

ISSN 0187-5779

TERRA

JULIO - SEPTIEMBRE DE 2002 • VOLUMEN 20 • NUMERO 3



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

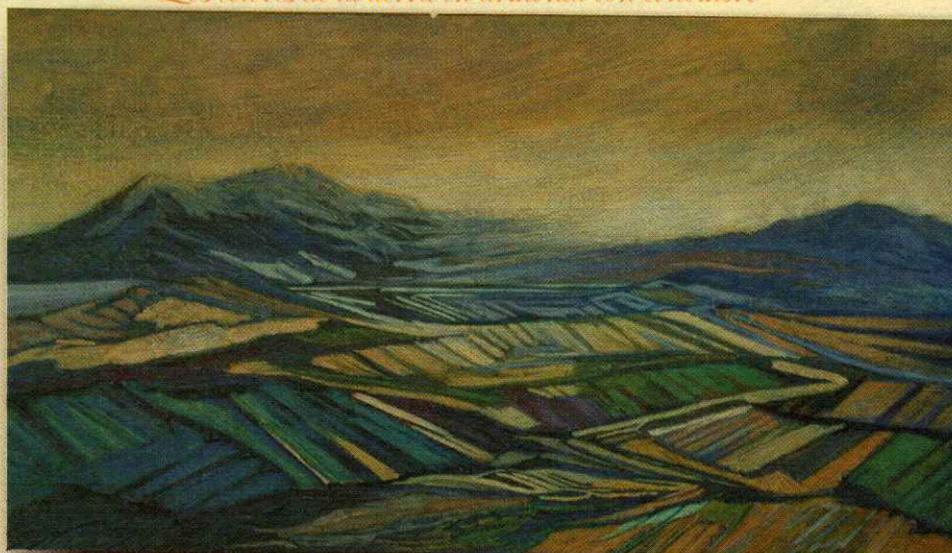
XXXI CONGRESO NACIONAL DE LA CIENCIA DEL SUELO



Comarca Lagunera

13 al 17 de octubre del 2002

"Los colores de la tierra en armonía con el hombre"



Juan Sabazar

Simposios:

- Nutrición de cultivos
- Contaminación de suelos
- Degradación del suelo
- Agricultura orgánica
- Innovaciones educativas en la enseñanza de la ciencia del suelo
- Fertirriego
- Intercalibración y Metrología
- Génesis de suelos
- Inoculantes en agricultura
- Aguas subterráneas

Cursos:

- Fertirriego
- Aplicaciones de la percepción remota a la ciencia del suelo
- Uso de abonos orgánicos y plásticos en la agricultura
- Interpretación de análisis de suelo, agua y planta
- Producción de cultivos en invernadero

Presentación de trabajos libres en carteles

Exposiciones

Actividades culturales

Sede:

Centro de Convenciones y Hotel Fiesta Inn
Torreón, Coahuila, México.

Informes:

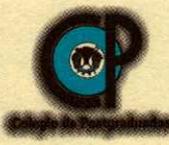
<http://www.chapingo.mx/terra>

<https://www.inifap.conacyt.mx>

SMCS: 01 (595) 95-46024; Fax: 01 (595) 95-48076

SMCS Delegación Lagunas: 01 (871) 719-10-76 y 77 Ext. 110 y 112; fax: Ext. 106

E-mail: smcs@taurus1.chapingo.mx, josecuel@raspa.inifap.conacyt.mx



TERRA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 2001-2002

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

DIVISIONES Y DISCIPLINAS

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

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

División II: Relación Suelo - Clima - Biota

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

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

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

División IV: Educación y Asistencia Técnica

- a) Educación
- b) Crédito y Asistencia Técnica

TERRA registro en trámite.

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Julio - Septiembre de 2002 Volumen 20 Número 3

ISSN 0187 - 5779

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

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

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

EDITOR
EDITOR ADJUNTO
EDITORES TECNICOS

Dr. Antonio Vázquez Alarcón
Dr. Javier Z. Castellanos
Dr. David Cristóbal Acevedo
Dr. Manuel Sandoval Villa
Dra. Ma. del Carmen González Chávez
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dra. Edna Alvarez Sánchez
Dr. Mateo Vargas Hernández
Dra. Carmen Gutiérrez Castorena
Dr. David Espinosa Victoria

EDITORES DE ESTILO

M.C. Jorge Alvarado López
M.C. Langen Corlay Chee
Ina Aalmers de Aguilar

EDITORA DE ESTILO
EN INGLES

Diane Fumiko Miyoshi Udo

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

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

Diseño de portada

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

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

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

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

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

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

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Assistance

TERRA Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
July - September, 2002 Volume 20 Num. 3

ISSN 0187 - 5779

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

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

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

EDITOR ASSOCIATE EDITOR TECHNICAL EDITORS

Dr. Antonio Vázquez Alarcón
Dr. Javier Z. Castellanos
Dr. David Cristóbal Acevedo
Dr. Manuel Sandoval Villa
Dra. Ma. del Carmen González Chávez
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dra. Edna Alvarez Sánchez
Dr. Mateo Vargas Hernández
Dra. Carmen Gutiérrez Castorena
Dr. David Espinosa Victoria
M.C. Jorge Alvarado López
M.C. Langen Corlay Chee
Ina Aalmers de Aguilar
Diane Fumiko Miyoshi Udo

STYLE EDITORS

ENGLISH EDITOR

EDITORIAL STAFF

Cover design

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

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

TERRA

JULIO - SEPTIEMBRE DE 2002 • VOLUMEN 20 • NUMERO 3
JULY - SEPTEMBER, 2002 • VOLUME 20 • NUMBER 3

DIVISION I

- 227 Efecto de la humedad en la resistencia mecánica de un suelo franco.
Effect of the moisture content on the mechanical resistance of a loam textured soil.

H. M. Durán García

- 235 Efecto de las propiedades físicas en la falla de un suelo de textura franca: Análisis de la longitud de onda y la distancia pico-pico.
Effect of the physical properties in the failure of a loam-textured soil: Analysis of wavelength and peak to peak distance.

H. M. Durán García

- 243 Contaminación ambiental en la región de Atlixco: I. Agua.
Pollution in the Atlixco region: I. Water.

*Sonia Emilia Silva Gómez, Abel Muñoz Orozco,
María de Lourdes de la Isla de Bauer y Said Infante Gil*

- 253 Evaluation of microbial respiration and ecotoxicity in contaminated soils representative of the petroleum-producing region of southeastern Mexico.

Evaluación de la respiración microbiana y ecotoxicidad en suelos contaminados representativos de la zona petrolera del sureste mexicano.

*Randy H. Adams Schroeder, Verónica I. Domínguez Rodríguez and
Laudiel Vinalay Carrillo*

DIVISION II

- 267 Nitrógeno y potasio en la producción de plántulas de melón.
Nitrogen and potassium in the production of muskmelon seedlings.

*Pablo Preciado Rangel, Gustavo A. Baca Castillo,
J. Luis Tirado Torres, Josué Kohashi-Shibata,
Leonardo Tijerina Chávez y Angel Martínez Garza*

277 Materia seca, rendimiento y corriente geofitoeléctrica en girasol.
Dry matter, yield and geophytoclectrical current in sunflower.
L. Aguilar García, J. Alberto Escalante E., M. T. Rodríguez González y L. Fucikovsky Zak

285 Respuesta de la vid a tres tensiones de humedad del suelo en postcosecha.
Response of grapevines to three soil moisture tensions after harvest.
Claudio Godoy Avila, Isaiás López Montoya e Isidro Reyes Juárez

291 Respuesta al déficit hídrico en *Pinus leiophylla*: Acumulación de biomasa, desarrollo de hojas secundarias y mortandad de plántulas.
Response of *Pinus leiophylla* to water deficit: Biomass accumulation, development of secondary needles and seedling mortality.
T. Martínez-Trinidad, J. J. Vargas-Hernández, J. López-Upton y A. Muñoz-Orozco

303 Dinámica poblacional de *Eisenia andrei* (Bouché 1972) en diferentes residuos orgánicos.
Population dynamic of *Eisenia andrei* (Bouché 1972) in different organic wastes.
S. Santamaría Romero y R. Ferrera-Cerrato

311 Efecto de dosis y fuente de nitrógeno en rendimiento y calidad postcosecha de tomate en fertirriego.
Nitrogen rate and source effect on yield and postharvest quality of tomato, grown in fertigation conditions.
Manuel Villarreal Romero, Raymundo S. García Estrada, Tomás Osuna Enciso y Adolfo D. Armenta Borjórquez

321 Producción de algodónero transgénico fertilizado con abonos orgánicos y control de plagas.
Yield of transgenic cotton fertilized with organic manure and pest control.
José Dimas López-Martínez, Miguel Gallegos Robles, J. Santos Serrato C., Ricardo D. Valdez Cepeda y Enrique Martínez-Rubín

DIVISION III

- 329** Aplicación de lavado y estiércol para recuperar suelos salinos en la Comarca Lagunera, México.
Leaching and manure treatments to reclaim salty soils in Comarca Lagunera, Mexico.
Raúl Serrato Sánchez, Alvaro Ortiz Arellano, José Dimas López y Salvador Berúmen Padilla
- 337** Evaluación de mejoradores del suelo en limón mexicano.
Evaluation of soil amendments for Mexican lime.
Octavio Pérez Zamora
- 347** Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF).
Integrated system for recommending fertilization rates in sugar cane (ISRFD).
David J. Palma-López, Sergio Salgado García, José J. Obrador Olán, Antonio Trujillo Narcía, Luz del C. Lagunes Espinoza, Joel Zavala Cruz, Alejandrina Ruiz Bello y Miguel A. Carrera Martel

EFFECTO DE LA HUMEDAD EN LA RESISTENCIA MECANICA DE UN SUELO FRANCO

Effect of the Moisture Content on the Mechanical Resistance of a Loam Textured Soil

H. M. Durán García¹

RESUMEN

El objeto fundamental de este trabajo de investigación fue analizar la deformación y rotura de un suelo de textura franca (Haploxeralf vértico). Se realizó la caracterización mecánica del suelo en función del estado o la condición del mismo. Para ello, se contó con la ayuda de un equipo de corte directo y a diferente contenido de humedad se determinó la cohesión, la adherencia, el ángulo de rozamiento interno suelo-suelo y suelo-metal, resistencia máxima al corte suelo-suelo y suelo-metal. Mediante el uso de la ecuación de Janosi y Hanamoto se determinó el esfuerzo de deformación y el módulo de deformación (k) suelo-suelo y suelo-metal, en función de su contenido de humedad. La conclusión a la que se llegó fue que la humedad tuvo un efecto directo sobre la cohesión, no así sobre la adherencia. El ángulo de rozamiento interno suelo-suelo y suelo-metal exhibe comportamientos opuestos: el primero decrece, mientras que el segundo crece gradualmente con la humedad hasta 12% y luego tiende a disminuir. Respecto al módulo de deformación del suelo, se observó que depende del esfuerzo normal aplicado al mismo y de su contenido de humedad.

Palabras clave: Falla del suelo, deformación del suelo.

SUMMARY

The principal objective of this study was to analyze the deformation and break up of a loam textured soil (Vertic haploxeralf). Mechanical characterization of the soil was done in function of the state or condition of the soil. Direct cutting equipment was used, and at different moisture contents, cohesion, adherence, angle of internal

friction soil-soil and soil-metal, and maximum resistance to soil cutting-soil and soil-metal were determined. Using Janosi and Hanamoto's equation, the deformation force and the deformation mode (k) soil-soil and soil-metal was determined, in function of moisture content. The conclusion was that moisture had a direct effect on cohesion, but not on adherence. The angle of internal friction soil-soil and soil-metal exhibited opposed behaviors, the first decreases, while the second increases gradually with moisture up to 12% and then diminishes. It was observed that the soil deformation mode depends on the normal force applied and on the soil's moisture content.

Index words: Soil failure, soil deformation.

INTRODUCCION

Un mismo suelo puede encontrarse en diferentes condiciones, por ejemplo, compactado y húmedo o seco y suelto, sin que por ello se vea alterado el material que lo constituye. Las propiedades del suelo determinan la naturaleza y su condición. La respuesta del suelo ante una acción exterior, como es el caso de la fuerza que aplica la herramienta de trabajo de un apero de labranza, está condicionada por sus propiedades físicas y, por lo tanto, por su naturaleza. Las propiedades del comportamiento no se ponen de manifiesto en tanto el suelo no se encuentra en movimiento. Entre ellas, Gill y Vanden Berg (1968) mencionaron la relación entre la fuerza aplicada al suelo y la deformación del mismo, la resistencia a la rotura por cizalladura o corte, la resistencia al deslizamiento suelo-metal, la resistencia a la penetración y procesos de compactación. La resistencia de un suelo a la deformación por compresión o por cizalladura está condicionada por su resistencia mecánica, que, a su vez, resulta de su resistencia cohesiva y friccional. Los valores de esta resistencia mecánica varían considerablemente, tanto de un suelo a otro, como en un mismo suelo, ya que dependen del contenido de humedad, del tamaño de las partículas minerales, del tamaño y de la forma de los agregados y

¹ Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Dr. Manuel Nava. Zona Universitaria, 78290 San Luis Potosí, S.L.P., México. (hduran@uaslp.mx)

del grado de consolidación alcanzado por el mismo (Ashburner y Sims, 1984).

Las teorías clásicas de la mecánica de suelos asumen que la rotura del suelo ocurre instantáneamente una vez que la fuerza aplicada al mismo alcanza un valor límite. Coulomb, citado por Cassan (1982), propuso una teoría de rotura por esfuerzo cortante que explica el colapso del suelo cuando se ve sometido a un determinado estado de esfuerzos. Gill y Vanden Berg (1968) describieron cómo el concepto de la línea envolvente de rotura, conocida como envolvente de Mohr-Coulomb, hace compatibles los criterios de rotura de Coulomb y de Mohr. Esto es:

$$\tau_{\max} = c + \sigma \tan \theta \quad (1)$$

Donde: τ_{\max} = esfuerzo cortante máximo; c = cohesión; σ = esfuerzo normal aplicado; θ = ángulo de fricción interna.

Los parámetros c y θ de la Ecuación 1 no son propiedades físicas reales del suelo (Johnson *et al.*, 1987). El método de Coulomb para determinar la rotura del suelo es un concepto ingenioso que ayudó a hacer simplificaciones teóricas cuando apenas se tenía un conocimiento claro del comportamiento mecánico del suelo. Sobre el particular, Cassan (1982) comentó que en realidad el criterio de rotura no se aplica más que a la fase sólida del suelo. Ahora bien, existen en el mismo otras dos fases: una gaseosa, que se puede despreciar, y otra líquida que es, por el contrario, de capital importancia. Cuando se aplica sobre el suelo un esfuerzo cualquiera, el esfuerzo normal, σ , que se ejerce sobre una cara dada, se reparte a la vez sobre el esqueleto sólido, que se ve así sometido a un esfuerzo σ' , llamada esfuerzo intergranular o esfuerzo efectivo, y sobre la fase líquida en la que se desarrolla una presión u , llamada presión intersticial. Esto es, $\sigma = \sigma' + u$.

Según Terzaghi, citado por Cassan (1982), esta relación es la más importante en mecánica de suelos, pues permite calcular el esfuerzo intergranular una vez conocida la presión intersticial. Esta presión es la responsable de la resistencia al cizallamiento que exhibe el suelo.

Cassan (1982) señaló que la ecuación de Coulomb se expresa como: $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$, donde c' y ϕ' son la cohesión y el ángulo de rozamiento interno verdadero o efectivo.

En un suelo saturado y de escasa permeabilidad, la presión intersticial es la que al aplicar carga extrema

equilibra ella sola al esfuerzo total y, por lo tanto, $u = \sigma$.

Cuando la presión intersticial está totalmente disipada, es decir, finalizado el proceso de consolidación, se tiene, sin embargo, que $u = 0$, por lo que $\phi = \phi'$. De este modo se observa que el ángulo de rozamiento interno aparente aumenta en función del tiempo para alcanzar en el límite, el valor del ángulo de rozamiento efectivo (Cassan, 1982).

La realización práctica del ensayo de corte directo permite determinar simultáneamente, para cada una de las cargas aplicadas en el ensayo, el esfuerzo cortante que soporta el suelo y la deformación producida por el mismo.

Con los datos así obtenidos, se pueden ajustar las curvas de esfuerzo deformación del suelo, las cuales obedecen a una ecuación exponencial (Janosi y Hanamoto, 1961):

$$\tau = \tau_{\max}(1 - e^{-j/k}) \quad (2)$$

Donde: τ = esfuerzo cortante aplicada al suelo (kPa); τ_{\max} = esfuerzo cortante máximo (kPa); j = deformación del suelo (mm); k = módulo de deformación del suelo (mm).

La constante k recibe el nombre de "módulo de deformación" y constituye un parámetro que está relacionado con la elasticidad que exhibe el suelo y con la rapidez con que éste es capaz de generar su resistencia máxima al corte, τ_{\max} , a medida que aumenta su deformación j .

El valor del módulo de deformación depende del esfuerzo normal que soporta el suelo, del área de la sección transversal de la caja del equipo de corte y de la velocidad de corte (Godbole *et al.*, 1993).

Wang y Gee-Clough (1993) realizaron ensayos de compresión triaxial y uniaxial, y ensayos de corte directo, con una arcilla húmeda y en condiciones cuasi-estáticas. Observaron que la expresión matemática que mejor se ajustó a los datos observados del esfuerzo cortante del suelo y de la deformación producida en el mismo fue una de tipo hiperbólico. Con la ecuación exponencial también obtuvieron buenos ajustes. No obstante, ninguna de estas dos expresiones refleja con precisión dicha relación, por ello consideraron que se hace necesario buscar nuevas ecuaciones que expliquen mejor el proceso. A pesar de todo, concluyeron su trabajo afirmando que ambos ajustes proporcionan con suficiente precisión la relación esfuerzo cortante-deformación.

El objetivo general del trabajo fue determinar el efecto de las condiciones del suelo sobre sus propiedades mecánicas. Para lo cual se planteó: 1) Determinar cómo varían el ángulo de rozamiento interno y la cohesión del suelo en función de su contenido de humedad. 2) Evaluar el efecto de la humedad del suelo sobre el valor del módulo de deformación del mismo. 3) Analizar el efecto de la humedad del suelo en el coeficiente de adherencia suelo-metal y en el ángulo de rozamiento suelo-metal.

MATERIALES Y METODOS

Se hizo uso del equipo de corte directo para realizar dos tipos de ensayos. Con el primero de ellos se determinaron la cohesión, el ángulo de rozamiento interno y el módulo de deformación del suelo a diferente contenido de humedad del mismo. Con el segundo se analizó el efecto de la humedad del suelo sobre el coeficiente de adherencia suelo-metal y sobre el ángulo de rozamiento suelo-metal. Ambos ensayos se realizaron con un equipo de la empresa Farnell, modelo 306/6/427, que dispone de dos armaduras, una fija y otra móvil, en cuyo interior se coloca la muestra de suelo entre dos placas de material poroso. El equipo permite variar la velocidad con la que se desplaza la armadura móvil para, así, poder elegir diferentes velocidades de deformación del suelo. El Cuadro 1 muestra las características físicas y químicas del suelo utilizado en el trabajo.

Metodología para el Corte Suelo-Suelo

Una vez en el laboratorio, el suelo se secó al aire y se tamizó para utilizar la fracción sólida con un tamaño inferior a 2 mm. Posteriormente, se preparó la cantidad de tierra requerida en cada uno de los ensayos (350 g) y se añadió el agua necesaria para que el contenido de humedad gravimétrica fuera de 2, 8, 12, 15, 20 y 25%. El contenido de humedad se determinó en muestras de suelo húmedo, secándolas en la estufa a una temperatura de 105 a 110 °C durante 24 h.

