimentaria era uno de sus objetivos centrales.

Cuadro 1. Superficie de labor dedicada a todos los cultivos de ciclo corto, índice de cultivo e índice de no-siniestro, producción agregada de 16 cultivos básicos e índice de rendimiento en el período 1980 a 2001.

Año	Superficie de labor [†]	Índice de cultivo [†]	Índice de no-siniestro [†]	Índice de rendimiento [‡]	Producción observada [‡]	Población nacional
	ha (millones)			t ha ⁻¹	t (millones)	millones
1980	20.3685	0.74547	0.89374	1.68653	23.0768	69.347
1981	20.2963	0.84120	0.88498	1.73434	27.2184	71.219
1982	21.0893	0.78805	0.72436	1.46119	22.4491	73.142
1983	21.8823	0.78664	0.87624	1.63503	25.3845	73.752
1984	22.4799	0.71543	0.88120	1.76765	25.8666	75.567
1985	23.3415	0.73532	0.90271	1.89348	29.8319	77.456
1986	23.5105	0.70777	0.82594	1.63279	24.9698	79.315
1987	23.9157	0.71100	0.84834	1.89992	26.1566	81.539
1988	24.6980	0.65503	0.85226	1.56028	22.6978	82.924
1989	25.7782	0.60105	0.86958	1.68780	23.4841	83.380
1990	26.5344	0.60119	0.93406	1.96141	28.2582	83.840
1991	27.1650	0.56402	0.91501	1.91606	26.1971	85.249
1992	26.5990	0.56437	0.88557	2.11513	28.4189	86.681
1993	26.5803	0.55237	0.90820	2.06319	27.2865	88.137
1994	26.5160	0.61885	0.89170	1.94590	28.9490	89.618
1995	26.6833	0.61912	0.89163	1.93401	28.7146	91.158
1996	26.5498	0.63220	0.93732	2.08280	31.3011	93.572
1997	26.1090	0.65551	0.82740	1.91486	29.5526	94.700
1998	26.1883	0.65165	0.92032	2.08150	30.9750	96.594
1999	25.9513	0.64843	0.84634	1.96872	29.2002	98.525
2000	25.8782	0.63970	0.83924	1.97552	28.8049	100.569
2001	25.8520	0.63267	0.92183	2.28045	32.8635	101.826

[†] La superficie de labor y los índices de cultivo y de no-siniestro se refieren a todos los cultivos de ciclo corto en el año agrícola y bajo ambos regímenes de humedad: riego y temporal. La superficie de labor dedicada a los cultivos de ciclo corto se calculó restando a la superficie total de labor aquella dedicada a los cultivos perennes.

[‡] El índice de rendimiento y la producción nacional se refieren a los 16 cultivos enlistados en el texto (seis cereales, seis leguminosas comestibles y cuatro oleaginosas).

Fuente: CONAPO (2000), SAGARPA (2002).

presidencial en 1994. Precisamente, desde entonces, el índice de cultivo se ha repuesto a razón de 1.5% anual (Figura 1, Cuadros 1 y 2). Conviene resaltar otro rasgo de la misma variable, que tendría que ver con su refinamiento para lograr mayor impacto en la producción nacional. Añadiría eficiencia reforzar y dirigir la política Procampo para estimular más el incremento del índice de cultivo en las mejores tierras de labor, tanto bajo riego como de buen temporal, que en las tierras de menor calidad. En el INIFAP y el Colegio de Postgraduados se ha investigado y publicado sobre las provincias agronómicas de la tierra de labor, tema pertinente a este refinamiento. Este grupo de investigación analizó el índice de cultivo de la tierra de labor de México en otro documento y sugirió acciones concretas para incrementarlo hasta la unidad en el contexto nacional, según el régimen hídrico y la calidad de la tierra de labor (Turrent-Fernández, 1993). Solamente se añadirá, en su refuerzo, que estudios recientes del INIFAP muestran que es factible producir maíz de

riego a razón de 8 t ha⁻¹ durante el ciclo otoño-invierno en 1 millón de hectáreas de tierras de labor del sur-sureste del país (Turrent *et al.*, 2004). Estas tierras permanecen ociosas en la actualidad en ese ciclo, por carecer de infraestructura de riego, aunque están cercanas a fuentes abundantes de agua dulce. En esa región, el país recibe anualmente 62% de su recurso total de agua dulce. El aprovechamiento futuro de este recurso incrementará de manera significativa los índices de cultivo y de rendimiento.