La caja de corte que constituyen las dos armaduras del equipo se llenó con tierra preparada a la humedad requerida y se sometió a un determinado esfuerzo normal, colocando pesos directamente en el yugo de carga o a través de un brazo de palanca. Los esfuerzos normales que soportó el suelo fueron 100, 128 y

Cuadro 1. Características físicas y químicas del suelo franco, utilizado en la realización del trabajo.

Parámetro	Valor
Esqueleto grueso (> 2 mm) (% g/g) [†] :	1
Arena (% g/g):	39
Limo (% g/g):	40
Arcilla (% g/g):	21
Clase textural:	Franca
Densidad real (Mg m ⁻³):	2.64
pH (en agua 1:2.5):	6.1
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹):	0.09
Calcio activo (% g/g):	0
Sodio (mg g ⁻¹):	1.5
Materia orgánica (% g/g):	1.5
Carbono (% g/g):	0.87
Límite líquido (%H, g/g) [†] :	27
Límite plástico (%H, g/g):	19
Índice de plasticidad (% g/g):	8
Clasificación USDA:	Haploxeralf vértico

[†] (% g/g) = porcentaje gravimétrico; [†] (%H, g/g) = porcentaje de humedad gravimétrica.

156 kPa. La sección transversal de la caja del equipo de corte tenía un valor de 6 x 6 cm; los ensayos se realizaron a una velocidad de deformación de 0.5 mm min⁻¹.

Se hicieron un total de tres repeticiones con cada uno de los contenidos de humedad considerados y cargas normales aplicadas. Todos los ensayos se realizaron después de que el suelo consolidara durante 2 h. Transcurrido este tiempo, se registró en el comparador la consolidación que tuvo lugar en el mismo. A continuación se procedió con el corte del suelo al tiempo que se permitía el drenaje de la muestra, por lo tanto, las presiones intersticiales fueron nulas al aplicar los esfuerzos cortantes.

Los valores observados en cada uno de los ensayos de la deformación del suelo y del esfuerzo cortante aplicado al mismo se representaron en un sistema de coordenadas en el que en el eje de abscisas se llevaron los valores de la deformación y en el de las ordenadas el del esfuerzo cortante. La curva obtenida tiene por ecuación la de Janosi y Hanamoto (Ecuación 2).

Al representar los valores máximos del esfuerzo cortante máximo (τ_{max}), en función del esfuerzo normal (σ), que soporta el suelo, resultó que los puntos obtenidos se encuentran sobre una línea recta cuya expresión matemática es la ecuación de Coulomb.

$$\tau_{max} = c + \sigma \tan \phi \quad (3)$$

La ordenada en el origen, c , es el valor de la cohesión del suelo (kPa) y la pendiente es la tangente del ángulo de rozamiento interno del suelo, ϕ .

Determinación de la Adherencia y del Rozamiento Suelo-Metal

El valor del esfuerzo cortante que provoca el deslizamiento del suelo sobre un objeto, por ejemplo, la reja de un apero, se expresa en forma análoga a la ecuación de Coulomb:

$$\tau = c_a + \sigma \tan \delta \quad (4)$$

Donde: c_a es la adherencia suelo-material de la reja (kPa), σ es el esfuerzo normal entre las superficies que deslizan (kPa), y δ es el ángulo de rozamiento entre el suelo y el material de la reja.

Por ello, la determinación de la adherencia suelo-reja y la del ángulo de rozamiento suelo-reja se efectuaron siguiendo un procedimiento similar al empleado en los ensayos de corte directo del suelo, salvo que sólo se llenó con tierra la mitad inferior de la caja de corte y en la mitad superior se colocó una pieza de $6 \times 6 \times 0.3$ cm del mismo material de las rejas que se utilizan en el laboreo del suelo. Representando los valores medidos del esfuerzo cortante máximo aplicado al suelo en función del esfuerzo normal que soporta la superficie que desliza, los puntos obtenidos se ajustan a una línea recta (Ecuación 4) que permite obtener la adherencia y el ángulo de rozamiento suelo-metal. Asimismo, para cada esfuerzo normal y contenido de humedad del suelo se representó el esfuerzo cortante aplicada en función del desplazamiento relativo de la armadura que contenía el bloque del material acero de las rejas. Los pares de valores se ajustan a una ecuación análoga a la de Janosi y Hanamoto (Ecuación 2).

RESULTADOS Y DISCUSION

Como se mencionó en el apartado de Materiales y Métodos, los ensayos de rotura del suelo por esfuerzo cortante y los de adherencia suelo-metal se realizaron bajo tres condiciones de esfuerzo normal, 100, 128 y 156 kPa; seis contenidos de humedad (2, 8, 12, 15, 20 y 25% w/w); y una velocidad de 0.5 mm min^{-1} . Las curvas que aparecen en las Figuras 1 y 2

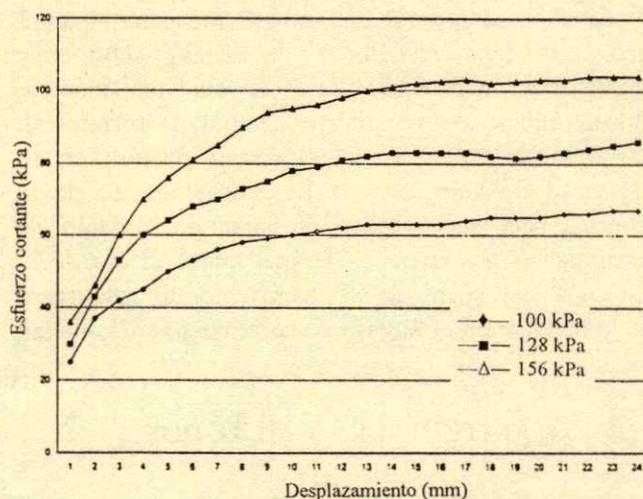


Figura 1. Ensayo de corte directo suelo-suelo con humedad de 15%.

corresponden, respectivamente, a los valores medidos del esfuerzo cortante suelo-suelo y suelo-metal en función del desplazamiento cuando el contenido de humedad del suelo es de 15%. Estos gráficos muestran que la magnitud del esfuerzo cortante (kPa) se incrementa con la deformación del suelo hasta que tiene lugar la rotura del mismo. Asimismo, puede observarse que la magnitud del esfuerzo de rotura del suelo y la del esfuerzo de adherencia suelo-metal son función directa del esfuerzo normal aplicado y del contenido de humedad del suelo.

El equipo de corte directo permite conocer cómo varía el valor de la cohesión y el de la adherencia en

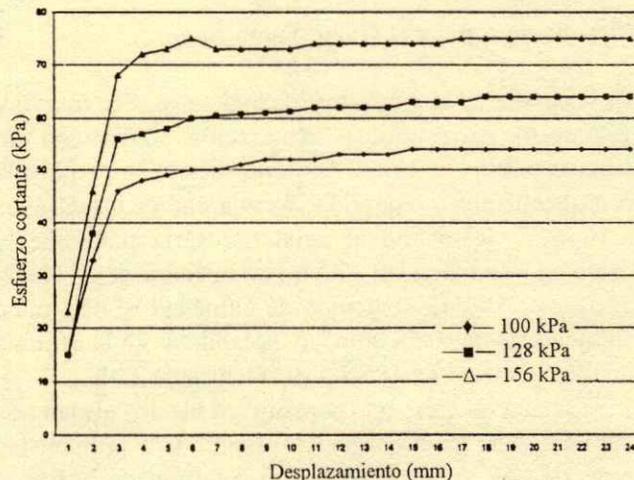


Figura 2. Ensayo de corte directo suelo-metal con humedad de 15%.

Cuadro 2. Efecto del contenido de humedad sobre la cohesión y adherencia, resistencia máxima al corte suelo-suelo y suelo-metal, ángulo de fricción interna, esfuerzo máximo y módulo de deformación.

Variables medidas		Humedad (% w/w)					
		2	8	12	15	20	25
Cohesión y adherencia (kPa)	Cohesión	2.5	15	24	0.5	0	0
	Adherencia	0	2.3	0.9	2.3	2.3	0
	suelo	100	78	92	80	68	63
	suelo	128	100	108	95	85	83
	suelo	156	135	130	112	105	107
Resistencia máxima al corte (kPa)	suelo	100	35	45	52	50	41
	metal	128	55	62	68	64	55
	metal	156	67	75	83	74	62
Angulo de fricción interna (grados)	suelo-suelo	23	25	27	26	22	25
	suelo-metal	40	34	29	34	34	34
Esfuerzo cortante máximo (kPa)	suelo-suelo	97	108	90	83	85	83
	suelo-metal	52	60	65	63	54	56
Módulo de deformación k (mm)	suelo-suelo	1.49	2.9	2.2	1.6	1.37	1.45
	suelo-metal	0.64	0.63	0.87	0.95	0.86	0.67

función de las humedades a las cuales se realizaron los ensayos. Así, en el Cuadro 2 se observa que la cohesión alcanza su valor máximo con 12% de humedad, pero con humedades superiores decrece fuertemente hasta un valor próximo a cero. Para la adherencia, en este cuadro se muestra cómo ésta permanece prácticamente constante en un rango de humedad de 8 a 20%. Con un contenido de humedad de 2 y de 25%, el valor de la adherencia es prácticamente nulo.

La variación de la resistencia máxima al corte del suelo en función de su contenido de humedad aparece en el Cuadro 2. En cada uno de los esfuerzos normales aplicados al suelo (100, 128 y 156 kPa) tiene lugar un comportamiento similar. En efecto, la resistencia máxima al corte disminuye gradualmente de valor al aumentar la humedad del suelo desde 8 hasta 15%. Con humedad superior a esta última, la resistencia del suelo permanece constante. Las únicas diferencias observadas entre los tres esfuerzos normales aplicados se aprecian con el contenido más bajo de humedad, ya que con 100 y con 128 kPa la resistencia máxima al corte del suelo aumenta de valor al hacerlo el contenido de humedad del mismo desde 2 hasta 8%, mientras que con el esfuerzo normal de 156 kPa, el valor de la resistencia al corte permanece constante.

Con respecto a la resistencia máxima al corte suelo-metal no ocurre exactamente lo mismo, pues en el Cuadro 2 puede verse cómo a medida que el

contenido de humedad del suelo se incrementa, también lo hace la resistencia máxima al corte suelo-metal, hasta alcanzar un máximo con 12% de humedad. Con humedad superior a esta última se observa una gradual reducción de su valor.

El Cuadro 2 muestra la variación del ángulo de rozamiento interno suelo-suelo y del ángulo de rozamiento suelo-metal para diferente contenido de humedad. En el intervalo de 2 a 12% de humedad, el valor del ángulo de fricción se reduce, mientras que entre 12 y 25% de humedad es notorio un gradual incremento del valor del mismo. Asimismo, el ángulo de rozamiento suelo-metal aumenta de valor conforme el contenido de humedad se incrementa, alcanzando su valor máximo con 12% de humedad. El valor del ángulo de rozamiento suelo-metal disminuye al aumentar la humedad por encima de 12%.

El Cuadro 3 contiene un resumen de las propiedades mecánicas del suelo franco utilizado en los ensayos.

En el ensayo de corte directo y en el de deformación suelo-metal, los valores observados de los esfuerzos cortantes aplicados al suelo y los de los desplazamientos que tienen lugar en el mismo, se ajustaron a una ecuación exponencial (Janosi y Hanamoto, 1963).

En ambos ensayos, el esfuerzo cortante máximo que soporta el suelo varía con el contenido de humedad en la forma que aparece reflejada en el Cuadro 2. Al

Cuadro 3. Variación de la cohesión, ángulo de rozamiento interno, adherencia y ángulo de fricción por efecto del contenido de humedad.

Contenido de humedad	Cohesión	Angulo de rozamiento interno suelo-metal	Adherencia suelo-suelo	Angulo de fricción
% w/w	kPa		kPa	grado
2	1.8	40	0	23
8	15	34	1.2	25
12	25	29	0.5	27
15	0.4	34	1.1	26
20	0	34	1.1	22
25	0	34	0	25

aumentar el contenido de humedad, también lo hace el esfuerzo máximo, alcanzando su valor más alto a 8% de humedad para el caso de la deformación suelo-suelo y a 12% de humedad cuando la deformación es suelo-metal. Alcanzados estos valores, ambos esfuerzos máximos decrecen de valor conforme el contenido de humedad aumenta, respectivamente, hasta 16% y 20%. Con humedades superiores a estas dos, los valores de dichos esfuerzos máximos se mantienen constantes.

Cuadro 4. Valores medios del módulo de deformación suelo-suelo y suelo-metal a diferentes contenidos de humedad y esfuerzos normales.

Contenido de humedad	Esfuerzo normal	Módulo de deformación, k	
		suelo-suelo	suelo-metal
% w/w	kPa	----- mm -----	
2	100	1.437	0.357
	128	1.400	0.550
	156	1.657	1.003
8	100	2.463	0.733
	128	2.813	0.501
	156	3.410	0.653
12	100	2.640	0.727
	128	1.977	0.950
	156	2.000	0.920
15	100	1.547	0.893
	128	1.563	0.857
	156	1.767	1.100
20	100	1.330	0.796
	128	1.387	0.803
	156	1.380	0.997
25	100	1.323	0.553
	128	1.507	0.777
	156	1.523	0.670

En el Cuadro 4, se presentan los valores medios del módulo de deformación suelo-suelo y suelo-metal que se han obtenido en los diferentes contenidos de humedad y esfuerzos normales considerados. El módulo de deformación suelo-suelo y el de deformación suelo-metal varían con el contenido de humedad de un modo similar a cómo lo hacen los respectivos esfuerzos cortantes máximos (Cuadro 2). La única diferencia apreciada se halla en el valor del módulo de deformación suelo-metal, el cual alcanza su valor máximo con 15% de humedad en vez de con 8% de humedad. Tal como se aprecia en el Cuadro 2, al aumentar el contenido de humedad desde 2% hasta 8%, el valor medio del módulo de deformación suelo-suelo crece desde 1.50 mm hasta 2.90 mm. Con una humedad de 12%, el valor del módulo de deformación disminuye hasta 2.21 mm y vuelve a adquirir un valor constante de 1.63 mm con humedades superiores a esta última. Entre 2 y 8% de humedad, el módulo de deformación suelo-metal se mantiene constante e igual a 0.64 mm. Con humedad superior a 8% éste aumenta progresivamente hasta alcanzar el valor máximo de 0.95 mm, con 15% de humedad. A continuación disminuye a medida que la humedad crece hasta 25%.

El Cuadro 5 incluye, tanto para la deformación suelo-suelo como para la deformación suelo-metal, el análisis de varianza con los efectos que tienen la humedad del suelo y el esfuerzo normal que soporta en los valores del esfuerzo cortante máximo y del módulo de deformación. En las Figuras 3 y 4, aparecen, respectivamente, el efecto del esfuerzo normal sobre el valor del esfuerzo cortante máximo suelo-suelo y suelo-metal, y sobre el del módulo de deformación suelo-suelo y el de deformación suelo-metal. Se observa que las cuatro variables carecen de valor, o se mantienen constantes, al hacerlo el esfuerzo normal. En efecto, el esfuerzo cortante máximo suelo-suelo y suelo-metal aumenta linealmente con el esfuerzo

Cuadro 5. Síntesis del análisis de varianza con los efectos del contenido de humedad y del esfuerzo normal en el esfuerzo cortante máximo, τ_m , en el módulo de deformación, k.

	Suelo-suelo		Suelo-metal	
	τ_m (kPa)	k (mm)	τ_m (kPa)	k (mm)
Humedad (% w/w)	***	***	***	***
DMS	3.431	0.306	0.511	0.122
ESfuerzo normal (kPa)	***	***	***	***
DMS	2.426	0.161	0.361	0.086

*** = significativo ($P \leq 1\%$). DMS = diferencia mínima significativa.

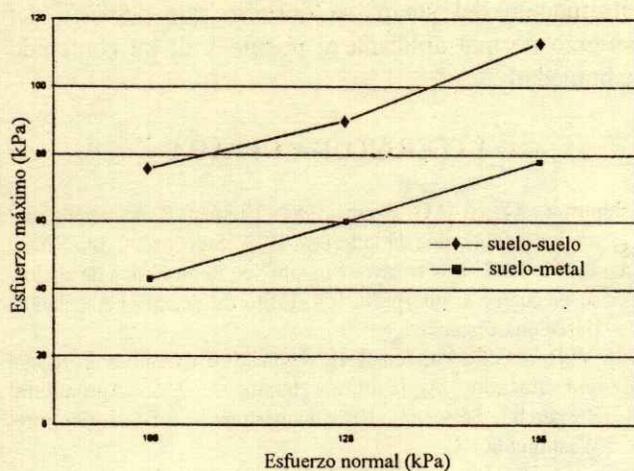


Figura 3. Efecto del esfuerzo normal en el valor medio del esfuerzo máximo.

normal que soporta el suelo. El módulo de deformación suelo-suelo se mantiene constante tanto a 100 kPa de esfuerzo normal como a 128 kPa, pero aumenta cuando el esfuerzo normal se eleva hasta 156 kPa. El módulo de deformación suelo-metal crece linealmente con el esfuerzo normal.

En los ensayos realizados con el equipo de corte directo, se determinaron los parámetros que caracterizan la resistencia al corte del suelo.

Los datos obtenidos muestran que la cohesión alcanza su máximo valor con 12% de humedad, pero también se observó que con humedades superiores decrece fuertemente hasta un valor próximo a cero, coincidiendo con lo mencionado por Stafford y Tanner

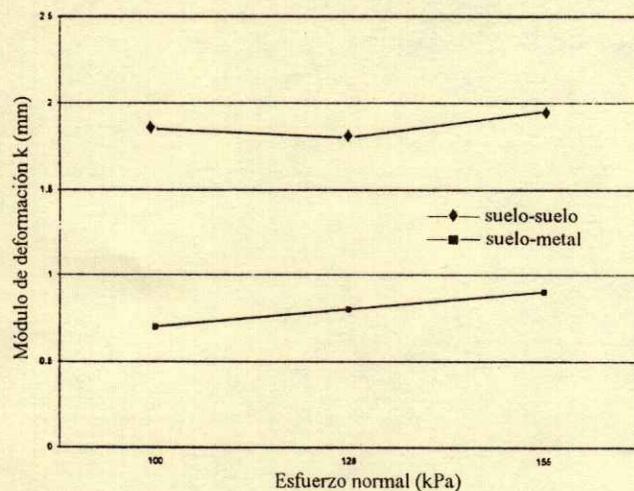


Figura 4. Efecto del esfuerzo normal en el valor medio del módulo de deformación.

(1983). Estos autores observaron, en ensayos realizados en el laboratorio, cómo la cohesión se incrementó con el contenido de humedad hasta un punto máximo y luego decreció conforme aumentó el contenido de humedad.

Los análisis correspondientes a la resistencia máxima al corte suelo-suelo ponen de manifiesto que a bajo contenido de humedad se alcanzó el valor máximo, mientras que para la deformación suelo-metal no ocurre exactamente lo mismo, pues los datos obtenidos reflejan cómo a medida que el contenido de humedad se incrementa, también lo hace la resistencia máxima al corte, alcanzando un máximo con 12% de humedad. A mayor contenido de humedad se observa una gradual reducción de su valor. Según Stafford y Tanner (1983), la resistencia cortante es la mayor responsable de las fuerzas que se presentan en los aperos.