En resumen, se puede asentar que la variable índice de cultivo responde a políticas de fomento y puede incrementarse en el campo mexicano, como lo demuestran el valor logrado en 1981 bajo la política del Sistema Alimentario Mexicano y los valores de la unidad y mayores que se observan en el Asia (FAO, 1993).

El índice de rendimiento es una variable estructuralmente más compleja que el índice de cultivo, porque aquella añade variables como el clima, la disponibilidad de capital, de asistencia técnica y

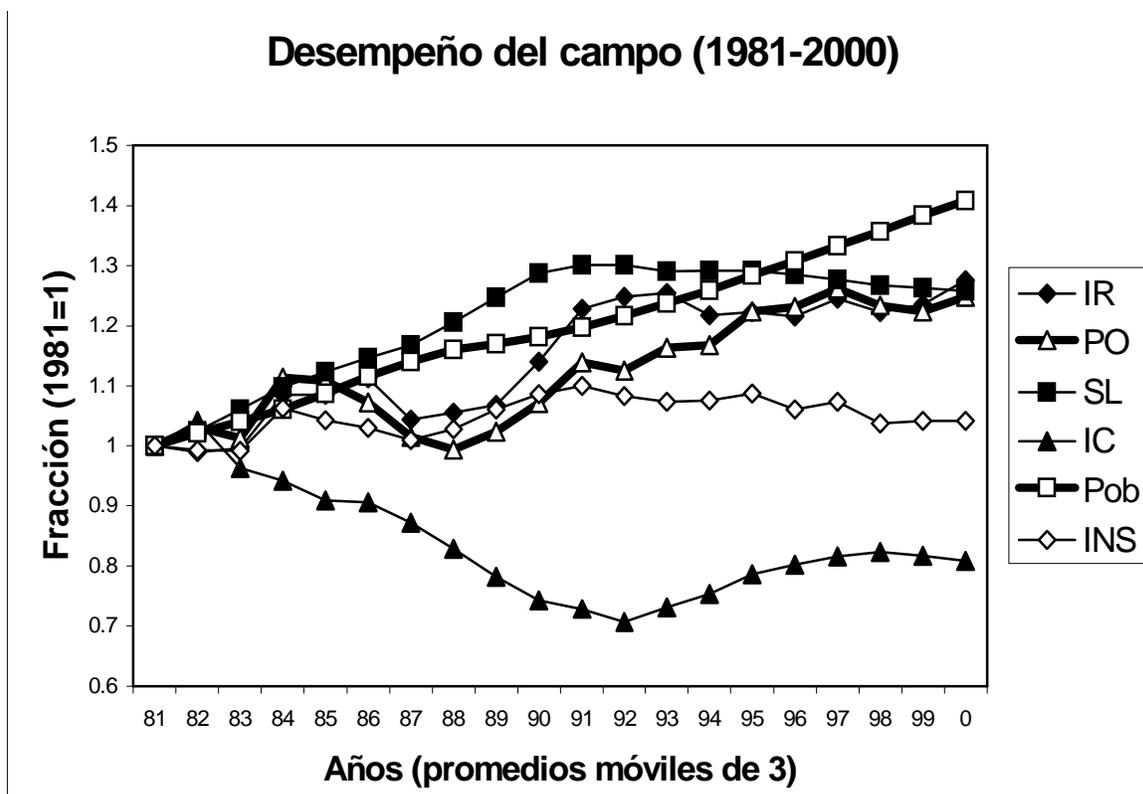


Figura 1. Tendencias relativas (1981 = 1) de la superficie de labor, índice de cultivo, índice de no-siniestro, índice de rendimiento, producción observada y población nacional en el período de 1981 a 2000 en México (promedios móviles de tres años).

IR, índice de rendimiento; PO, producción observada; SL, superficie de labor; IC, índice de cultivo; Pob, población nacional; INS, índice de no siniestro; todos expresados como fracción de sus valores absolutos del año 1981 (Cuadro 1).

Cuadro 2. Tasas anuales de cambio de las variables + producción combinada de 16 cultivos básicos, de la superficie destinada a los cultivos de ciclo corto, del índice de cultivo y del índice de rendimiento en los períodos 1980 a 1993 y 1993 a 2001.