En este trabajo, se observó que la magnitud del esfuerzo de rotura del suelo y la del esfuerzo de adherencia suelo-metal fue función directa del esfuerzo normal aplicado y del contenido de humedad del suelo. En efecto, al aumentar la humedad desde 2 hasta 12%, el valor del ángulo de rozamiento interno se reduce, mientras que entre 12 y 25% de humedad es notorio un gradual incremento del valor del mismo. Este comportamiento difiere del observado por Stafford y Tanner (1983), quienes han afirmado que a bajo contenido de humedad, el valor del ángulo de rozamiento interno es elevado.

El ángulo de fricción suelo-metal aumenta de valor conforme el contenido de humedad se incrementa, y alcanza su valor máximo con 12% de humedad. Superado este límite de humedad, disminuye de valor.

El módulo de deformación del suelo es un buen estimador de la capacidad del mismo para soportar esfuerzos cortantes. Este último es función del esfuerzo cortante, del esfuerzo normal, de la velocidad de corte y del área de contacto de las superficies que deslizan (Godbole *et al.*, 1993).

Con el suelo franco, y en las condiciones en las que los ensayos se llevaron a cabo, se ha observado que el módulo de deformación suelo-suelo y suelo-metal varían con el contenido de humedad de forma similar a cómo lo hacen los respectivos esfuerzos cortantes máximas. La única diferencia encontrada se relaciona con el valor del contenido de humedad donde se alcanzan dichos valores máximos (8% para suelo-suelo y 15% para suelo-metal). El análisis del esfuerzo máximo y del módulo de deformación en relación con

el valor del esfuerzo normal revela que a medida que el esfuerzo normal se incrementa, también lo hacen el esfuerzo máximo y el módulo de deformación.

Updhayaya *et al.* (1993) trabajaron directamente en condiciones de campo y señalaron que en suelo seco el módulo de deformación (k) es independiente de la carga aplicada y de las dimensiones de la placa utilizada, pero cuando el contenido de humedad es elevado, el módulo de deformación (k) depende de ambos factores (tamaño de placa y carga aplicada sobre ella). Estos autores concluyeron su trabajo afirmando que el módulo de deformación es función de la anchura y longitud de la placa, de la carga aplicada y de las propiedades elásticas del suelo. Sin embargo, en este trabajo, y con independencia del contenido de humedad del suelo, se ha observado que el módulo de deformación suelo-suelo y el módulo de deformación suelo-metal dependen de la carga normal aplicada.

CONCLUSION

Bajo las condiciones en que se realizó el trabajo experimental, se concluye que la humedad tuvo un efecto directo sobre la cohesión, no así sobre la adherencia. El ángulo de rozamiento interno suelo-suelo y suelo-metal exhiben comportamientos opuestos: el primero decrece, mientras que el segundo crece gradualmente con la humedad hasta 12% y luego tiende a disminuir. Con respecto al módulo de

deformación del suelo, se observó que depende del esfuerzo normal aplicada al mismo y de su contenido de humedad.

LITERATURA CITADA

- Ashburner, J.E. y B.G. Sims. 1984. Elementos de diseño del tractor y elementos de labranza. IICA. San José, Costa Rica.
- Cassan, M. 1982. Los ensayos "in situ" en la mecánica de suelos, su ejecución e interpretación. Editores Técnicos Asociados. Barcelona, España.
- Gill, W.R. y G.E. Vanden Berg. 1968. Soil dynamics in tillage and traction. Agriculture Handbook 316. Agricultural Research Service. US Department of Agriculture. Washington DC.
- Godbole, R., R. Alcock y D.R.P. Hettiarachi. 1993. The prediction of tractive performance on soil surface. *J. Terramech.* 30: 443-459.
- Janosi, Z. y B. Hanamoto. 1961. The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracker vehicles in deformable soils. Proc. 1st Int. Conf. Terrain Vehicle Systems. Turin, Italy.
- Johnson, C.E., R.D. Girsso, T.A. Nichols y A.C. Bailey. 1987. Shear measurement for agricultural soil: A review. *Trans. ASAE* 30(4): 935-938.
- Stafford, J.V. y D.W. Tanner. 1983. Effect of rate on soil shear strength and soil-metal friction. I. Shear strength. *Soil Till. Res.* 3: 245-260.
- Updhayaya, S., D. Wulfsohn y J. Mehlschau. 1993. An instrumented device to obtain traction related parameters. *J. Terramech.* 30: 1-20.
- Wang, J. y D. Gee-Clough. 1993. Deformation and failure in wet clay soil: Part 2. Soil bin experiment. *J. Agric. Engin. Res.* 54: 57-66.

EFFECTO DE LAS PROPIEDADES FISICAS EN LA FALLA DE UN SUELO DE TEXTURA FRANCA: ANALISIS DE LA LONGITUD DE ONDA Y LA DISTANCIA PICO-PICO

Effect of the Physical Properties in the Failure of a Loam-Textured Soil: Analysis of Wavelength and Peak to Peak Distance

H.M. Durán García¹

RESUMEN

Utilizando un canal de tierra, se evaluaron dos rejas anchas de 100 mm de ancho x 200 mm de longitud y un espesor de 5 mm; una de ellas tenía una inclinación con la horizontal de 45° y la otra una inclinación de 60°. Se analizó el efecto de las propiedades físicas en la falla de un suelo de textura franca, estudiando concretamente la longitud de onda y la distancia pico-pico. La conclusión a la que se llegó fue que la humedad y la profundidad tienen un efecto directo en la magnitud de la longitud de onda y la distancia pico-pico. El proceso de rotura del suelo ocurre cíclicamente y la frecuencia con que la misma tiene lugar depende de su contenido de humedad y del ángulo de inclinación de la herramienta o reja.

Palabras clave: Mini-canal de suelo, labranza.

SUMMARY

In a mini-soil bin, two blades, each 100 mm wide, 200 mm long and 5 mm thick, with two rake angles (45° and 60°), were evaluated. The effect of physical properties was analyzed in the failure of a loam-textured soil, and wavelength and the peak to peak distance were studied. The conclusion was that moisture and depth have a direct effect on wavelength magnitude and on the peak to peak distance. The process of soil failure occurred cyclically and the frequency is a function of the moisture content and the angle of the tool or blade.

Index words: Mini-soil bin, tillage.

¹ Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Dr. Manuel Nava 8, Zona Universitaria, 78290 San Luis Potosí, S.L.P. México. (hduran@uaslp.mx)

Recibido: Octubre de 2000. Aceptado: Mayo de 2002.
Publicado en Terra 20: 235-341.

INTRODUCCION

En la actualidad, el diseño de los aperos de labranza sigue siendo un ejercicio con un fuerte carácter empírico, ya que se apoya en la experiencia acumulada y en la estrategia basada en prueba y error. Ello se debe, a pesar del enorme esfuerzo realizado en las tres últimas décadas, a que no está bien definida y cuantificada la interacción que se establece entre el suelo y las herramientas de trabajo de los aperos (Durán, 1996). La rotura pasiva del suelo ocurre de cuatro formas (Elija y Weber, 1971): por corte, por flujo, por pandeo y por tracción. Sólo la rotura por corte puede predecirse con los modelos teóricos que se fundamentan en los conceptos básicos de la mecánica de suelos. El contenido de humedad del suelo afecta de un modo directo al tipo de rotura que exhibe. Stafford (1979) observó que, al aumentar la humedad del suelo, la rotura del mismo por la acción de una reja dejaba de ser frágil y ocurre por flujo o fluencia. Asimismo, Olson y Weber (1966) afirmaron que si se mantenían constantes la densidad aparente del suelo y su contenido de humedad, la rotura pasiva dejaba de tener lugar por corte para hacerlo por flujo o fluencia al aumentar la velocidad de la reja. Rajaram y Gee-Clough (1988), Sharma *et al.* (1988) y Fielke y Riley (1989) han cuestionado la capacidad de los modelos de predicción para estudiar con cierto grado de precisión la fuerza de tiro que requiere una herramienta de trabajo. Rajaram y Gee-Clough (1988), por ejemplo, observaron en un suelo arcilloso cuatro formas de rotura pasiva por efecto de un diente rígido vertical. En ninguna de estas cuatro formas apreciaron, tal y como admiten por los modelos teóricos desarrollados a partir del criterio clásico de rotura de Mohr-Coulomb, que el suelo rompiera por esfuerzo cortante. Con un contenido gravimétrico de humedad muy bajo (5%), el suelo rompió por colapso; al aumentar la humedad hasta 18%, la rotura ocurrió por fractura; y con 29% tuvo lugar la formación de terrones. Cuando el suelo no se encontró a una humedad de 42%, no se hizo patente la rotura por

flujo plástico. Las roturas por colapso y fractura ocurren periódicamente, ya que la fuerza de tiro varía cíclicamente. En arena seca y suelta, Rajaram y Oida (1988) comprobaron que las rejas anchas producían una rotura cíclica y ésta era uniforme con rejas estrechas. Asimismo, afirmaron enfáticamente que las teorías que explican la rotura pasiva del suelo proporcionan estimaciones muy alejadas de los resultados obtenidos experimentalmente.

En el presente trabajo, se planteó como objetivo el analizar el efecto que tienen la humedad, la densidad, la profundidad y el tipo de reja sobre la longitud de onda y la distancia pico-pico en la falla de un suelo de textura franca.

MATERIALES Y METODOS

Los ensayos se realizaron con tierra procedente del horizonte agrícola, de 0 a 10 cm de profundidad, de un suelo cuyas características físicas y químicas son: arena: 39%; limo: 40%; arcilla, clase textural franca: 21%; densidad real: 2.64 Mg m^{-3} ; pH (en agua 1:2.5): 6.1; conductividad eléctrica: 0.09 dS m^{-1} ; calcio activo: 0%, g g^{-1} ; sodio: 1.5 mg g^{-1} ; materia orgánica: $1.5\% \text{ g g}^{-1}$; carbono: $0.87\% \text{ g g}^{-1}$; límite líquido: 27% H , g g^{-1} ; límite plástico: 19% H , g g^{-1} ; índice de plasticidad: $8\% \text{ g g}^{-1}$; esqueleto grueso ($> 2 \text{ mm}$): $1\% \text{ g g}^{-1}$; clasificación USDA: Haploxeralf vértico.

El trabajo se realizó en un mini canal de tierra, desarrollado y construido por Durán (2000), el cual consta de un cilindro hidráulico y el grupo electro-hidráulico, con capacidad para desplazar las herramientas de trabajo a una velocidad constante de 0 a 350 mm s^{-1} . El cajón del mini canal tiene las siguientes dimensiones: $1000 \times 400 \times 400 \text{ mm}$ de largo, ancho y profundidad. El marco del recipiente fue hecho en perfil angular de acero de $30 \times 30 \text{ mm}$ de lado y 3 mm de espesor. Se utilizó material acrílico de 15 mm de espesor para cubrir las paredes laterales. Para la realización del trabajo, se utilizaron dos rejas con las siguientes dimensiones: 100 mm de ancho x 200 mm de longitud y un espesor de 5 mm, pero una de ellas tenía una inclinación con la horizontal de 45° y la otra una inclinación de 60° . La componente horizontal y vertical de la fuerza total que soporta la reja, así como el momento resultante de las mismas, se midió con ayuda de un dinamómetro o célula de carga. La adquisición de datos se llevó a cabo con ayuda del sistema de adquisición de datos SA64 y AD32-versión 3.0, instalado en una computadora

486 SX de 33 MHz, trabajando al límite práctico de $20\,000 \text{ mediciones s}^{-1}$.

Medición de las Fuerzas en las Rejas, Ejecución de los Ensayos

Los cajones se llenaron con suelo de textura franca, después de ser tamizado con un cedazo de 6 mm de malla. El llenado se hizo por capas con el fin de realizar una compactación uniforme, se mantuvo la densidad de las mismas dentro de los valores fijados en cada ensayo (Cuadro 1). Para cada una de las densidades consideradas, se calculó la cantidad de tierra que debía ocupar un volumen dado del cajón. A continuación se añadió el agua necesaria para alcanzar la humedad requerida y se dejó que toda la tierra consiguiera una humedad uniforme. El cajón se llenó por capas de 18 kg de peso que se compactaron con una masa de 10 kg.

Cumplido el procedimiento anterior, se midió la resistencia a la penetración y se extrajeron muestras de suelo para determinar su contenido de humedad y su densidad aparente. Posteriormente, se colocó el cajón en el mini-laboratorio para llevar a cabo el ensayo. La velocidad a la cual se realizaron todos los ensayos fue de 40 mm s^{-1} .

Cuadro 1. Ensayos realizados en el mini-canal.

Profundidad	Humedad	Densidad	Angulo inclinación	
cm	w w ⁻¹ , (%)	Mg m ⁻³	grado	
10	7	1.25	60	
	7	1.25	45	
	7	1.35	60	
	7	1.35	45	
	10	1.25	60	
	10	1.25	45	
	10	1.35	60	
	10	1.35	45	
	16	1.25	60	
	16	1.25	45	
	16	1.35	60	
	16	1.35	45	
	15	7	1.25	60
		7	1.25	45
		7	1.35	60
		7	1.35	45
10		1.25	60	
10		1.25	45	
10		1.35	60	
10		1.35	45	
16	1.25	60		
16	1.25	45		
16	1.35	60		
16	1.35	45		

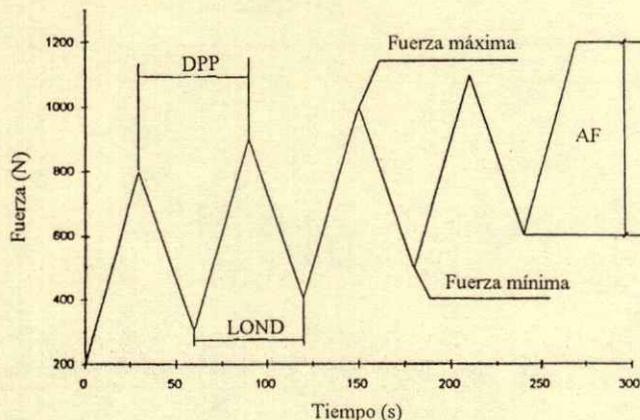
Análisis Estadístico

Por cada ensayo se obtuvieron tres gráficos, uno para la fuerza horizontal, otro para la vertical y uno más para los momentos. En cada uno de estos gráficos se midieron la fuerza máxima; la fuerza mínima; la fuerza media; la distancia pico-pico, esto es, la distancia entre dos valores máximos consecutivos; la longitud de onda, que se ha considerado como la distancia entre dos valores mínimos consecutivos; y la relación fuerza máxima/fuerza mínima, la cual se ha designado como amplitud (Figura 1). El gráfico original guarda información de 0 a 20 s, que es el tiempo que tarda la herramienta en recorrer el cajón. Para evitar posibles efectos del cajón sobre la herramienta de corte, se analizaron los valores registrados en la porción central del trayecto realizado por las herramientas, es decir, el intervalo de tiempo de 5 a 15 s. Con ayuda del programa MSTAT, versión 4.0, se hizo el análisis de varianza de los diferentes parámetros obtenidos de los gráficos, según el diseño factorial utilizado, con tres repeticiones y cuatro factores (humedad, densidad, profundidad y tipo de reja).

RESULTADOS Y DUSCUSION

Se exponen los resultados que corresponden al objetivo planteado en el trabajo experimental (en el Cuadro 2, se muestran las propiedades mecánicas del suelo).

La componente horizontal y vertical de la fuerza total que el suelo opone al desplazamiento de una herramienta de trabajo, en este caso una reja, varían



DPP = distancia pico-pico; LOND = longitud de onda; AF = relación fuerza máxima-fuerza mínima; (s) = segundos (tiempo); (N) = Newtons (fuerza).

Figura 1. Gráfico ideal que muestra las variables analizadas.

Cuadro 2. Propiedades mecánicas del suelo de textura franca utilizado en los ensayos.

Contenido de humedad	Cohesión	Angulo de rozamiento interno suelo/suelo	Adherencia	Angulo de fricción suelo/metal
%, w w ⁻¹	kPa	grado	kPa	grado
2	1.8	40	0	23
8	15	34	1.2	25
12	25	29	0.5	27
15	0.4	34	1.1	26
20	0	34	1.1	22
25	0	34	0	25

cíclicamente. Las magnitudes cíclicas se caracterizan por una serie de parámetros entre los que se pueden considerar los siguientes: el valor máximo, el valor mínimo, el valor medio, la amplitud, la longitud de onda y la distancia pico-pico o distancia entre dos valores máximos. Todos estos parámetros se midieron en cada una de las dos fuerzas, horizontal y vertical, que soportan las dos rejas consideradas en las diferentes condiciones en que se realizaron los experimentos.

Efecto de los Factores Principales sobre la Longitud de Onda y la Distancia Pico-Pico de la Fuerza Pasiva

En los Cuadros 3 y 4, se incluye la información del análisis de varianza realizado para ver en qué medida afectaron las cuatro variables consideradas en los valores de la longitud de onda, la distancia pico-pico y la amplitud de la fuerza.

Cuadro 3. Análisis de varianza con los efectos del contenido de humedad, densidad, profundidad y tipo de reja en la longitud de onda y la distancia pico-pico.

	Lond (s) [†]	DPP (s)	AFH (N)	AFV (N)
Humedad (% w w ⁻¹)	***	***	***	***
DMS	0.264	0.318	24.766	16.853
Densidad (Mg m ⁻³)	NS	NS	***	***
DMS	---	---	20.221	13.760
Profundidad (cm)	***	***	NS	***
DMS	0.216	0.260	---	13.760
Tipo de Reja (°)	**	***	***	***
DMS	0.216	0.260	20.221	13.760

[†] Lond = longitud de onda; DPP = distancia pico-pico; AFH = amplitud fuerza horizontal; AFV = amplitud fuerza vertical; (s) = segundos (tiempo); (N) = Newtons (fuerza).

DMS = diferencia mínima significativa; NS = no significativo; *** = significativo (P ≤ 1%); ** = significativo (P ≤ 5%).

Cuadro 4. Análisis de varianza con los efectos conjuntos humedad-densidad, humedad-profundidad, humedad-tipo de reja, densidad-profundidad, densidad-tipo de reja, profundidad-reja en la longitud de onda, distancia pico-pico y amplitud fuerza horizontal y vertical.

	Lond(s) [†]	DPP(s)	AFH(N)	AFV(N)
Humedad (% w w ⁻¹)-Densidad (Mg m ⁻³)	***	***	***	***
DMS	0.374	0.450	35.024	23.834
Humedad (% w w ⁻¹)-Profundidad (cm)	NS	***	NS	***
DMS	-	0.450	-	23.834
Humedad (% w w ⁻¹)-Tipo de Reja (°)	NS	NS	NS	***
DMS	-	-	-	23.834
Densidad (Mg m ⁻³)-Profundidad (cm)	NS	NS	NS	***
DMS	-	-	-	19.464
Densidad (Mg m ⁻³)-Tipo de Reja (°)	NS	NS	***	NS
DMS	-	-	28.597	-
Profundidad (cm)-Tipo de Reja (°)	NS	NS	NS	***
DMS	-	-	-	19.460

[†] Lond = longitud de onda; DPP = distancia pico-pico; AFH = amplitud fuerza vertical; AFV = amplitud fuerza horizontal; (s) = segundos (tiempo); (N) = Newtons (fuerza).

DMS = diferencia mínima significativa. NS = no significativo. *** = significativo (P ≤ 1%). ** = significativo (P ≤ 5%).