Período	Producción	Superficie de labor	Índice de cultivo	Índice de rendimiento
			%	
1980 a 1993	1.00	2.25	(2.95)	1.87
1993 a 2001	1.10	(0.35)	1.50	0.24

† Cuando la cifra aparece dentro de paréntesis implica decrecimiento; la ausencia de paréntesis indica crecimiento. Las variables de referencia son producción combinada anual de 16 cultivos básicos en millones de ton; superficie de labor dedicada a todos los cultivos cíclicos en millones de ha; el índice de cultivo de todos los cultivos cíclicos y el índice de rendimiento de 16 cultivos básicos en $t\ ha^{-1}$ (ver Cuadro 1).

otras, a todo lo que afecte la decisión de sembrar. El índice de cultivo es una variable *ex ante*, en tanto que el índice de rendimiento es variable *ex post*, en relación con el ciclo de cultivo. Sin embargo, el índice de rendimiento potencial del campo mexicano responde al avance en investigación agrícola y a los

programas públicos de fomento, en su tendencia de plazo largo, como lo muestra el Cuadro 3 respecto al cultivo del maíz. Este cuadro muestra progreso, tanto en el rendimiento potencial nacional de maíz, como en el coeficiente de aprovechamiento tecnológico. En el período entre 1978 y 1995, el rendimiento potencial nacional de maíz creció a la tasa anual de 1.8%, el coeficiente de aprovechamiento tecnológico a 1.3% y el rendimiento promedio observado a 3.4%. En su plan de investigación sobre maíz, el INIFAP adopta los supuestos de que el rendimiento potencial nacional de maíz crecerá a la tasa de 0.8% en el período 1995-2010, mientras que la tasa de crecimiento del coeficiente de aprovechamiento tecnológico crecerá a una tasa anual ubicada entre 0.8% y 1.3%. La variable "rendimiento potencial nacional de maíz" mide el progreso tecnológico y el coeficiente de aprovechamiento tecnológico mide el progreso en la transferencia de tecnología. De la misma manera que lo hace con el maíz, el INIFAP desarrolla tecnología para los 16 cultivos básicos en consideración y para

Cuadro 3. Consumo aparente, producción y rendimiento de maíz en México y su proyección hacia el año 2010.

Concepto	Período de evaluación			
	1976 a 1977	1994 a 1995 [†]	2010(a)	2010(b)
Consumo aparente, millones de toneladas anuales	10.74	18.31	23.50	25.11
Producción observada, millones de toneladas anuales	10.14	18.29	23.63	25.31
Producción potencial [‡] , millones de toneladas anuales	20.17	29.45	33.75	33.75
Rendimiento observado, t ha ⁻¹	1.36	2.26	3.15	3.37
Rendimiento potencial [‡] , t ha ⁻¹	2.70	3.65	4.50	4.50
CAT [§]	0.50	0.62	0.70	0.75

[†] Durante 1994 y 1995 se cosechó maíz en 1.6 millones de hectáreas bajo riego y 6.47 millones de hectáreas bajo temporal. Se supone que hacia el año 2010, la superficie de maíz cosechada bajo riego será de 1.5 millones de hectáreas y 6 millones de hectáreas bajo temporal.

[‡] Se define a la producción potencial y al rendimiento potencial como aquéllos que se obtendrían en el país si toda la superficie sembrada con maíz fuera tratada con la tecnología disponible en el INIFAP. Fuente: INIFAP (1997).

[§] CAT significa coeficiente de aprovechamiento tecnológico y se define como la relación entre el rendimiento de maíz observado y el rendimiento potencial, ambos a nivel nacional.

otros más, en cumplimiento de las políticas de fomento establecidas por la SAGARPA. El proceso de transferencia de tecnología responde a un complejo de factores también regulados por las políticas de la SAGARPA. En resumen, la variable índice de rendimiento tiene una tendencia al crecimiento a largo plazo.

Se ajustó un modelo Cobb-Douglas (Heady y Dillon, 1961) a la serie de datos del Cuadro 1 según los procedimientos explicados en Turrent *et al.* (1999). La Ecuación 1 se ajustó por técnica de regresión a los datos del Cuadro 1:

$$PC1 = 1.31465(SL)^{0.88474}(IC)^{0.90191}(IR)^{0.91155} \quad (1)$$

PC1 significa producción anual de los 16 cultivos calculada, según la Ecuación 1; SL es la superficie de labor dedicada a todos los cultivos de ciclo corto, IC es el índice de cultivo para los mismos cultivos de ciclo corto e IR es el índice de rendimiento de los 16 cultivos previamente enlistados. La variable índice de no-siniestro de todos los cultivos de ciclo corto no resultó significativa. La Ecuación 1 explica 94.8% de la variación observada en la producción anual combinada de los 16 cultivos seleccionados; la F calculada es 109.12, significativa al 1/10000; los límites de los números condicionantes son 7.42 y 46.7, lo cual sugiere que la casi-multicolinealidad no es problema. Las variables de capacidad del campo (superficie de labor dedicada a los cultivos de ciclo corto e índice de cultivo) explican cada una 8% de la variación en la producción combinada de los 16 cultivos. La variable de intensidad, índice de rendimiento, explica 79% de la variación en la producción.