En los tres contenidos de humedad considerados (7, 10 y 16%), los valores medidos de la longitud de onda y de la distancia pico-pico son, prácticamente, iguales (Cuadro 5). Ambas variables crecen de valor al hacerlo la humedad del suelo, pero este aumento es mucho más acusado al pasar de 10% de humedad a 16% que al hacerlo desde 7% de humedad hasta 10%. Aun cuando no hubo un efecto de la densidad del suelo en los valores de la longitud de onda y de la distancia pico-pico, la interacción humedad-densidad sí fue significativa (Cuadro 5). A una densidad de 1.25 Mg m⁻³, estos dos parámetros aumentan de forma

lineal con el contenido de humedad. El comportamiento de los mismos a 1.35 Mg m⁻³ es algo más complejo, ya que disminuyen de valor al aumentar la humedad desde 7 hasta 10% y después crecen de manera espectacular cuando el contenido de humedad se eleva hasta 16%. La profundidad de trabajo afecta a la distancia pico-pico y a la longitud de onda (Cuadro 6). En efecto, mientras que a 10 cm de profundidad la longitud de onda coincide con la distancia pico-pico, a 15 cm aquella es mayor que esta última que, a su vez, alcanza el mismo valor a 10 cm. Al analizar el efecto de la interacción

Cuadro 5. Efecto de la humedad sobre las variables longitud de onda, distancia pico-pico y amplitud de la fuerza.

Variables medidas		Humedad (%)		
		7	10	16
Longitud de onda y distancia pico-pico (s)	Longitud de onda	1.8	2	3.4
	Distancia pico-pico	1.8	2.2	3.3
Longitud de onda (s)	1.25 Mg m ⁻³	1.75	2.4	3.26
	1.35 Mg m ⁻³	2	1.8	3.4
Distancia pico-pico (s)	1.25 Mg m ⁻³	1.55	2.4	3.15
	1.35 Mg m ⁻³	2.1	1.6	3.5
Distancia pico-pico (s)	Profundidad 10 cm	1.6	1.9	3.3
	Profundidad 15 cm	2.2	2.2	3.4
Amplitud de la fuerza (N)	Horizontal	160	150	60
	Vertical	130	140	80
Amplitud fuerza horizontal (N)	1.25 Mg m ⁻³	145	100	70
	1.35 Mg m ⁻³	175	220	60
Amplitud fuerza vertical (N)	1.25 Mg m ⁻³	110	90	70
	1.35 Mg m ⁻³	150	190	85
Amplitud fuerza vertical (N)	Profundidad 10 cm	106	130	80
	Profundidad 15 cm	154	160	84
Amplitud fuerza vertical (N)	Reja 45°	110	96	178
	Reja 60°	153	100	62

(s) = segundos (tiempo); (N) = Newtons (fuerza).

Cuadro 6. Efecto de la profundidad sobre las variables amplitud de la fuerza, longitud de onda y distancia pico-pico.

Variables medidas		Profundidad (cm)	
		10	15
Longitud de onda y distancia pico-pico (s)	Longitud de onda	2.2	2.65
	Distancia pico-pico	2.25	2.28
Amplitud de la fuerza (N)	Horizontal	130	125
	Vertical	105	128
Amplitud fuerza vertical (N)	1.25 Mg m ⁻³	90	120
	1.35 Mg m ⁻³	93	170
Amplitud fuerza vertical (N)	Reja 45°	85	98
	Reja 60°	120	160

(s) = segundos (tiempo); (N) = Newtons (fuerza).

humedad-profundidad sobre el valor de la distancia pico-pico (Cuadro 5), se observa que tanto a 7% como a 10% de humedad, la distancia pico-pico correspondiente a una densidad de 1.35 Mg m⁻³ es mayor que la correspondiente a una densidad de 1.25 Mg m⁻³. A la humedad de 16%, se igualan los valores de la distancia pico-pico obtenidos con las dos densidades. Para una densidad dada, la distancia pico-pico aumenta al hacerlo el contenido de humedad del suelo, siendo más acusado este aumento cuanto mayor es la humedad. Tanto con la reja inclinada 45°, como con la reja inclinada 60°, los valores de la distancia pico-pico coincidieron con los de la longitud de onda, si bien, resultaron ser mayores los obtenidos con la segunda reja (Cuadro 7). En los Cuadros 5, 6, 7 y 8 aparecen, respectivamente, el efecto de la humedad, densidad, profundidad e inclinación de la reja sobre el valor medio de la amplitud de la fuerza horizontal y sobre el de la fuerza vertical. La amplitud de ambas fuerzas muestra una clara tendencia a reducir su valor a medida que aumenta el contenido de humedad del suelo. Por el contrario, cuanto mayor es la densidad del suelo, mayor es también el valor de la amplitud de ambas fuerzas. La amplitud de la fuerza

Cuadro 7. Efecto de la inclinación de la reja sobre las variables amplitud de la fuerza, longitud de onda y distancia pico-pico.

Variables medidas		Inclinación reja (grados)	
		45	60
Longitud de onda y distancia pico-pico (s)	Longitud onda	2.2	2.8
	Distancia pico-pico	2.1	2.7
Amplitud de la fuerza (s)	Horizontal	120	130
	Vertical	95	142

(s) = segundos (tiempo).

Cuadro 8. Efecto de la densidad sobre la variable amplitud de la fuerza.

Variables medidas		Densidad (Mg m ⁻³)	
		1.25	1.35
Amplitud de la fuerza (N)	Horizontal	106	145
	Vertical	90	140
Amplitud de la fuerza horizontal (N)	Reja 45°	85	150
	Reja 60°	125	145

(N) = Newtons (fuerza).

horizontal no se afecta por la profundidad de trabajo, mientras que la de la fuerza vertical aumenta al hacerlo aquella. Asimismo, cuanto mayor es la inclinación de la reja, mayor es la amplitud de las dos fuerzas, pero este incremento de valor es más acusado en la fuerza vertical. El efecto de la interacción humedad-densidad sobre el valor medio de la amplitud de la fuerza vertical y horizontal puede verse en el Cuadro 5. A una densidad de 1.25 Mg m⁻³ se observa que la amplitud de ambas fuerzas disminuye al aumentar la humedad del suelo, pero a 1.35 Mg m⁻³ de densidad se aprecia que a 10% de humedad, la amplitud de las dos fuerzas alcanza su valor máximo. El Cuadro 8 muestra la interacción densidad-inclinación de la reja en el valor medio de la amplitud de la fuerza horizontal. La amplitud crece de valor conforme se incrementan la densidad y el ángulo de inclinación. Con respecto a la influencia de la interacción humedad-profundidad de trabajo sobre el valor medio de la amplitud de la fuerza vertical (Cuadro 5), cabe destacar que a 15 cm de profundidad la amplitud disminuye ligeramente de valor al pasar de 7% de humedad a 10% de humedad, y lo hace de una forma más acusada cuando la humedad se eleva hasta 16%. A una profundidad de trabajo inferior (10 cm), el comportamiento observado es ligeramente diferente. Así, la amplitud crece al pasar de 7 a 10% de humedad y luego disminuye cuando la humedad es de 16%. A este último contenido de humedad, la amplitud de la fuerza vertical a 10 cm de profundidad coincide con la amplitud de la de 15 cm de profundidad. Sin embargo, con un contenido de humedad inferior (10 y 7%), la amplitud de la fuerza vertical correspondiente a 15 cm de profundidad es mayor que la correspondiente a 10 cm. Al analizar el efecto de la interacción densidad-profundidad de trabajo se observa que en ambas densidades al aumentar la profundidad aumenta la amplitud de la fuerza vertical (Cuadro 6), siendo mucho más acusado este aumento a 1.35 Mg m⁻³ que a 1.25 Mg m⁻³. En la reja inclinada 60°, la amplitud de la fuerza vertical

disminuye al aumentar la humedad del suelo (Cuadro 5). Por el contrario, en la reja inclinada 45°, la amplitud de esta misma fuerza disminuye ligeramente al aumentar la humedad desde 7 hasta 10%, después crece, duplicándose prácticamente su valor cuando la humedad se sitúa en 16%. Ambas rejas exhiben la misma amplitud cuando el contenido de humedad es de 10%. Por debajo de este valor (7%), la amplitud de la reja inclinada 60° es mayor que la de la reja inclinada 45°, pero por encima de dicho valor (16%), ocurre lo contrario. Tanto a 10 cm como a 15 cm de profundidad de trabajo, la amplitud de la fuerza vertical correspondiente a la reja inclinada 60° es mayor que la de la reja inclinada 45° (Cuadro 6). Asimismo, para una reja dada, cuanto mayor es la profundidad de trabajo, mayor es la amplitud de la fuerza vertical.

La longitud de onda y la distancia pico-pico presentaron un comportamiento muy semejante. Así, a medida que la humedad se incrementa, también lo hace la magnitud de ambas variables. Al analizar la interacción humedad-profundidad se observa que en cada una de las dos profundidades consideradas, ambas variables aumentan de valor con el contenido de humedad, mientras que la amplitud de la fuerza horizontal y la de la vertical tienden a disminuir conforme la humedad se incrementa. La amplitud de la fuerza horizontal y la de la vertical tienden a aumentar conforme la densidad se incrementa. Al analizar la amplitud de la fuerza horizontal con respecto a la densidad del suelo y a la inclinación de la reja, se observa que si la densidad se incrementa, también se incrementa la amplitud de la fuerza horizontal. Quisen y Shuren (1994) comprobaron, trabajando en un mini-laboratorio con hojas de bulldózer de escala reducida, que la densidad del suelo y la profundidad de trabajo influyen en el valor medio de la fuerza y en la fluctuación de la amplitud de la misma. La longitud de onda aumentó de valor al aumentar la profundidad de trabajo de la reja, mientras que la distancia pico-pico permanece constante. La amplitud de la fuerza vertical se incrementa conforme lo hace la profundidad de trabajo. Para una profundidad de trabajo dada, la amplitud de esta fuerza aumenta con la densidad aparente del suelo. Este comportamiento es común a los dos tipos de rejas comparados. Del análisis del efecto del tipo de reja en el valor medio de la longitud de onda y en el de la distancia pico-pico cabe destacar que, a medida que se incrementa el ángulo de inclinación de la reja, se incrementan la distancia

pico-pico, la longitud de onda y la amplitud de la fuerza. Este aumento de la amplitud es más patente en el caso de la fuerza vertical. Sharma *et al.* (1994) trabajaron en un mini-laboratorio con arena seca y analizaron el efecto del ángulo de inclinación de una reja en el valor de la longitud de onda de la fuerza horizontal y vertical. Estos autores observaron que, a medida que el ángulo de corte se incrementa, también lo hace la longitud de onda. Este mismo comportamiento ocurrió al analizar la fuerza mínima y la amplitud de la fuerza con respecto al ángulo de corte.

CONCLUSIONES

- El proceso de rotura del suelo ocurre cíclicamente y la frecuencia con que la misma tiene lugar depende de su contenido de humedad y del ángulo de inclinación de la herramienta o reja.
- La humedad tiene un efecto directo sobre la magnitud de la longitud de onda y la distancia pico-pico; si la humedad se incrementa, también se incrementa la magnitud de ambas. A mayor densidad, mayor es el valor de la amplitud de la fuerza horizontal y vertical. La amplitud de la fuerza horizontal no se afectó por la profundidad de trabajo, mientras que la de la fuerza vertical aumentó al hacerlo la profundidad; para el caso de la longitud de onda, ésta aumentó de valor al aumentar la profundidad de trabajo.
- Si se mantiene constante el contenido de humedad del suelo, la densidad del mismo y la profundidad de trabajo de la herramienta, los valores de la longitud de onda y de la distancia pico-pico de la fuerza cíclica que actúa sobre la reja son mayores en la reja inclinada 60° que en la reja inclinada 45°. Esto es, para una misma distancia recorrida por las rejas, el número de veces que rompe el suelo es menor en la reja de 60° que en la de 45°.
- Como propuesta para futuros trabajos se considera el análisis espectral de las fuerzas medidas en diferentes herramientas de trabajo y condición del suelo. Para ello, se tendrá en cuenta que estas fuerzas son una variable aleatoria del tiempo. Dicho análisis permite relacionar la varianza de la serie temporal con su frecuencia.

LITERATURA CITADA

- Durán G., H.M. 1996. Rotura pasiva de un suelo franco con diferentes herramientas de laboreo. Tesis Doctoral.

- ETSI-Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Durán G., H.M. 2000. Development and construction of a mini-soil bin. *Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America*. Japan J. 31(2): 27-28.
- Elija, D.L. y J.A. Weber. 1971. Soil failure and pressure patterns for flat cutting blades. *Trans. ASAE* 14(4): 781-785.
- Fielke, J.M. y T.W. Riley. 1989. Earth moving equation applied to chisel plow wings. *International Summer Meeting of the ASAE*. Quebec, Canada.
- Olson, D.J. y J.A. Weber. 1966. Effect of speed on soil failure patterns in front of model tillage tools. *Trans. Soc. Auto. Eng.* 74: 298-310.
- Quinsen, Y. y S. Shuren. 1994. A soil-tool interaction model for bulldozer blades. *J. Terramech.* 31: 55-65.
- Rajaram, G. y D. Gee-Clough. 1988. Force-distance behaviour of tine implements. *J. Agric. Eng. Res.* 41: 81-98.
- Rajaram, G. y A. Oida. 1988. Deformation of dry loose sand as caused by tine implements. pp. 161-171. *In: Proc. 2nd Asia-Pacific Conference of International Society for Terrain-Vehicle Systems*. Bangkok, Thailand.
- Sharma V., K., G. Singh y D. Gee-Clough. 1988. Model for prediction of tine forces: A-review. pp. 173-193. *In: Proc. 2nd Asia-Pacific Conference of the International Society for Terrain Vehicle Systems*. Bangkok, Thailand.
- Sharma V., K., G. Singh y D. Gee-Clough. 1994. Force-tine behaviour of flat tines in dry sand. *J. Agric. Eng. Res.* 57: 191-197.
- Stafford, J.V. 1979. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed. *J. Agric. Eng. Res.* 24: 41-56.

CONTAMINACION AMBIENTAL EN LA REGION DE ATLIXCO: 1. AGUA

Pollution in the Atlixco Region: 1. Water

Sonia Emilia Silva Gómez¹, Abel Muñoz Orozco^{2†}, María de Lourdes de la Isla de Bauer³ y Said Infante Gil⁴

RESUMEN

En México, la agricultura enfrenta el problema del deterioro ambiental. En la región atlixquense del estado de Puebla, la contaminación del agua es un elemento importante que incide en la calidad de la producción agrícola y en la salud de la población. Se analizaron muestras de agua de esa región, colectadas en dos estaciones del año, con el objetivo de determinar su calidad de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas 001- ECOL-1996 y 127-SSA1-1994. Hubo diferencias significativas en las variables estudiadas según la época del año: los valores de las siguientes variables son mayores en primavera que en verano: demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (28 y 3 mg L⁻¹, respectivamente), demanda química de oxígeno (DQO) (16 y 8 mg L⁻¹), dureza (133 y 60 mg L⁻¹), temperatura (21 y 18 °C) y Zn (0.021 y 0.004 mg L⁻¹); las siguientes variables son mayores en verano, que en primavera: Fe (0.1 y 0.01 mg L⁻¹, respectivamente), N amoniacal (0.5 y 0.01 mg L⁻¹), pH (7.8 y 7.4), sólidos sedimentables (0.2 y 0.1 mg L⁻¹), sólidos suspendidos (31 y 8 mg L⁻¹) y turbidez (1.2 y 1.0 mg L⁻¹). Los pozos, manantiales y escurrimientos exceden las normas en nitritos, Cd, Pb, coliformes fecales y totales; los ríos en nitritos, sustancias activas al azul de metileno, N amoniacal, Cd, Cr, Pb, coliformes fecales y totales. Finalmente, se hizo un análisis del problema que representa esta contaminación para la salud humana y, en general, para el desarrollo rural.

Palabras clave: Agua residual, calidad del agua, agua subterránea, agua superficial.

SUMMARY

In Mexico, agriculture faces the problem of environmental deterioration. In the Atlixco region,

^{1,4}Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática; ²Instituto de Recursos Genéticos y Productividad; ³Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Estado de México. [†](amunozco@colpos.mx)

Recibido: Mayo de 2000. Aceptado: Marzo de 2002.
Publicado en Terra 20: 243-251.

state of Puebla, water pollution is an important element affecting crop quality and human health. Water samples were collected at 16 sites of the Atlixco region in two seasons of the year to determine water quality, relative to the Official Mexican Norms 001-ECOL-1996 and 127-SSA1-1994. There were significant differences in the variables studied, according to the season. Values for biochemical oxygen demand (BOD) (28 and 3 mg L⁻¹), chemical oxygen demand (COD) (16 and 8 mg L⁻¹), hardness (133 and 60 mg L⁻¹), temperature (21 and 18 °C), and Zn (0.021 and 0.004 mg L⁻¹) were higher in spring than in summer, while those for Fe (0.1 and 0.01 mg L⁻¹), ammoniacal N (0.5 and 0.01 mg L⁻¹), pH (7.8 and 7.4), sedimentable solids (0.2 and 0.1 mg L⁻¹), suspended solids (31 and 8 mg L⁻¹), and turbidity (1.2 and 1.0 mg L⁻¹) were higher in summer than in spring. Water from wells, springs and trickles exceeds the Mexican norms for nitrites, Cd, Pb, fecal and total coliforms, while river water exceeds the norms in nitrites, methylene-blue active substances, ammoniacal N, Cd, Cr, Pb, and fecal and total coliforms. Finally, an analysis of the impact of pollution on human health and on rural development in general is presented.

Index words: Wastewater, water quality, ground water, surface water.

INTRODUCCION

En México, actualmente, uno de los graves problemas de la agricultura y, en particular, en la región atlixquense de Puebla, es el deterioro ambiental. Un componente importante de este fenómeno es la contaminación del agua de ríos, manantiales y la extraída de los pozos por bombeo, lo que genera graves problemas para la salud humana, en forma directa o a través de la cadena trófica. Con el objeto de regular la administración del agua, se creó la Comisión Nacional del Agua (CNA), en 1989; se promulgaron la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN), en 1992; la Ley de Aguas Nacionales, en 1992; y el Reglamento de ésta, en

1994 (Brañes, 1994). Dentro de la LFMN, se establecieron la Norma Oficial Mexicana de Agua para Consumo Humano y la de Límites de Contaminantes del Agua (DOF, 1997a,b)

Al agua contaminada, en general, se le califica como residual. Por las fuentes de generación, se define como la combinación de los residuos líquidos procedentes de residencias, instituciones públicas, establecimientos industriales y comerciales. En ocasiones, se incluyen a las aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf *et al.*, 1996).

En México, el uso de aguas residuales para regar parcelas agrícolas inició en el Valle del Mezquital, en 1886. Los altos grados de contaminantes y la cantidad de patógenos encontrados en agua, productos agrícolas y suelo, en parcelas continuamente regadas por aguas residuales, han provocado problemas de salud a los campesinos (Rowe, 1995).

Las mermas en la salud y eficiencia del campesino por la contaminación del agua, aunada a factores políticos y económicos que obstaculizan la actividad agrícola en zonas de temporal y pequeña irrigación, destacan la complejidad de la problemática del campo y de la producción de alimentos básicos necesarios en la dieta de los sectores de las poblaciones más desprotegidas, y subraya la urgencia de desarrollar proyectos de investigación y de definir y establecer estrategias dirigidas al desarrollo agrícola regional.