Para contar con una medida del riesgo de sesgo en los cálculos de las producciones calculadas, se usó un segundo método de cálculo de acuerdo con la Ecuación 2:

$$PC2 = 0.8984 (SL) (IC) (IR) \quad (2)$$

En la Ecuación 2, PC2 es la producción calculada de 16 cultivos básicos; SL es la superficie de labor dedicada a todos los cultivos de ciclo corto; SL x IC es la superficie sembrada con cultivos de ciclo corto; 0.8984 es el producto de los coeficientes 0.893, 0.8763 y 1.14804. El coeficiente 0.893 es la fracción promedio (1980-2001) de SL x IC que se sembró con los 16 cultivos básicos; 0.8763 es el índice de no-siniestro promedio en el período 1980-2001 y 1.14804 es el factor promedio del mismo período para expresar IR sobre la base de la superficie cosechada, IR es el índice de rendimiento sobre la base de la superficie sembrada. Este método de cálculo presupone de forma gratuita la constancia del coeficiente 0.8984 durante el horizonte del ejercicio.

A continuación se hará un ejercicio exploratorio sobre la carrera de los alimentos y de la población durante la primera mitad de este siglo, a partir de lo hasta aquí examinado. El Consejo Nacional de Población proyecta que la población nacional será de 112 millones de habitantes hacia el año 2010, de 127 millones en el 2030 y de 130 millones en el 2050 (CONAPO, 2000). En el Cuadro 4, se presenta el ejercicio de predicción de la producción de 16 cultivos básicos bajo varios escenarios, a partir de las Ecuaciones 1 y 2. En la última columna del Cuadro 4 se muestra la población equivalente del país que correspondería al nivel de producción, según

la Ecuación 1, bajo el supuesto de que la producción de 35 millones de toneladas anuales de los 16 cultivos básicos satisfaría la mayor parte de la demanda de los 93.7 millones de habitantes del país en el año 1996. El primer escenario corresponde precisamente a lo observado en dicho año agrícola. En los Escenarios 2 y 3 se exploran, por separado, los valores máximos relativos observados en los índices de rendimiento y de cultivo en la serie 1980-2001. El Escenario 4 explora el efecto conjunto de los índices de cultivo y de rendimiento, al asumir ambos sus valores máximos observados. Los Escenarios 3 y 4 resaltan que el crecimiento del índice de cultivo sin pérdida en el valor del índice de rendimiento logrado en el año 1996, corregiría el atraso en la carrera entre los crecimientos demográfico y de alimentos para el año 2010. Los Escenarios 5 a 9 son ejercicios de extrapolación que presuponen valores de las variables superficie de labor e índices de cultivo no observados en la serie 1980-2001, pero considerados como factibles para la primera mitad del siglo para los autores. En el mismo Cuadro 3 se aprecia que la Ecuación 2 conduce a producciones calculadas consistentemente mayores que las de la Ecuación 1. En el Escenario 5 y en adelante, se hace la suposición de que se añaden 6.45 millones de hectáreas de la reserva de tierras de labor (Turrent *et al.*, 1999) a los cultivos de ciclo corto. Este escenario muestra que ese incremento tendría poco impacto sobre la producción, si los índices de cultivo y de rendimiento permanecieran sin cambio respecto al año agrícola

1996. Los Escenarios 6 y 7 sugieren los órdenes de magnitud de avance en la producción de los 16 cultivos básicos, si el incremento en la superficie de labor fuera acompañado por los valores máximos en uno de ambos índices de cultivo y de rendimiento, observados en 1980-2001. El Escenario 7, que podría ocurrir hacia el año 2030, sugiere una razonable sincronía en la carrera entre la producción de alimentos y la población. Los Escenarios 8 y 9 sugieren que el campo mexicano tiene el potencial para alimentar a un México de 150 millones de habitantes (posiblemente en la segunda mitad del Siglo XXI). Este ejercicio resalta la importancia que tendrá el liberar la reserva de tierras de labor en la actualidad subutilizadas con el sistema de ganadería extensiva, simultáneamente al esfuerzo nacional por el progreso en el logro de un campo más eficiente.

CONCLUSIONES

- La disponibilidad bruta de tierras de labor *per cápita* de México fue de 0.306 ha en el año 2001 y será igual a 0.207 ha cuando la población sea de 150 millones de habitantes si no se incrementa la superficie actual, o bien, a 0.267 ha si la reserva de tierra de labor, en la actualidad bajo uso ganadero, se aprovecha con esquemas agropecuarios. La disponibilidad futura de tierra de labor *per cápita* es la típica de los países asiáticos de la actualidad. Mientras el aprovechamiento de este recurso escaso ha sido dispendioso en México, ya que su índice de cultivo

Cuadro 4. Proyecciones de producción combinada de 16 cultivos básicos en función de la superficie destinada a los cultivos de ciclo corto y los índices de cultivo y de rendimiento.

Escenario [†]	Superficie de labor [‡] Millones de ha	Índice de cultivo [§] Fracción	Índice de rendimiento t ha ⁻¹	Producción calculada		Población equivalente Millones
				Ecuación 1 - - - Millones de ton	Ecuación 2 - - -	
1	26.55	0.6322	2.0828	30.87	31.41	83
2	26.55	0.6322	2.2805	33.53	34.39	90
3	26.55	0.8412	2.0828	39.95	41.79	107
4	26.55	0.8412	2.2805	43.39	45.76	116
5	33	0.6322	2.0828	37.42	39.04	100
6	33	0.6322	2.2805	40.65	42.74	109
7	33	0.8412	2.0828	48.42	51.94	130
8	33	0.8412	2.2805	52.59	56.87	141
9	33	1.0000	2.2805	61.47	67.61	165

[†] El Escenario 1 corresponde al año 1996 en cuanto a la superficie de labor, índices de cultivo y de rendimiento y producción y población de 93.7 millones de habitantes; la producción combinada de los 16 cultivos básicos fue de 31.30 millones de toneladas. Se supuso que la población nacional de 93.7 millones de habitantes requeriría 35 millones de toneladas de esos 16 cultivos más una importación moderada del exterior, para satisfacer su consumo aparente. La población equivalente de la última columna se deriva de la relación 93.7 millones de habitantes, 35 millones de toneladas de los 16 cultivos básicos y el cálculo de PC1, a partir de la Ecuación 1.

[‡] Superficie de labor destinada a todos los cultivos de ciclo corto (aunque no necesariamente sembrada).

[§] Índice de cultivo para todos los cultivos de ciclo corto.

promedio es de sólo 0.697 en el quinquenio 1995-1999, los valores de los índices de cultivo fueron 0.83 en el Cercano Oriente y Norte de África, 1.05 en Asia Oriental y 1.10 en el Asia Meridional.

- Un análisis de las tendencias de los factores de la producción de 16 cultivos básicos (PO): superficie de labor dedicada a los cultivos de ciclo corto (SL), índice de rendimiento (IR) e índice de cultivo (IC) muestra (a) que durante el período de cambio estructural del campo (1982-1993) las variables SL e IR actuaron como motores de la producción mientras que el IC actuó como freno por su decrecimiento; (b) que durante el período post-TLC las variables SL e IR frenaron la producción mientras que IC funcionó como motor moderado de la producción; y (c) por su escasa variación en ambos períodos, el índice de no-siniestro fue irrelevante a la producción.

- Hay evidencias de que los tres factores de la producción de los 16 cultivos básicos (SL, IR e IC) pueden incrementarse significativamente en el futuro mediano y a largo plazo y que el campo mexicano tiene la capacidad potencial para alimentar a un país de 150 millones de habitantes.