La asociación causal entre el uso humano de agua biológicamente contaminada y la aparición de gastroenteritis es un hecho bien establecido, así como la asociación entre el uso de agua químicamente contaminada e intoxicaciones, y la relación entre el uso de agua contaminada por metales pesados y cáncer (Finkelman, 1990). Al respecto, Cervantes y Moreno (1999) señalaron al Cr (VI), Ni, Co, Cd, As (III) y Pb como carcinogénicos para el humano; este efecto se relaciona con la inducción del daño oxidativo del DNA y con la inhibición de los procesos de reparación del DNA (Hartwig, 1995). Shoental (1975) explicó la carcinogenicidad ocasionada en particular por el Cr, por la producción de epoxialdehidos en una reacción catalizada por lipasas lisosomales, y Gómez-Arroyo *et al.* (1981) la explicaron por el intercambio de cromátidas hermanas en cultivos de linfocitos humanos. Evidencias de los daños de los metales pesados en humanos en México, registran a poblaciones de alto riesgo, como niños, mujeres embarazadas y ancianos, en San Luis Potosí (Díaz-Barriga *et al.*, 1993), en Xalostoc y Tlalnepantla en la Ciudad de México (Oláiz *et al.*, 1996), en

Monterrey (Junco-Muñoz *et al.*, 1996) y en Torreón, Coahuila (Calderón-Salinas *et al.*, 1996).

El Pb, proveniente de actividades industriales y del uso de hidrocarburos, interfiere con el metabolismo y la función celular. Las altas concentraciones de este metal, que en la sangre tiene una vida media de uno a dos meses y en el hueso de 20 a 30 años, pueden producir efectos dañinos sobre los sistemas hematopoyético (formación de glóbulos rojos), hepático, renal, reproductivo y gastrointestinal. Entre las poblaciones de alto riesgo están las mujeres en edad reproductiva y los niños (Jiménez *et al.*, 1993).

Los efectos del Pb en niños se manifiestan en el sistema nervioso central; causa daño neuroconductual, que se refleja en el decremento de la atención, bajos puntajes en pruebas psicométricas y problemas de conducta como la hiperactividad; a largo plazo, cerca de 95% del metal presente en el organismo se acumula a nivel óseo, sustituyendo al Ca. Se sabe que también ocurre transferencia placentaria de plomo (Jiménez *et al.*, 1993).

El Cd, proveniente de la elaboración y del uso de pigmentos y pinturas, tintas de imprenta, pilas y plásticos, es llevado al cuerpo humano mediante la ingestión de vegetales y en éste tiene una vida media de 10 a 30 años. Aun cuando su absorción por el tracto respiratorio es más completa, la absorción por el tracto gastrointestinal, mediante la ingestión de alimentos y agua, induce osteomalacia, osteoporosis, lesiones renales e hipertensión. Causa irritación severa del estómago, vómito y diarrea; en mayores cantidades es carcinógeno. En ganado mayor, el Cd causa hipertensión (Mitchell, 1998); en vegetales, reduce el crecimiento, induce clorosis, inhibe la oxigenación de semillas y reduce la germinación, la respiración y la fotosíntesis (Iqbal y Khalid, 1998).

Todas las formas de Cr, en grandes cantidades, son tóxicas, pero lo es más el Cr⁶⁺. En humanos produce úlceras estomacales, convulsiones, alergias en la piel y males renales, hepáticos y pulmonares; resta capacidad a las propiedades de la sangre y reduce la de los glóbulos rojos (Willis, 1998).

Por su parte, en México, el intercambio comercial de productos frescos provenientes de la región de Atlixco se ha tornado más difícil en los últimos 15 años, ya que en la Ciudad de México y en mercados regionales (Tepeaca, Acatzingo, Puebla) se conoce la condición de los cultivos regados con aguas residuales, lo que dificulta su venta.

Investigadores del estado de Puebla han hecho estudios de contaminación de aguas, plantas y suelo (Bonilla *et al.*, 1995; Romero *et al.*, 1995; Tamariz, 1996) en la región atlixquense relacionados con el río Nexapa, afluente del Atoyac. Bonilla *et al.* (1995) encontraron concentraciones (en mg L^{-1}) de Cu, Cr y Cd en agua, que rebasaron las concentraciones permitidas por la NOM-032 ECO-1993. Romero *et al.* (1995) registraron Cu y Cr en las mismas condiciones. Tamariz (1996) observó concentraciones de Cu, Cr, Co, Ni, Pb y Fe en agua más altas que las permitidas en la norma CECCA-001-89.

La Comisión Nacional del Agua (CNA) hizo determinaciones en algunos puntos de la zona objeto de este estudio y encontró valores de coliformes fecales y totales, y Cr que exceden las cantidades permitidas (CNA, 1992; 1995; 1997a,b; 1999).

En el municipio de Atlixco, Córdoba *et al.* (1991) observaron que el manejo de las aguas residuales implica decremento en el rendimiento humano, en particular, de los agricultores y sus familias, ya que merma su salud. El rendimiento de algunos cultivos baja a través de varias cosechas, ya que determinadas concentraciones de metales pesados inhiben el crecimiento de la planta y la producción de flores y frutos. Además, el suelo pierde sistemáticamente sus propiedades; por ejemplo, la acción del Pb limita la microbiota e impide la descomposición de la materia orgánica del suelo (Hughes *et al.*, 1980).

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la contaminación del agua en la región atlixquense, a fin de comparar las diferentes fuentes de agua utilizadas, y relacionarlas con sus efectos sobre la salud humana y sobre algunos factores vinculados con el desarrollo rural. Por su importancia, se tomaron como referencia los valores incluidos en las Normas Oficiales Mexicanas NOM-127-SSA1-1994 y NOM-001-ECOL-1996.

Este es el primer artículo de una serie de estudios que analiza la contaminación ambiental en la región de Atlixco, de distintos factores y por diferentes fuentes.

MATERIALES Y METODOS

La región atlixquense se localiza al oeste del estado de Puebla, en el centro de México; comprende los municipios de Atlixco, Huaquechula, Santa Isabel Cholula, Tianguismanalco y Tochimilco y se ubica en las coordenadas $18^{\circ} 40'$ y $19^{\circ} 02'$ N y $98^{\circ} 17'$ y $98^{\circ} 43'$ O. Es parte de la cuenca del río Balsas,

subcuenca del río Nexapa, la que está formada por los ríos Huilapa y Xalapesco, que recogen los escurrimientos de los deshielos del volcán Popocatepetl (SARH-CP, 1986).

Con fundamento en las características de las principales subcuencas hidrológicas de la zona de estudio, se colectaron muestras de agua en 16 sitios de río, manantial, escurrimiento y pozo. El agua de 11 sitios se usa como potable y para riego (la de San Jerónimo Caleras, San Diego Acapulco, Los Molinos, Santa Cruz Cuautomatitla, Tochimizolco, Tochimilco, Tianguismanalco, Huaquechula, Tezonteapan de Bonilla, Huilango y Tehuixpango) y la de cinco sitios se utiliza para riego (la de Coyula, Tlapetlahuaya, Champusco, Ahuehuete y Portezuelo).

La colecta se realizó en dos épocas del año: la de lluvias, en 1998 (verano), y la de secas, en 1999 (primavera). Las muestras se colectaron en cada sitio durante la mañana de cada día, se llenó una cuarta parte del recipiente cada media hora, durante noventa minutos continuos. Para la colecta, se usaron envases plásticos limpios y secos de 2 L; se llenaron en pozo y a contracorriente, en río, manantial y escurrimiento, para el análisis fisicoquímico. También se usaron bolsas estériles de 100 mL: se abrió la bolsa dentro del agua y se selló ahí mismo después de llenarla, para análisis biológicos. En cada sitio, se tomaron datos de campo: lugar, hora, fecha, temperatura y color. Por la tarde del mismo día de colecta, las muestras se trasladaron al laboratorio para su conservación. El manejo y la preservación de las muestras se realizaron siguiendo los procedimientos recomendados por US-EPA (1974).

Los análisis fisicoquímicos y biológicos del agua se hicieron tomando en cuenta los valores de referencia incluidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, y en la NOM-127-SSA1-1994, respecto a salud ambiental, agua para uso y consumo humano; en ellas se indican los métodos recomendados para identificar y cuantificar cada contaminante.

Se analizaron tres repeticiones de las muestras y se promediaron los resultados. Los resultados de los análisis fisicoquímicos, biológicos y de metales pesados se compararon con los límites permitidos de los contaminantes señalados por cada norma oficial: 20 de la NOM-001-ECOL-1996 y 30 de la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 1997a,b), ya que el uso del agua analizada fue potable y para riego. La

comparación se hizo de dos formas: por sitio y por grupo, considerando la fuente de donde provinieron las muestras; en este caso se confrontaron promedios.

Con las concentraciones de cada contaminante por sitio en primavera y en verano, se realizó la prueba estadística de Mann-Whitney, con el propósito de observar las diferencias significativas entre ambas estaciones, tomando en cuenta una probabilidad de 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los contaminantes que excedieron las normas son: coliformes fecales, coliformes totales, nitritos, Cd y Pb en los casos de pozo, río, manantial y escurrimiento en verano y en primavera; así como el N amoniacal y sustancias activas al azul de metileno en agua de río en ambas épocas; y Cr en río, en verano (Cuadro 1).

Contaminantes en Cada Sitio

En los Cuadros 2a, 2b y 2c se presentan los valores obtenidos para cada uno de los contaminantes, en 16 localidades. En estos cuadros se aprecian las determinaciones que estuvieron por arriba de los valores permitidos. En el Cuadro 2a se observa que los coliformes fecales y totales rebasaron a la Norma 127 en todos los sitios, en ambas épocas del año; los coliformes fecales rebasaron la Norma 001 en 10 sitios en verano y en nueve sitios en primavera; la dureza excedió los límites de la Norma 127 en Tezonteapan y Champusco, en primavera; los nitratos en Tianguismanalco y Ahuehuate, en verano. En el Cuadro 2b, los nitritos excedieron la NOM-127-

SSA1-1994 en 11 sitios, en ambas estaciones, excepto Cuautamatitla, Coyula, Tianguismanalco, Tlapetlahuaya y Portezuelo; las sustancias activas al azul de metileno excedieron la norma en Coyula y Portezuelo, tanto en verano como en primavera; el color la excedió en Cuautamatitla y Portezuelo, en primavera; los sólidos disueltos totales la excedieron en Ahuehuate, en primavera, y el Al, en Portezuelo, en ambas estaciones. En el Cuadro 2c, el N amoniacal excedió la Norma 127 en Tochimizolco, Huaquechula, Champusco, Ahuehuate, Portezuelo y Tehuixpango, en verano, y en Champusco, Ahuehuate y Tehuixpango, en primavera; el Cd excedió la norma en todos los sitios, en verano y en primavera en las mismas concentraciones; el Cr la excedió en Caleras, en verano, y en Acapulco, en primavera; el Fe la excedió en Portezuelo, en verano; y el Pb la excedió en todos los sitios, en verano y en primavera.

Concentraciones de Contaminantes en Verano y en Primavera

De acuerdo con la prueba de Mann-Whitney, las determinaciones de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), dureza, temperatura y Zn fueron mayores en primavera que en verano en forma significativa; en tanto que en verano las cantidades de Fe, N amoniacal, pH, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y turbidez fueron mayores que en primavera, también en forma significativa (Cuadro 3). Las cantidades de contaminantes que resultaron mayores en primavera, lo estuvieron en menores cantidades en verano, posiblemente debido a su dilución por las lluvias. Los metales pesados y los

Cuadro 1. Promedio de las concentraciones de los contaminantes que exceden las normas oficiales, determinados en el agua muestreada por tipo de fuente, en verano (V) de 1998 y en primavera (P) de 1999.

Parámetro	Pozo		Río		Manantial		Escurrimiento	
	V	P	V	P	V	P	V	P
Coliformes fecales (NMP 100 mL ⁻¹)	52	60	814	<u>7823</u>	<u>1400</u>	<u>2358</u>	1000	<u>4600</u>
Coliformes totales (NMP 100 mL ⁻¹)	81	155	671	<u>16923</u>	<u>4670</u>	<u>5280</u>	8775	<u>9950</u>
N-amoniacal (mg L ⁻¹)	0.6	0.01	2.2	3.3	0.12	0.01	0.2	0.01
N-nitritos (mg L ⁻¹)	1.1	1.2	0.4	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1
Sustancias activas al azul de metileno (mg L ⁻¹)	0.01	0.01	0.6	0.9	0.09	0.14	0.12	0.22
Cd (mg L ⁻¹)	0.006	0.006						
Cr (mg L ⁻¹)	0.01	0.01	0.07	0.01	0.04	0.04	0.02	0.02
Pb (mg L ⁻¹)	0.08	0.08						

En negritas las cantidades que rebasan la NOM-127-SSA1-1994. Subrayadas las cantidades que rebasan la NOM-001-ECOL-1996. V = verano; P = primavera; NMP = número más probable.

Cuadro 2a. Concentraciones de los contaminantes que excedieron las normas oficiales, determinados en el agua muestreada, en cada sitio estudiado.

Sitio	Coliformes				Dureza		Nitratos	
	Fecales		Totales		V	P	V	P
	V	P	V	P				
	NMP 100 mL ⁻¹				mg L ⁻¹			
1. Caleras	2800	46000	11000	110000	212	260	0.3	2.15
2. Acapulco	1100	750	2400	2400	76	120	0.3	3.32
3. Molinos	1100	750	2400	2100	32	102	5.7	7.90
4. Cuautamatitla	2000	7500	21000	15000	70	74	3.0	1.70
5. Tochimizolco	2000	2300	2800	7500	44	74	0.5	0.17
6. Tochimilco	2100	7500	11000	15000	44	60	2.3	1.95
7. Coyula †	700	4600	1500	9300	50	96	6.3	0.32
8. Tianguismanalco	30	24000	300	46000	60	74	12.04	0.14
9. Tlapetlahuaya †	1100	460	2800	460	86	160	1.7	0.21
10. Huaquechula	1100	75	2000	200	22	146	1.7	0
11. Tezonteapan	1100	46	24000	110	28	520	7.3	7.57
12. Champusco †	700	460	1100	2400	132	554	4.9	8.85
13. Ahuehuete †	700	46000	1100	110000	224	480	12.91	7.84
14. Portezuelo †	1100	1100	2500	2400	232	485	1.6	1.01
15. Huilango	3	1100	30	2300	18	116	3.7	1.60
16. Tehuixpango	3	750	30	1100	60	162	7.8	5.12
NOM-127-SSA1-1994	0		2		500		10	
NOM-001-ECOL-1996	1000		--		--		--	

En negritas las cantidades que rebasan la NOM-127-SSA1-1994. Subrayadas las cantidades que rebasan la NOM-001-ECOL-1996. -- contaminante no incluido en la norma. † Sólo para riego. Sin † para uso potable y para riego. V = verano; P = primavera; NMP = número más probable.

Cuadro 2b. Concentraciones de los contaminantes que excedieron las normas oficiales, determinados en el agua muestreada, en cada sitio estudiado.

Sitio	Nitritos		SAAM [§]		Color U.Pt-Co.†		Sólidos disueltos totales		Al	
	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P
1. Caleras	0.1	0.12		0.2	5	5	409	360	0.01	0.011
2. Acapulco	0.2	0.26		0.1	10	5	353	303	0.04	0.045
3. Molinos	1.0	1.15		0.1	10	5	152	215	0.02	0.022
4. Cuautamatitla	0.	0.01		0.25	8	25	195	172	0.01	0.014
5. Tochimizolco	0.1	0.17		0.25	5	10	140	188	0.01	0.012
6. Tochimilco	0.0	0.096		0.1	5	5	187	178	0.01	0.012
7. Coyula †	0.0	0.01		2.15	5	5	197	251	0.01	0.013
8. Tianguismanalco	0.0	0.01		0.12	5	5	200	192	0.01	0.018
9. Tlapetlahuaya †	0.	0.01		0.01	10	5	225	304	0.15	0.178
10. Huaquechula	1.0	1.1		0.01	10	5	188	273	0.07	0.089
11. Tezonteapan	1.2	1.23		0.01	10	5	184	814	0.10	0.111
12. Champusco †	1.1	1.23		0.1	5	5	421	772	0.06	0.056
13. Ahuehuete †	0.0	0.11		0.017	5	10	603	1019	0.01	0.012
14. Portezuelo †	0.0	0.01		3.19	15	25	730	961	0.22	0.236
15. Huilango	0.1	0.15		0.3	5	5	180	206	0.01	0.012
16. Teguixpango	0.6	0.75		0.1	5	5	312	307	0.04	0.059
NOM-127-SSA1-1994	0.05		0.5		20		1000		0.2	
NOM-001-ECOL-1996	--		--		--		--		--	

§ SAAM = sustancias activas al azul de metileno; † unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.

En negritas las cantidades que rebasan la NOM-127-SSA1-1994. Subrayadas las cantidades que rebasan la NOM-001-ECOL-1996. -- parámetro no incluido en la norma. † Sólo para riego. Sin † para uso potable y para riego. V = verano; P = primavera.

coliformes no presentaron diferencia estadística entre ambas estaciones. En el caso del Cl, sus concentraciones estuvieron por debajo de los límites

señalados por la Norma 127-SSA1-1994 (0.01 mg L⁻¹ contra 0.2 a 1.5 mg L⁻¹ que establece la norma), en todas las muestras y en ambas estaciones del año. En

Cuadro 2c. Concentraciones de los contaminantes que excedieron las normas oficiales, determinados en el agua muestreada, en cada sitio estudiado.

Sitio	N amoniacal		Cd		Cr		Fe		Pb	
	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P
----- mg L ⁻¹ -----										
1. Caleras	0.1		0.	0.	0.09	0.04	0.13	0.0	0.0	0.0
2. Acapulco	0.5		0.	0.	0.02	0.05	0.09	0.0	0.0	0.0
3. Molinos	0.5		0.	0.	0.02	0.03	0.14	0.0	0.0	0.0
4. Cuautamatitla	0.4		0.	0.	0.01	0.02	0.09	0.0	0.0	0.0
5. Tochimizolco	0.7		0.	0.	0.02	0.01	0.05	0.01	0.0	0.0
6. Tochimilco	0.2		0.	0.	0.01	0.01	0.07	0.01	0.0	0.0
7. Coyula †	0.5		0.	0.	0.01	0.01	0.08	0.0	0.0	0.0
8. Tianguismanalco	0.1		0.	0.	0.01	0.01	0.14	0.0	0.0	0.0
9. Tlapetlahuaya †	0.5		0.	0.	0.01	0.01	0.12	0.01	0.0	0.0
10. Huaquechula	1.1		0.	0.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0	0.0
11. Tezonteapan	0.1		0.	0.	0.01	0.01	0.26	0.0	0.0	0.0
12. Champusco †	1.3		0.	0.	0.01	0.01	0.05	0.03	0.0	0.0
13. Ahuehuate †	0.6		0.	0.	0.01	0.01	0.11	0.02	0.0	0.0
14. Portezuelo †	3.1		0.	0.	0.01	0.02	0.35	0.2	0.08	0.0
15. Huilango	0.2		0.	0.	0.03	0.01	0.05	0.01	0.0	0.09
16. Tehuixpango	0.6	1	0.	0.	0.01	0.01	0.27	0.0	0.0	0.0
NOM-127-SSA1-1994	0.5		0.005		0.05		0.3		0.025	
NOM-001-ECOL-1996	--		0.02		1.0		--		0.4	

En negritas las cantidades que rebasan la NOM-127-SSA1-1994. Subrayadas las cantidades que rebasan la NOM-001-ECOL-1996 -- parámetro no incluido en la norma. † Sólo para riego. Sin † para uso potable y para riego. V = verano; P = primavera.

el caso de 11 sitios muestreados, en los cuales el agua se usa como potable, sería importante que el Cl cumpliera con los límites registrados en esa norma.

Comparación con las Normas Oficiales Mexicanas

El agua con concentraciones que no rebasan los límites de la NOM-001-ECOL-1996 está permitida para riego agrícola. Los resultados de este estudio señalan que las concentraciones de coliformes fecales son las únicas que rebasan los límites de dicha norma. El agua proveniente de las muestras estudiadas sirve para riego agrícola. Sin embargo, en la región de estudio se producen flores, forrajes y básicos, así como hortalizas para consumo humano. Mediante el consumo de estos últimos productos, los coliformes pasan al tracto intestinal humano.

Las magnitudes de contaminantes, que no rebasan los límites especificados por la Norma 127-SSA1, indican que el agua puede usarse como potable. Sin embargo, en la práctica los habitantes de la región llegan a ingerir agua de los cauces y pozos, tomando en cuenta sus características incoloras, inodoras y libres de materia orgánica, aunque los análisis de laboratorio encuentran concentraciones de

contaminantes mayores que las permitidas por las normas.

Bonilla *et al.* (1995), Romero *et al.* (1995) y Tamariz (1996) basaron sus estudios en normas derogadas actualmente, pero usando los mismos métodos de extracción y cuantificación de contaminantes. Los resultados de sus trabajos y de éste son susceptibles de comparación, aun cuando dichos autores se limitaron a determinaciones de aguas residuales del río Nexapa. Bonilla *et al.* (1995) y Romero *et al.* (1995) encontraron mayores concentraciones de Cu y Cd que en este estudio -que rebasan la normatividad- aunque, en los casos de las concentraciones de Cr, Pb y Ni, fueron similares. Tamariz (1996) encontró mayores concentraciones de Cu, Cr, Pb, Cd y Ni que las reportadas aquí, las cuales también rebasan la normatividad.

La CNA (1992; 1995; 1997a,b; 1999) fundamentó sus determinaciones en la NOM-ECOL-001-1996, circunscribiéndose a una parte de la zona del presente estudio, y a la extracción y cuantificación de variables, como demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos, los cuales manifiestan de inmediato la calidad del agua (Vogel y Rivas, 1997). La CNA (1992; 1995; 1997a,b; 1999) registró

Cuadro 3. Concentraciones de los contaminantes del agua muestreada, con diferencias estadísticas significativas en verano y en primavera.

Parámetro y unidad de medición	Mediana [†]		Nivel de significancia
	Verano	Primavera	
DBO (mg L ⁻¹)	3.0 <	28.5	0.007
DQO (mg L ⁻¹)	8.0 <	16.0	0.005
Dureza (mg L ⁻¹)	60.0 <	133.0	0.003
Temperatura (°C)	18.0 <	20.7	0.01
Zn (mg L ⁻¹)	0.004 <	0.021	0.03
Fe (mg L ⁻¹)	0.103 >	0.017	0.0003
N amoniacal (mg L ⁻¹)	0.5 >	0.01	0.002
pH (unidades)	7.8 >	7.4	0.0009
Sólidos sedimentables (mg L ⁻¹)	0.2 >	0.1	0.02
Sólidos suspendidos (mg L ⁻¹)	31.5 >	8.0	0.01
Turbiedad (unidades)	1.2 >	1.0	0.008

[†] Es la medida de tendencia central con la que se realiza la prueba estadística de Mann-Whitney. DBO = demanda bioquímica de oxígeno; DQO = demanda química de oxígeno.

concentraciones menores que las cuantificadas en esta investigación, en cuanto a: conductividad eléctrica, DBO, DQO, N amoniacal, fosfatos y Na; y concentraciones similares de los contaminantes restantes incluidos en la presente investigación.

Tendencias de los Tres Grupos: Substancias Orgánicas, Propiedades Físicoquímicas y Metales Pesados

Las sustancias orgánicas se presentan en mayores cantidades en Caleras, Tianguismanalco y Ahuehueté, debido al incremento de los desechos de la creciente población local y de urbes adyacentes, y a los asentamientos humanos desordenados con sistemas inadecuados para depositar -fecalismo al aire libre- y desechar las excrecencias humanas, que generan contaminación general de los caudales de la región de estudio. Al respecto, la información obtenida reafirma lo registrado por Vogel y Rivas (1997): la contaminación biológica es típica de regiones cuyas condiciones de higiene son deficientes. Hay manantiales que están tan contaminados por sustancias orgánicas como los ríos, debido a filtraciones de agua sucia hacia los mismos, o a la inadecuada ubicación de letrinas y desembocadura de drenajes de las poblaciones de la región, e incluso de otras poblaciones concentradas en urbes aledañas, como la poblana y la tlaxcalteca.

Con respecto a las propiedades físicoquímicas, los parámetros que rebasan la NOM-127-SSA1-1994 son: dureza, nitratos, nitritos, sustancias activas al azul de

metileno, nitrógeno amoniacal y Al (Cuadros 2a, 2b y 2c), principalmente en Champusco, Ahuehueté, Portezuelo y Tehuixpango. En todos ellos, se usa agua residual para el cultivo de flores y hortalizas, que requieren mayores cantidades de agroquímicos que otros cultivos de zonas agrícolas de la región de estudio.

Los valores de Cd y Pb (Cuadro 2c) exceden las normas en todos los sitios muestreados; en mayor cantidad el segundo elemento en Acapulco y Huilango. Los demás metales pesados (Cuadro 2c) tienen un comportamiento diferente en cada sitio muestreado; los resultados muestran que no existe un patrón en el comportamiento de sus concentraciones. Su origen puede atribuirse a actividades industriales que ocurren principalmente en los estados de Puebla y de Tlaxcala.

Fuentes de Agua y de Contaminación

Los contaminantes y sus concentraciones difieren con las fuentes. Los resultados sugieren que los pozos están contaminados, lo que implica que los mantos freáticos, aun siendo profundos, están expuestos a mezclarse con drenajes municipales e industriales, o con alguna fuente de agua contaminada, como lo reportaron Liu y Lipták (2000). El agua de los ríos se mezcla con aguas residuales y recoge grandes cantidades de basura. Los manantiales de la región se contaminan principalmente por el mal manejo que la población y el turismo regional les dan. Los escurrimientos también están contaminados por basura y, al igual que los ríos, por el mal manejo de ganado que llega a abrevar y refrescarse en ellos. Al respecto, Vogel y Rivas (1997) indicaron que la mayor parte del agua actualmente se encuentra contaminada, reafirmando este estudio.

Contaminación de Cuencas

Se observan contaminantes en todos los sitios estudiados. Al centro sur, en los ríos Aguisoc y Nexapa, el agua es más dura (hasta 554 mg L⁻¹); también en el centro, de norte a sur. Se presentan valores altos de nitratos (hasta 12.9 mg L⁻¹), desde el manantial Apiaxco hasta su desembocadura en el río Nexapa; al oeste, en el centro, y al este, de norte a sur, se encontraron nitritos (hasta 1.23 mg L⁻¹), incluso en la parte de escurrimientos de la Cordillera del Tenzo, únicamente no se observaron en concentraciones altas al suroeste, en el río Ahuehueté (0.007 mg L⁻¹). Se

detectaron altos valores de sustancias activas al azul de metileno (1.75 a 3.2 mg L⁻¹) en Ojo del Agua y en el río Nexapa, en su entrada a la región de estudio. Además de la entrada del río Nexapa a la región por el este, el centro sur de la región, a la mitad del río Nexapa, presenta el agua turbia (25 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto, contra 20 de la NOM-127-SSA1-1994) y maloliente en las muestras colectadas; en esta última zona se observan altas concentraciones de sólidos disueltos totales (1019 mg L⁻¹).

Es evidente que a través del río Nexapa, de norte a sur y en el oeste centro, se observaron altas cantidades de N amoniacal (hasta 8.17 mg L⁻¹), debido sobre todo al uso intensivo de la tierra, práctica en la que se usan cantidades considerables de agroquímicos para producir flores. Sólo en un sitio se observaron cantidades de Al mayores que las permitidas (0.236 mg L⁻¹, con pH de 7.7), el cual se encuentra a la entrada del río Nexapa a la región, lo que se explica al determinar sales solubles y metales totales, aun cuando el pH sea alto. El Cr se observó en concentraciones mayores que las permitidas por la Norma (0.051 mg L⁻¹) en un manantial de Apiaxco que viene del norte de la región hacia el centro, y en el del Tenzo (0.096 mg L⁻¹), que escurre de norte a sur y de este a oeste; el Fe en la entrada del río Nexapa a la región (0.352 mg L⁻¹). En todas las muestras colectadas, se observaron mayores concentraciones de Cd y Pb (0.006 y hasta 0.097 mg L⁻¹) que las permitidas por la NOM-127-SSA1-1994, así como de coliformes fecales y totales (hasta 46 000 y 110 000 NMP (número más probable) 100 mg L⁻¹), aun cuando las concentraciones de estos últimos son más bajas al sur de la región, en los ríos Aguisoc (200), Matadero (110) y Ahuehuevo (460), así como en las aguas que contiene la barranca La Leona, al norte centro (30 NMP 100 mg L⁻¹).

CONCLUSIONES

- La región presenta contaminación en todos los sitios estudiados, situación que señala la urgencia de establecer un plan de control de emisión de aguas residuales y de recuperación de la calidad del agua.
- Algunos de los factores adversos son: los patrones de consumo generadores de gran volumen de desechos y a una velocidad más rápida que la capacidad de carga y de resistencia de los ecosistemas; el exceso de contaminantes emitidos por la industria y la falta de acciones municipales para

incrementar la capacidad de regeneración de los ecosistemas circundantes; la falta y la deficiencia de plantas tratadoras de agua; y la escasa distancia entre poblaciones y el poco desnivel que impiden la purificación del agua por medios naturales.

- La problemática del agua no sólo tiene que ver con que esté contaminada, sino también con su escasa disponibilidad, por lo que la población de la región recurre a aguas residuales para regar algunos cultivos.

- Los aspectos medulares de la contaminación del agua, que se encontraron en este estudio son:

a) hay sitios de manantiales que están tan contaminados como los ríos, lo cual manifiesta que aun cuando la capacidad filtrante del sustrato hace su función, probablemente en la superficie del origen del manantial se contamine el agua que fluye;

b) los parámetros fisicoquímicos se encontraron en concentraciones más altas en los sitios muestreados a través del río Nexapa, que en los sitios ajenos a éste;

c) los coliformes fecales y totales, así como algunos metales pesados, se observaron en concentraciones que rebasan la norma, en todos los sitios estudiados;

d) los sitios más contaminados se relacionan con los sitios donde se cultivan flores y hortalizas donde se aplican mayores cantidades de agroquímicos y se riega con agua residual;

e) los contaminantes se observaron en cantidades más altas en los sitios muestreados del centro de la región.

- Si bien, el uso de las aguas residuales en ciertos casos aporta materia orgánica a los cultivos y pudieran incrementarse los rendimientos, en muchos casos se transfieren elementos tóxicos de esos cultivos a los consumidores, como el Pb, el Cr y el Cd.

- Esta investigación se desarrolló como un proyecto integral, ya que se estudiaron varias fuentes de agua y se determinaron la mayoría de los contaminantes indicados en las dos normas oficiales mencionadas.

LITERATURA CITADA

- Bonilla F., N., L. Flores D., G. Romero H., M.A. Valera P. y J. González M. 1995. Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos, planta y agua por efecto de riego con aguas negras en la región de Huaquechula y Atlixco, Puebla. pp. 159. *In*: Memorias del Simposio Universitario de Edafología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Brañes, R. 1994. Manual de Derecho Ambiental Mexicano. Fundación Mexicana para la Educación Ambiental-Fondo de Cultura Económica. México, D.F.
- Calderón-Salinas, V., B. Valdez-Anaya, M.A. Zúñiga-Charles y A. Albores-Medina. 1996. Lead exposure in a population of Mexican children. *Human Exp. Toxicol.* 15: 305-310.

- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1992. Comportamiento de la calidad del agua en la red nacional de monitoreo sobre los ríos Atoyac, Alseseca y Nexapa, en la década 1981-1991. Gerencia Estatal en Puebla. Subgerencia de Administración del Agua. Laboratorio Regional de Calidad del Agua y Monitoreo. Puebla, México.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1995. Informe anual de resultados red nacional de monitoreo cuenca Atoyac-Zahuapan. 1995. Gerencia Estatal en Puebla. Subgerencia de Administración del Agua. Laboratorio Regional de Calidad del Agua y Monitoreo. Puebla, México.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1997a. Resultados analíticos (1995 - 1997) de fuentes de abastecimiento cercanos al Popocatepetl. Gerencia Estatal en Puebla. Subgerencia de Administración del Agua. Laboratorio Regional de Calidad del Agua y Monitoreo. Puebla, México.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1997b. Informe anual de resultados red nacional de monitoreo cuenca Atoyac-Zahuapan. Gerencia Estatal en Puebla. Subgerencia de Administración del Agua. Laboratorio Regional de Calidad del Agua y Monitoreo. Puebla, México.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1999. Vigilancia de la calidad de agua de pozos y manantiales de poblaciones cercanas al volcán Popocatepetl. Gerencia Estatal en Puebla. Subgerencia de Administración del Agua. Laboratorio Regional de Calidad del Agua y Monitoreo. Puebla, México.
- Córdova A., V., M.E. Guzmán G., J.P. Martínez D. y G. Morales P. 1991. La contaminación de productos agrícolas en el CADER Atlixco, Puebla. Colegio de Postgraduados-Centro de Enseñanza, Investigación y Capacitación para el Desarrollo Agrícola Regional. Puebla, México.
- DOF. Diario Oficial de la Federación. 1997a. NOM-127-SSA1-1994. México. 10 de enero de 1997.
- DOF. Diario Oficial de la Federación. 1997b. NOM-001-ECOL-1996. México. 6 de enero de 1997.
- Díaz-Barriga, F., M.A. Santos, J.J. Mejía, L. Batres, L. Yáñez, L. Carrizales, E. Vera, L.M. del Razo y M.E. Cebrián. 1993. Arsenic and cadmium absorption in children living near a smelter complex in San Luis Potosí, México. *Environ. Res.* 62: 242-249.
- Finkelman, J. 1990. Medio ambiente y salud en México. pp. 581-629. *In:* E. Leff (Compilador). Medio ambiente y desarrollo en México. Universidad Nacional Autónoma de México-Porrúa. México, D.F.
- Gómez-Arroyo, S., M. Altamirano y R. Villalobos-Pietrini. 1981. Sister-chromatid exchanges induced by some chromium compounds in human lymphocytes in vitro. *Mutation Res.* 90: 425-431.
- Hartwig, A. 1995. Current aspects in metal genotoxicity. *BioMetals* 8: 3-11.
- Hughes, M.K., N.W. Lepp y D.A. Phipps. 1980. Aerial heavy metal pollution and terrestrial ecosystems. *Adv. Ecol. Res.* 11: 218-227.
- Iqbal, M.Z. y F. Khalid. 1998. Cadmium toxicity to some tree species *In:* City trees. *J. Soc. Municipal Arborists* 34-1. January-February. <http://www.Urban-forestry.com/>
- Jiménez, C. 1993. Factores de exposición ambiental y concentraciones de plomo en sangre en niños de la ciudad de México. *Salud Pública* 35-6. nov-dic, 1993. <http://www.Insp.mx/salud/35/356-95.html>
- Junco-Muñoz, P., R. Toman, J.H. Lee, S.A. Barton, F. Rivas y R.M. Cerda-Flores. 1996. Blood lead concentrations and associated factors in residents of Monterrey, Mexico. *Arch. Med. Res.* 27: 547-551.
- Liu, D.H.F. y B.G. Lipták. 2000. Groundwater and surface water pollution. Lewis. Boca Raton, FL.
- Metcalf and Eddy, Incorporation (1996). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill. México, D.F.
- Mitchell, N. 1998. Cadmium-toxicity of metal and compounds. 11 dic. 1998. http://www.Utoronto.Ca/env/lib_hold/db2/files/7231_TE.Htm
- Oláiz, G., T. Fortoul, R. Rojas, M. Doyer, E. Palazuelos y C.R. Tapia. 1996. Risk factors of high level of lead in blood of schoolchildren in Mexico City. *Arch. Environ. Health* 51: 1-5.
- Romero H., G., N. Bonilla F., L. Flores D., C. Cabrera M., M.J. Hernández G. y G. Silva H. 1995. Estimación de metales pesados en aguas negras de riego y su efecto contaminante en suelos y plantas de lechuga. pp. 38. *In:* Memoria XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Tamaulipas, México.
- Rowe, D.R. 1995. Handbook of wastewater reclamation and reuse. Lewis. Boca Raton, FL.
- SARH-CP. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Colegio de Postgraduados. 1986. Diagnóstico Agropecuario Regional del Centro de Apoyo al Desarrollo Agrícola Regional. Atlixco, Puebla, México.
- Shoental, R. 1975. Chromium carcinogenesis, formation of epoxyaldehydes and tanning. *Br. J. Cancer* 32: 403-404.
- Tamariz F., V. 1996. Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados en el municipio de Atlixco, Puebla. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- US-EPA. United States Environmental Protection Agency. 1974. Methods for chemical analysis of water and wastes. EPA-625/6-74-003. pp. iii - xii, 78-91. Washington, DC.
- Vogel, M.E. y E.R. Rivas R. 1997. Contaminación, contaminantes y ambiente y contaminación del agua. pp. 369-384, 401-414. *In:* E.C. Enkerlin, G. Cano, R.G. Garza y E. Vogel. Ciencia ambiental y desarrollo sostenible. International Thomson Publishing. México, D.F.
- Willis, D.P. 1998. Toxic exposures 29 septiembre 1998. http://www.texastrialawyer.com/chromium_toxicity/index.h

EVALUATION OF MICROBIAL RESPIRATION AND ECOTOXICITY IN CONTAMINATED SOILS REPRESENTATIVE OF THE PETROLEUM-PRODUCING REGION OF SOUTHEASTERN MEXICO

Evaluación de la Respiración Microbiana y Ecotoxicidad en Suelos Contaminados Representativos de la Zona Petrolera del Sureste Mexicano

Randy H. Adams Schroeder¹, Verónica I. Domínguez Rodríguez¹, and Laudiel Vinalay Carrillo¹

SUMMARY

Microbial respiration was measured in eight soil types and four petroleum-drilling cuttings representative of the petroleum-producing region of southeastern Mexico. Relatively high rates (2.84 to 6.23 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) were observed in most soils with histic (organic) or mollic (organic rich) surface horizons (epipedons); moderate rates (2.12 to 3.38 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) in eutric (enriched) sandy soils (Regosols), in alluvial soils under pasture, and in most drilling mud/cuttings; and low rates (0.23 to 1.04 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) were observed in dystric (poor) Regosols, savannah soils, and in alluvial soils with intense agricultural use. Slightly higher respiration rates (1 to 28% higher) were observed in soils with moderate hydrocarbon contamination than in uncontaminated soils of the same type, but lower rates were found in soils with high hydrocarbon contamination (38% lower). Higher respiration rates (> 2.3 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) tended to be associated with higher percent organic carbon (> 0.8%). The following factors appeared to be involved in lowering respiration rates (relative to percent organic carbon): 1) poor aeration due to fine texture (in clayey soils and drilling cuttings); 2) reduced aeration due to moderate - high hydrocarbon contamination in organic soils; and 3) low nutrient levels (in poor sandy soils, savannah soils and alluvial soils with intense agricultural use). Of the soil samples tested, none presented toxicity (EC₅₀ > 45 500 mg kg⁻¹, field weight, Microtox). In drilling cuttings, two of the three samples tested presented moderate toxicity (EC₅₀ = 30 800 mg kg⁻¹ and 43 300 mg kg⁻¹)

but much higher respiration rates (2.3 to 2.8 times higher) than the nontoxic sample. Reasons for these increases were not clear but may be associated with drilling additives. Implications of these findings for bioremediation and natural attenuation in regional ecosystems are discussed.