LITERATURA CITADA

- Calva, J.L. 1997. El Campo Mexicano: Ajuste neoliberal y alternativas. Juan Pablos Editor. México, D.F.
- Calva, J.L., L.R. Carrasco, S. Díaz, E. Escamilla, L.R. García, M.A. Gómez, G. Gómez, A. Jiménez, A. Merino, M. Muñoz, P. Odermatt, F.J. Ramírez, D. Rodríguez, H. Santoyo, R. Schwentesius, y R. Sosa. 1992. La agricultura mexicana frente al Tratado Trilateral de Libre Comercio. Juan Pablos Editor. México, D.F.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). 2000. Proyecciones de la población de México, 2000-2050. <http://www.conapo.gob.mx/estados/proyecciones/Onacional.pdf>. (27 junio 2004)
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1995. World Agriculture: Towards 2010. <http://www.fao.org/docrep/v4200e/V4200E00.htm>
- Heady, E.O. y J.L. Dillon 1961. Agricultural production functions. Iowa State University Press. Ames, IA.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 1997. Plan de Investigación del sistema maíz-tortilla en los Estados Unidos Mexicanos. Documento de circulación interna. Programa de Investigación en Maíz. México, D.F.
- Rubio, B. 1997. La política agropecuaria neoliberal y la crisis alimentaria (1988-1996) pp. 17-36. In: Calva, J.L. (ed.). El campo mexicano: Ajuste neoliberal y alternativas. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. Universidad Autónoma Chapingo. Juan Pablos Editor. México, D.F.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2002. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. México, D.F.
- Turrent-Fernández, A. 1993. Aprovechamiento de la tierra de labor, tecnologías y posibilidades de autosuficiencia alimentaria. pp. 77-106. In: Calva, J.L. (Coordinador). Alternativas para el campo mexicano. Tomo II. Fontamara. México, D.F.
- Turrent-Fernández, A. y J.I. Cortés-Flores. 2005. Ciencia y Tecnología en la Agricultura Mexicana: I. Producción y sostenibilidad. *Terra Latinoamericana* 23: 265-272.
- Turrent-Fernández, A., R. Camacho-Castro, N. Francisco-Nicolás, S. Uribe-Gómez, J.I. Cortés-Flores y R. Mendoza-Robles. 1999. Posibilidades técnicas de lograr la soberanía alimentaria de origen vegetal en México. *Terra* 17: 59-76.
- Turrent-Fernández, A., R. Camas-Gómez, A. López-Luna, M. Cantú-Almaguer, J. Ramírez-Silva, J. Medina-Méndez y A. Palafox-Caballero. 2004. Producción de maíz bajo riego en el sur-sureste de México. II. Desempeño financiero y primera aproximación tecnológica. En prensa. *Ag. Tec. Mex.*

Revisores de este número
Reviewers of this number

Aguilar Sánchez, Genaro	Chapingo, estado de México
Almaguer Vargas, Gustavo	Chapingo, estado de México
Becerril Román, A. Enrique	Montecillo, estado de México
Betancourt Yañez, Pedro	Barquisimeto, Lara, Venezuela
Caballero Mellado, Jesús	Cuernavaca, Morelos, México
Cabrera Carbajal, Fernando	Navojoa, Sonora, México
Campos Cascaredo, Adolfo	Xalapa, Veracruz, México
Coras Merino, Pablo M.	Chapingo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
Cruz Montalvo, Abel	Puebla, Puebla, México
Espinosa Espinosa, Honorio	Chapingo, estado de México
Farías Larios, Javier	Tecomán, Colima, México
Gama Castro, Jorge	México, D.F.
Gerding Salas, Víctor Rodolfo	Valdivia, Chile
Gómez Díaz, J. David	Chapingo, estado de México
González Eguiarte, Diego	Zapopan, Jalisco, México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
Islas Gutiérrez, Fabián	Chapingo, estado de México
Jasso Ibarra, Rodolfo	Ciudad Lerdo, Durango, México
Martínez Garza, Ángel	Montecillo, estado de México
Martínez Ríos, Juan José	Ciudad Lerdo, Durango, México
Pineda Pineda, Joel	Chapingo, estado de México
Ramírez Ayala, Carlos	Montecillo, estado de México
Rodríguez Rodríguez, Orlando	Cabudare, Lara, Venezuela
Rueda Luna, Rolando	Puebla, Puebla, México
Sánchez Sánchez, Ernesto	Navojoa, Sonora, México
Soria Ruiz, Jesús	Zinacantepec, estado de México
Tamari, Serge	Jiutepec, Morelos, México
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México
Vázquez Aguilar, Valentín	Celaya, Guanajuato, México

Editores Técnicos de este número
Technical Editors of this number

Almaguer Vargas, Gustavo	Chapingo, estado de México
Alvarado López, Jorge	Montecillo, estado de México
Becerril Román, A. Enrique	Montecillo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
González Chávez, Ma. del Carmen	Montecillo, estado de México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
Pérez Nieto, Joel	Chapingo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México
Soria Ruiz, Jesús	Zinacantepec, estado de México
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México