Index words: Microbial respiration, Tabasco, bioremediation, hydrocarbons, drilling cuttings.

RESUMEN

Se midió la respiración microbiana en ocho tipos de suelo y cuatro recortes de perforación petrolera representativos de la región petrolera del sureste de México. Se observaron tasas relativamente altas (2.84 a 6.23 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) en casi todos los suelos con horizontes superficiales (epipedones) hísticos (orgánicos) o mólicos (ricos en materia orgánica); tasas moderadas (2.12 a 3.38 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) en suelos arenosos (Regosoles eútricos) (enriquecidos), en suelos aluviales con pastura, y en la mayoría de recortes de perforación; y se observaron tasas bajas (0.23 a 1.04 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) en Regosoles dístricos (pobres), en suelo de sabana, y en suelos aluviales con actividad agrícola intensa. Se observaron tasas de respiración ligeramente más altas (de 1 a 28% mayor) en muestras con una contaminación por hidrocarburos moderada al compararlas contra muestras de suelo del mismo tipo; pero en muestras muy contaminadas se observaron tasas más bajas (38% más baja) de respiración. Se presentó una tendencia que donde hay más altas concentraciones de materia orgánica (> 0.8% carbono orgánico), se encuentran tasas de respiración más altas (> 2.3 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹). Aparentemente, los factores que redujeron la respiración (relativa al porcentaje de carbono orgánico) fueron: 1) aireación deficiente debido a la textura fina de suelos arcillosos y recortes de perforación; 2) aireación reducida por

¹ Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Km. 0.5 Carretera Villahermosa-Cárdenas, Villahermosa, Tabasco, México. Tel: (93) 54-43-08, (93) 95-05-60 (drrandocan@hotmail.com)

Recibido: Marzo de 2000. Aceptado: Mayo de 2002.
Publicado en Terra 20: 253-265.

contaminación de moderada a alta en suelos orgánicos y 3) valores bajos de nutrimentos (en suelos arenosos pobres, en sabana, y en suelos aluviales con agricultura intensiva). Ninguna de las muestras de suelo analizadas presentó toxicidad ($EC_{50} > 45\ 500\ \text{mg kg}^{-1}$, peso fresco de campo, Microtox). En recortes de perforación, dos de las tres muestras analizadas presentaron una moderada toxicidad ($EC_{50} = 30\ 800$ y $43\ 300\ \text{mg kg}^{-1}$), pero tasas de respiración mucho más altas (de 2.3 a 2.8 veces mayor) que en la muestra no tóxica. Las causas de estos incrementos no están claras, pero pueden estar asociadas con los aditivos aplicados durante la perforación. Se presenta el significado de estos resultados con respecto a proyectos de biorremediación y atenuación natural en ecosistemas regionales.

Palabras clave: Respiración microbiana, Tabasco, biorremediación, hidrocarburos, recortes de perforación.

INTRODUCTION

The expansion of petroleum activities, including exploration, drilling, extraction and refining, into the tropical areas of our planet in recent decades has provided an economic boost in many regions. Petroleum production in the tropics represents nearly one-fifth of world totals, and two of the top ten petroleum-exporting countries lie in equatorial regions. Mexico is the fifth leading oil-producing nation worldwide and is one of the leading exporters, exporting nearly half of its total production (PEMEX, 1999; World Oil, 2001).

Like any other industry, the petroleum industry produces wastes, which are sometimes improperly disposed. In most developed countries, situated mainly in temperate latitudes, the problems of waste treatment and disposal associated with this industry have largely been overcome or mitigated. In most tropical regions, however, these problems are just beginning to be addressed (Easterbrook, 1996).

In the environment, one of the principal processes responsible for the passive mitigation of petroleum contamination is biodegradation of the petroleum hydrocarbons by naturally occurring microorganisms. These microorganisms, mainly bacteria, are found in almost all hydrocarbon affected soils. They use the hydrocarbons as an alternative food source, mostly for biomass carbon and energy production. This process

involves the breakdown of the hydrocarbons into smaller units and finally the incorporation into cell material (biomass) or breakdown into carbon dioxide, resulting in cellular biochemical energy production. The overall result of this process in nature is: 1) reduction in petroleum hydrocarbon concentration, 2) reductions in the overall toxicity of the area, and 3) reduction in the mobility of the remaining hydrocarbons in the environment (Bartha, 1984; Cole, 1994; Hinchee, *et al.*, 1994; Wise and Trantolo, 1994).

This process is used industrially to treat petroleum waste and restore contaminated areas. Known as bioremediation, it manages the growing conditions of the bacteria in waste treatment processes to maximize biodegradation. It involves, mainly, the addition of inorganic nutrients and the control of environmental factors such as aeration, pH, moisture, and sometimes temperature (King, *et al.*, 1992; Cook, 1995).

An important element in the treatment or mitigation of petroleum-contaminated sites is the rate of microbial activity and hydrocarbon decomposition or detoxification. One indicator of microbial activity is respiration, especially in aerobic systems such as are generated in most bioremediation designs (King, *et al.*, 1992; Cole, 1994; Adams, *et al.*, 1995, 1999; Cook, 1995). This depends on many environmental factors in the soil environment and may vary greatly between different soil ecosystems. In temperate regions, a great deal of research into this area has been made (Bauzon, *et al.*, 1968; Hershman and Temple, 1979; Frankenburger and Dick, 1983; El-Din Sharabi and Bartha, 1993; Blaszkiewicz, *et al.*, 1997; Drake, *et al.*, 1997; Lawlor, *et al.*, 1997; Venosa and Haines, 1997), but such research in tropical regions is just beginning (see Adams, *et al.*, 1999). The purpose of this study is to investigate respiration as an indicator of microbial activity, specifically that potentially obtainable in bioremediation projects (aerobic conditions) in typical soil ecosystems in the petroleum-producing region of tropical Mexico, and to evaluate factors which may be important for bioremediation projects, thus facilitating technological development in this region and in similar tropical regions of our planet.

Preliminary results of these investigations have been presented previously (Adams, *et al.*, 1995). This report includes a more intensive and comprehensive study, using the preliminary research as a base.

DESCRIPTION OF STUDY AREA

The study area is located between 92°45' and 94°W and 17°45' and 18°45' N in the coastal region of western Tabasco State and northern Chiapas State (Figure 1). It has a predominantly tropical lowland monsoon climate, type Am in the Koeppen classification system, with average annual precipitation ranging from slightly more than 1500 mm to 2500 mm and an average annual temperature of approximately 26 °C. It has three seasonal periods: 1) a relatively dry, hot season (mean temperatures of 28 - 30 °C, precipitation of about 50 mm month⁻¹), 2) a warm to hot rainy season (mean temperatures of about 27 °C, precipitation of 250 to 400 mm month⁻¹), and 3) a season of "Nortes" (Northerns), or cold fronts (mean temperature of 24 °C, precipitation of 80 - 150 mm month⁻¹), (West, *et al.*, 1985).

The study area consists of a recent coastal plain and a broad deltaic region bordered by Pleistocene alluvial terraces (Figure 2). The northern part of the study area consists of a recent coastal plain made up of a coastal sandy fringe and older beach dunes farther inland running roughly parallel to the coast. Slightly inland (to the south) lies a transition zone between the recent coastal plain and a recent alluvial plain. This transition area is characterized by coastal lagoons and mangrove jungle. Soil types in this area are characteristically organic or have organic surface horizons. Farther inland, the recent alluvial plain

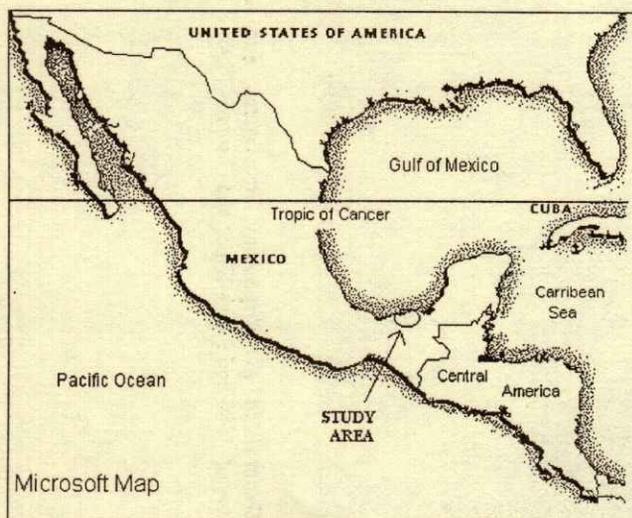


Figure 1. Location of study area.

Modified from: MS Encarta, Virtual Globe, 1998. Microsoft Corp. Redmond, WA.

begins which consists of rich alluvial soils and marshy or swampy backwaters and lakes between a series of active and inactive river channels. The higher parts of this plain support intensive agriculture and ranching, while in the flooded or floodable areas, wooded swamp jungles and marshes predominate, many of which are located over organic or organic enriched soils. The Pleistocene alluvial terraces bordering the recent alluvial plain consist of higher, hilly areas with very weathered reddish, acidic, clayey soils (West, *et al.*, 1985; Palma-López and Cisneros, 1996).

Petroleum is extracted in all parts of the study area but its extraction is more intense in marshy and hilly areas. Frequent contamination sources are 1) corroded or ruptured pipelines, 2) inverse (oil base) drilling mud, and 3) discharges from refineries, basic petrochemical (gas) plants, and separation batteries (see Adams, *et al.*, 1999, for a more extensive description of oil pollution sources, extent, etc.).

METHODOLOGY

Sampling

Sampling was conducted to obtain soils representative of the southeastern petroleum-producing region, especially with respect to geomorphology, ecosystems, hydrocarbon contamination and land use. A sampling plan was developed based on preliminary site visits and studies conducted in soil science, geomorphology and soil contamination of the region (Palma, *et al.*, 1985; Adams, *et al.*, 1995; Palma-López and Cisneros, 1996). A total of 19 samples were collected from nine different sites in the following ecosystems and agroecosystems: savannah, coastal sandy fringe (coconut plantation), coastal sandy fringe (pasture), alluvial soils (pasture, sugar cane, cacao plantation), marsh (papyrus/popay/cattail), marsh/seasonal pasture, mangrove swamp, and marsh (cattail). These samples correspond to soils tentatively identified as: Chromic Luvisol, Dystric Regosol, Eutric Regosol, Eutric Fluvisol, Gleysol (histic epipedon), Vertisol (mollic epipedon), Histosol (saline, hemic material), and Histosol (fibric material), according to the classification system proposed by Palma *et al.*, 1985. [Later classification systems (Palma-López and Cisneros, 1996) do not differentiate between Dystric and Eutric Regosols, which was considered important to this study.] Samples were also collected from

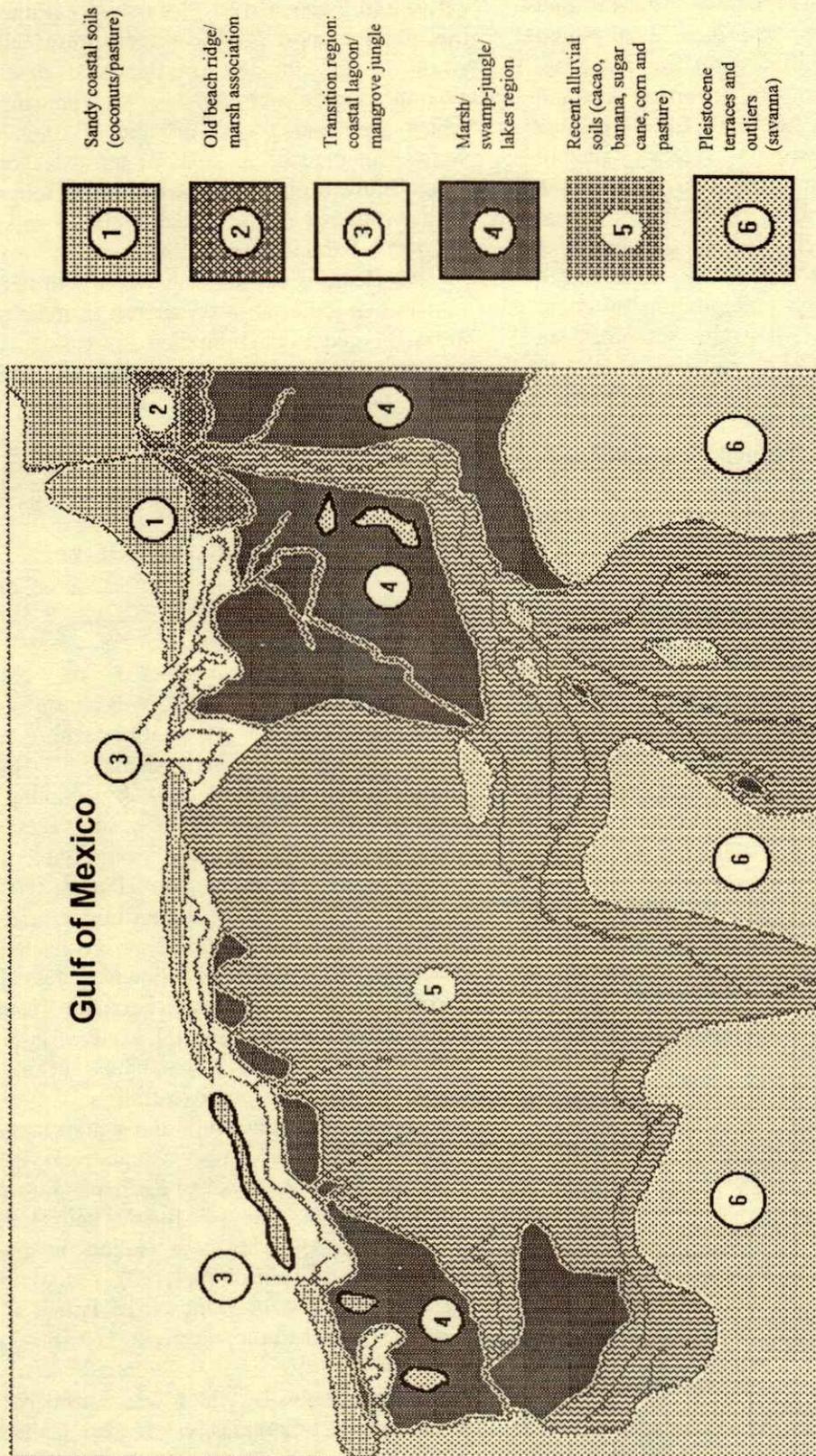


Figure 2. Generalized geomorphology, ecosystems and agroecosystems of the study area
 From: West *et al.*, 1985 and Palma-López and Cisneros, 1996.

petroleum waste pits containing spent drilling mud and contaminated cuttings. During sampling, data were recorded regarding ecosystem type, soil use, soil color, texture, organic material, and petroleum contamination. Surface samples were taken to a depth of 20 to 30 cm, using a posthole digger and shovel. Soils were mixed well and kept at ambient conditions until testing for microbial respiration (usually within 24 h). Some soils required draining for two to four days prior to testing, to reduce soil moisture to approximately 75% of soil water holding capacity.

Testing for Chemical and Physical Soil Characteristics

Soils were tested for pH, electric conductivity, and organic carbon concentration. Additionally, soils were color characterized using a Munsell soil color chart.

pH testing. pH was tested using a 1:1 ratio by weight with distilled water and the pH measured using a pH meter and electrode calibrated with pH 4.0, 7.0, and 10.0 standards.

Electric conductivity. Moist soil samples were diluted 1:10 with distilled water, mixed well, and filtered with Whatman # 4 filter paper. The filtered liquid was tested using a conductivity meter, a conductivity electrode and standards.

Organic carbon content. Organic carbon content was determined using a modified Walkley-Black (1934) method. Ten grams of dry soil were placed in 600 mL breaker to which 10 mL of 1N $K_2Cr_2O_7$ and 20 mL of 96% H_2PO_4 was added. Subsequently, 200 mL of distilled water and three drops of diphenylamine indicator, and 2 to 3 mL of 0.95 N H_3PO_4 was added. This mixture was titrated with a 0.95 N solution of Fe_2SO_4 . Two blanks, consisting of 10 mL 1N $K_2Cr_2O_7$, 20 mL of 96% H_2PO_4 , and 200 mL of distilled water were included in each set of analyses.

Microbial Respiration Activity Measurement

A modified Stotzky (1965) method was used for this determination. Approximately 250 g of moist soil (or drilling mud), air dried to about 50-75% field capacity was added to glass jars (750 mL) with butyl rubber seals. An alkaline trap consisting of a 100 mL beaker containing 15 mL of 2 N KOH was placed in each jar, on top of the soil. The jars were sealed and

incubated at 28 °C for 18 h. Subsequently, 10 mL of the solution in the trap was added to 25 mL of 2 N $BaCl_2$ and three drops of phenolphthalein indicator (1% solution in 96% ethanol). This mixture was titrated with 0.5 N HCl to neutrality. Values were calculated by difference from blank jars incubated with clean gravel instead of soil. Samples, indicating the presence of carbonates (effervescence upon addition of 10% H_2SO_4), were prepared as above and with autoclaved replicates; biological carbon dioxide production was determined by difference. In soils with extremely low carbon dioxide production, the incubation period was extended for three to seven days.

Toxicity Testing

Preliminary tests were conducted on some samples for acute toxicity of leachates using the Microtox Basic Test Procedure. This test uses bioluminescent (light producing) marine bacteria as the test organism. Dilutions of a sample are exposed to a standardized bacterial culture and reduction in the light output is measured with equipment similar to a spectrophotometer. A dose/response curve is generated and the concentration of sample, which reduces the bioluminescence 50%, is calculated (effective concentration 50, or EC_{50}). Moist samples were diluted 1:10 with distilled water, mixed well and allowed to settle overnight. The following day, a small amount of the surface liquid was tested according to the manufacture's instructions. Very turbid samples of leachate were filtered with a Whatman # 4 filter prior to testing (Microbics Corporation, 1995).

RESULTS AND DISCUSSION

Environmental Conditions and Field Observations

Sample location and field observations are shown in Table 1. As can be seen in the table, a variety of soil types and drilling cuttings were sampled, representative of the majority of soil types likely to be impacted by petroleum activities in the study area. Samples were collected to evaluate differences due to natural aeration, fertility, agricultural use, and oil contamination. These samples included:

- soils with predominantly sandy (Samples 3, 4, and 6), clayey (Samples 1, 14, and 15), or organic (Samples 12, 13, 16, 17, 18, and 19) surface horizons;

Table 1. Sample locations and field observations.

Sample	Location	Environmental conditions	Texture and organic material	Color ¹	Tentative classification
1	Cactus Oil Field, No. 61A Reforma, Chiapas	sparse pasture, savannah	clay accumulation with depth, slightly organic enriched near surface	7.5YR 5/8 deep brown	Chromic Luvisol
2M ^t		drilling mud waste pit	very clayey, strong hydrocarbon odor	2.5 YR 4/4 olive brown	oil base drilling muds and cuttings
3	Puerto Ceiba Oil Field, No. 101	coconut plantation	very sandy, slight accumulation of coconut fibers	2.5Y 3/3 dark olive brown	Dystric Regosol
4	Paraiso, Tabasco	low-lying area, very weedy, near burn pit	very sandy, hydrocarbon contaminated	10YR 2/2 and 2.5Y 3/3 dark olive brown (mixture)	Dystric Regosol, contaminated
5M		drilling mud waste pit	very clayey, strong hydrocarbon odor	10YR 3/3 dark brown	oil base drilling muds and cuttings
6	Luna Oil Field, No. 22 Frontera, Tab.	dense pasture	very sandy, many fine organic particles	10YR 3/6 dark yellowish brown	Eutric Regosol
7M		drilling mud waste pit	very clayey, strong hydrocarbon odor	10YR 4/2 dark greyish brown	oil base drilling muds and cuttings
8	Samaria Oil Field, No. 129 Cunduacán, Tabasco	dense pasture, near Samaria River	fine to medium texture, accumulation of clay and organic material	10YR 3/2 very dark greyish brown	Eutric Fluvisol
9M		drilling mud waste pit	very clayey, strong hydrocarbon odor	2.5Y 4/4 olive brown	oil base drilling muds and cuttings
10	Rancho Chonita Comalcalco, Tabasco	sugar cane plantation, near Seco River	fine to medium texture, slightly compacted, small amount of charred organic material	10YR 4/3 dark brown	Eutric Fluvisol
11		cacao plantation, near Seco River	fine to medium texture	10YR 4/6 dark yellowish brown	Eutric Fluvisol
12	V. Benito Juárez, 7 km N. of Federal Highway No. 180, Tabasco	cattail marsh	rooty organic material, below 15 to 20 cm clayey with gleying (yellowish) mottles	10YR 4/4 dark yellowish brown (mixture)	Gleysol, histic epipedon
13	Sánchez Magallanes Oil Field, No. 159, Benito Juárez, Tab.	perturbed marsh	rooty organic material, below 30 cm clayey with black spots and hydrocarbon odor	10Y 2/2 very dark brown	Gleysol, histic epipedon contaminated
14	Mecoacán Oil Field, No. 79 Mecoacán, Tabasco	seasonally flooded area	fine texture, dark color, below 30 cm, lighter very clayey, gilgai microrelief (dry)	5Y 3/1 very dark gray	Vertisol, mollic epipedon
15		floodable area, slightly contaminated	fine texture, dark color, below 30 cm lighter, very clayey, slight hydrocarbon odor	5YR 2.5/1 black	Vertisol, mollic epipedon, slightly contaminated

Table 1. Sample locations and field observations (continued).

16	Mecoacán Oil Field, No. 14 Mecoacán, Tabasco	black mangrove	fine to medium partially decomposed organic material	5YR 2.5/1 black	Histosol, hemic material
17	Mecoacán Oil Field, No. 51 Mecoacán, Tabasco	black mangrove, in "kill zone"	fine to medium partially decomposed organic material black spots, hydrocarbon odor	5YR .5/1 black	Histosol, hemic material, hydrocarbon contaminated
18	Mecoacán Oil Field, No. 48 Mecoacán, Tabasco	cattail marsh	rooty organic material, (depth > 1 m)	10 YR 3/1 very dark gray	Histosol, fibric material
19	Mecoacán Oil Field, No. 47 Mecoacán, Tabasco	stunted cattail marsh, contaminated	rooty organic material, (depth > 1 m), black spots and strong hydrocarbon odor	7.5 YR 2/0 black	Histosol, fibric material, contaminated

[†] According to the Munsell color coding system. [‡] M denotes drilling Mud/cuttings sample.

- soils in predominantly undisturbed conditions (Samples 12, 16, and 18), as well as soils from pasture (Samples 1, 6, 8, 14, and 15) and agricultural areas (Samples 3, 10, and 11);

- rich alluvial soils (Samples 8, 10, and 11) with both intense agricultural and low intensity pasture use;

- samples of the same soil type but with and without petroleum contamination in both sandy (Samples 3 and 4), clayey (Samples 14 and 15), and organic (Samples 12 and 13, 16 and 17, 18 and 19) surface horizons;

- samples of drilling mud/cuttings from various sites (Samples 2M, 5M, 7M, and 9M)

Chemical and Physical Characteristics

The physical and chemical properties of the samples collected are presented in Table 2. As shown in the table, the samples displayed a variety of pH values from < 4.0 in acidic savannah soils, from 4.0 to 6.0 in marshy areas to near neutral in pasture and agricultural soils. The electric conductivity was also variable, being very high in mangrove soils (approx. 6 to 26 dS m⁻¹), marginally high in some drilling cuttings and marshy areas (2.7 to 4.6 dS m⁻¹), but relatively low (< 0.1 to 1.2 dS m⁻¹) in most samples.

Organic carbon percentage was also variable, ranging from approx. 0.6% in savannah soils and coastal sandy soils, slightly higher in alluvial soils (0.8 to 1.0%), and high to very high in soils with mollic or histic epipedons (> 1.0 to 21.2%), being highest in organic mangrove soils and fibric marsh

soils. With respect to determination of organic carbon in the organic soils, it is possible that the amount of reagents were not sufficient for complete digestion of the high levels of organic material. The samples from mangrove (Sample 16) and cattail marsh (Sample 18) appeared to be almost completely organic material, and should have presented much higher organic carbon concentrations. In future studies, combustion methods (Kalra and Maynard, 1991; Tabatabai, 1996), would be more appropriate for these organic soils.

Microbial Respiration

The results of microbial activity in the different samples are shown in Figure 3. Pairs of samples are shown comparing respiration rates in uncontaminated and contaminated samples (or drilling cuttings) from the same location. These results are based on a limited number of samples from a variable medium (soil), and are not amenable to statistical analysis; however, some trends can be observed. In almost all the uncontaminated/contaminated pairs investigated, respiration rate was higher in the contaminated sample. This is probably due to increased organic carbon nutrients from the petroleum hydrocarbons present in the samples. The exception to this trend is in sample number 18/19 pair, in which the respiration rate was 38% lower in the contaminated soil. This may be due to reduced aeration caused by the very high hydrocarbon concentrations in Sample 19 (this sample did not present toxicity). The area where this sample was collected had stunted vegetation, an

Table 2. Chemical properties in soils and drilling cuttings.

Sample	Tentative classification and ecosystem	pH	EC [†]		Organic C
			dS m ⁻¹		%
1	Chromic Luvisol, savannah	3.95	0.151	0.59	
2M	Drilling cutting	7.11	0.713	3.15	
3	Dystric Regosol, coconut plantation (coastal)	7.19	0.068	0.80	
4	Dystric Regosol, contaminated	6.74	0.067	0.60	
5M	Drilling cutting	6.17	4.61	5.21	
6	Eutric Regosol, pasture (coastal)	5.82	0.113	0.61	
7M	Drilling cutting	7.25	1.18	2.32	
8	Eutric Fluvisol, pasture	6.68	0.174	0.84	
9M	Drilling cutting	7.47	0.216	3.05	
10	Eutric Fluvisol, sugar cane	6.90	0.058	0.80	
11	Eutric Fluvisol, cacao plantation	6.40	0.060	0.98	
12	Mollic Gleysol, marsh (papyrus, popay, cattail) histic epipedon	4.54	0.226	1.16	
13	Mollic Gleysol, contaminated marsh histic epipedon	4.69	0.612	4.41	
14	Mollic Vertisol, marsh/seasonal pasture	5.71	0.806	4.21	
15	Mollic Vertisol, contaminated marsh/pasture	5.14	0.750	ND [‡]	
16	Histosol (saline), mangrove hemic epipedon	5.35	25.9	11.85	
17	Histosol (saline), contaminated mangrove hemic epipedon	5.57	6.51	ND	
18	Histosol, cattail marsh fibric epipedon	4.56	2.68	21.2	
19	Histosol, contaminated cattail marsh fibric epipedon	5.01	0.80	ND	

[†] EC = electrical conductivity. [‡] ND = not determined.

altered floristic composition, and appeared to be the most contaminated of the samples collected (organoleptic observations). Drilling cuttings also showed moderate to high respiration rates in most samples, except in Sample 2. (Possible reasons for these differences are discussed in the section on toxicity.)

Interestingly, the samples in Fluvisols with intense agricultural use (Samples 10 and 11) showed reduced respiration rates in comparison with Fluvisols with pasture, probably due to soil degradation from intense use and inadequate or inappropriate management.

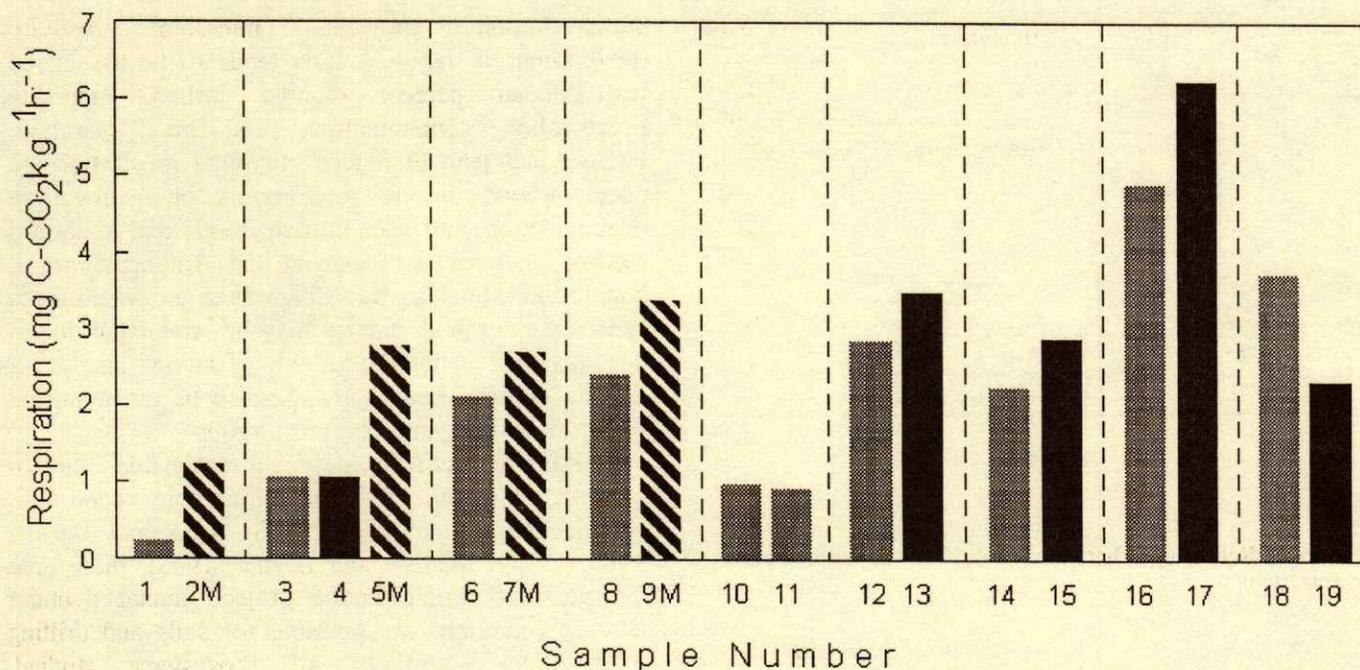
Other soils with low respiration rates included the sandy Dystric Regosol, and the savannah soil (Chromic Luvisol), both typically low in nutrients.

A relation between respiration rates and organic carbon concentration is shown in Figure 4. In this figure, a general trend is observed toward increased respiration rates with increased organic carbon concentrations up to a point, beyond which the rate of increase in respiration with respect to percent organic carbon is reduced, in samples with relatively high concentrations of organic carbon (for example, in Sample 13, which had a histic epipedon, and in Samples 16 and 18, both from organic soils). Very clayey samples (from the Vertisol and drilling cuttings) are exceptions to this trend, having reduced respiration rates, probably due to reduced aeration in the samples.

Further interpretation of these results is shown in Figure 5, which compares ratios of microbial respiration/% organic carbon (R/C) in different soil types. As shown, sandy Regosols, Fluvisols and soils with histic epipedons tend to have high R/C ratios. Excluding samples with intense agricultural use, the average R/C ratio in these samples was 73% higher than the general average (2.1 vs. 1.2). It is probable that the high ratios in Regosols are due to very good aeration, whereas in Fluvisols and soils with organic epipedons it is likely due to a combination of moderately good aeration and high available nutrient concentrations. Notable exceptions to this trend are Samples 10 and 11, Fluvisols with intense agricultural use, and Sample 13, a contaminated soil with a histic epipedon. With respect to the agricultural Fluvisols, reduced R/C values are likely due principally to degraded soil conditions: although not showing reduced organic carbon concentrations, they may suffer from compaction and/or inorganic nutrient depletion.

It is interesting to note that although moderately contaminated soils with histic epipedons tend to have higher respiration rates than their uncontaminated counterparts, they may have lower R/C ratios (compare Samples 12 and 13, which show a difference of 68%). This may be due to reduced aeration in such soils that frequently have such problems, or alternatively, to low concentrations of inorganic nutrients in relation to the increased carbon from the petroleum hydrocarbons.

Low ratios were also observed in some very clayey soils, such as the Vertisol, the low nutrient, clayey savannah sample, and some drilling



Uncontaminated soil	Contaminated soil	Drilling cuttings
1 Chromic luvisol	8 Eutric fluvisol	14 Mollic vertisol
2M Drilling cutting	9M Drilling cutting	15 Mollic vertisol, slightly contaminated
3 Distric regosol	10 Eutric fluvisol (sugar cane)	16 Histosol (hemic, saline)
4 Distric regosol, contaminated	11 Eutric fluvisol (cacao)	17 Histosol (hemic, saline), contaminated
5M Drilling cutting	12 Mollic gleysol (histic epipedon)	18 Histosol (fibric)
6 Eutric regosol	13 M. gleysol (histic), contaminated	19 Histosol (fibric), very contaminated
7 Drilling cutting		

Figure 3. Microbial respiration in different soil types and drilling cuttings from southeastern Mexico.

mud/cuttings samples (2M, 5M), probably due to low aeration. Other drilling mud/cuttings samples (7M, 9M) showed slightly higher ratios. The reason for this is not certain, but may be the result of slightly better aeration and/or increased nitrogen content [if amide compounds were added to this drilling mud, as is frequently done to reduce moisture losses while drilling through saline subsurface strata (Salazar and Garcilazo, 1996)].

Samples with relatively high percentages of organic carbon were not in a comparison range with other samples and low R/C values were observed. It is probable that the ratio of carbon to other nutrients was much lower in these samples due to the principally undecomposed nature of the organic carbon in them,

and although respiration rates in themselves were high, R/C ratios were low. It is interesting to note that the sample from the mangrove area (Sample 16), which had a high ion concentration ($EC = 25.9 \text{ dS m}^{-1}$) and probably had relatively high concentrations of some inorganic nutrients, showed an R/C ratio of more than double that of the other sample with high organic carbon (Sample 18) which was collected from a cattail marsh.

Toxicity

Preliminary tests for toxicity were realized in soils from savannah, coastal sandy soils, alluvial soils, cattail marsh, mangrove, as well as several samples

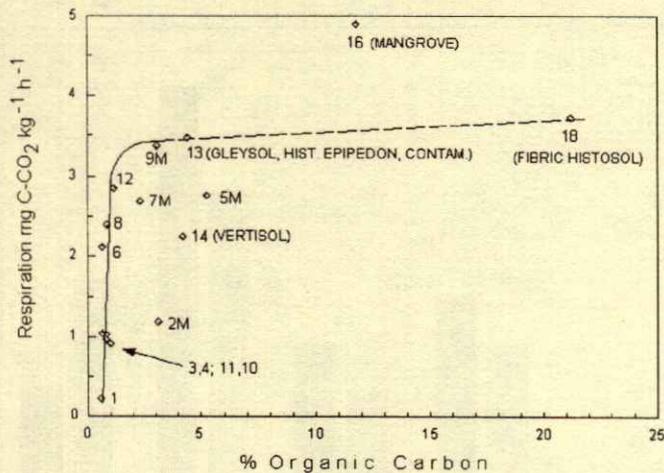


Figure 4. Relationship between organic carbon and microbial respiration.

from drilling mud/cuttings. All soil samples tested (Samples 1, 3, 4, 8, 16, 17, 18, 19) were below detection limits ($EC_{50} > 45\ 500\ \text{mg kg}^{-1}$, field weight), although some of the drilling cutting samples did show some toxicity. Of these samples, 2M did not present toxicity but samples 5M and 9M had moderate toxicity ($EC_{50} = 30\ 800\ \text{mg kg}^{-1}$ and $43\ 300\ \text{mg kg}^{-1}$, respectively). (Sample 7M was not tested.) It is interesting to note that those drilling cutting samples with measurable toxicity showed much higher respiration rates (more than double) than the sample without measurable toxicity. It is possible that these samples had increased amounts of nitrogen rich additives (from the drilling mud) that stimulated the utilization of hydrocarbons in the cuttings and increased microbial respiration. Apparently, the higher toxicity did not seriously affect respiration rates, although it is possible that without the added toxicity these values would have been even higher. The respiration rate in the least toxic of these samples (9M) was 22% higher and the R/C ratio was more than twice as high as the most toxic sample (5M) in these preliminary tests.

CONCLUSIONS

Respiration rates were observed in regional soils that are comparable with those observed by other investigators in temperate conditions (Frankenburger and Dick, 1983; El-Din Sharabi and Bartha, 1993). Under aerobic conditions, like those produced in

bioremediation projects, microbial activity (respiration) in regional soils tends to be associated with higher percent organic carbon, moderate hydrocarbon contamination, and good aeration. Factors that tend to reduce microbial respiration are poor aeration due to fine texture or hydrocarbon contamination, and poor nutrient levels due to natural factors or poor management. In drilling cuttings, respiration rates may be as high as in uncontaminated soils and microbial activity may be stimulated due to nitrogen rich drilling additives. Toxicity in soil or drilling cuttings does not appear to be an important factor in reducing microbial respiration.

Assuming that respiration is a reasonable indicator of microbial activity under aerobic conditions (Frankenburger and Dick, 1983; Atlas and Bartha, 1987; El-Din Sharabi and Bartha, 1993), these data indicate that bioremediation projects managed under aerobic conditions are possible for soils and drilling mud from essentially all ecosystems studied. However, bioremediation should be more difficult in soils with fine textures, such as Vertisols (floodable pasture), drilling mud/cuttings, and possibly some Gleysols with very high clay concentrations (marsh), due to difficulties in aeration. For bioremediation projects in these ecosystems and agroecosystems (and for drilling wastes) incorporating soil conditioners, which increase aeration such as sand, agricultural waste (cacao husks, banana waste, etc.) or other vegetable materials could be very beneficial (Adams and Rodríguez, 1997). Also, increased nutrient amendment will probably increase microbial activity in the bioremediation nutrient-poor soils such as some sandy coastal soils, savannah soils, poorly managed agricultural alluvial soils, and possibly some drilling cuttings. Despite these complications, generally high temperatures and humidity ($26\ ^\circ\text{C}$, 1500 to $2500\ \text{mm yr}^{-1}$) should favor biodegradation rates and reduce treatment times (West *et al.*, 1985; King *et al.*, 1992; Adams *et al.*, 1999).

From these data generally good conditions would be expected for passive bioremediation (or natural attenuation) in aerobic conditions, such as those typically found in Eutric Regosols and many Fluvisols, but may encounter reduced biodegradation rates in soils with low nutrient levels, such as in savannah soils, some sandy coastal soils, and in poorly managed agricultural soils. Problems with aeration and reduced natural biodegradation in fine-textured soils (Vertisols, Gleysols, and some Fluvisols) and in areas with drainage problems

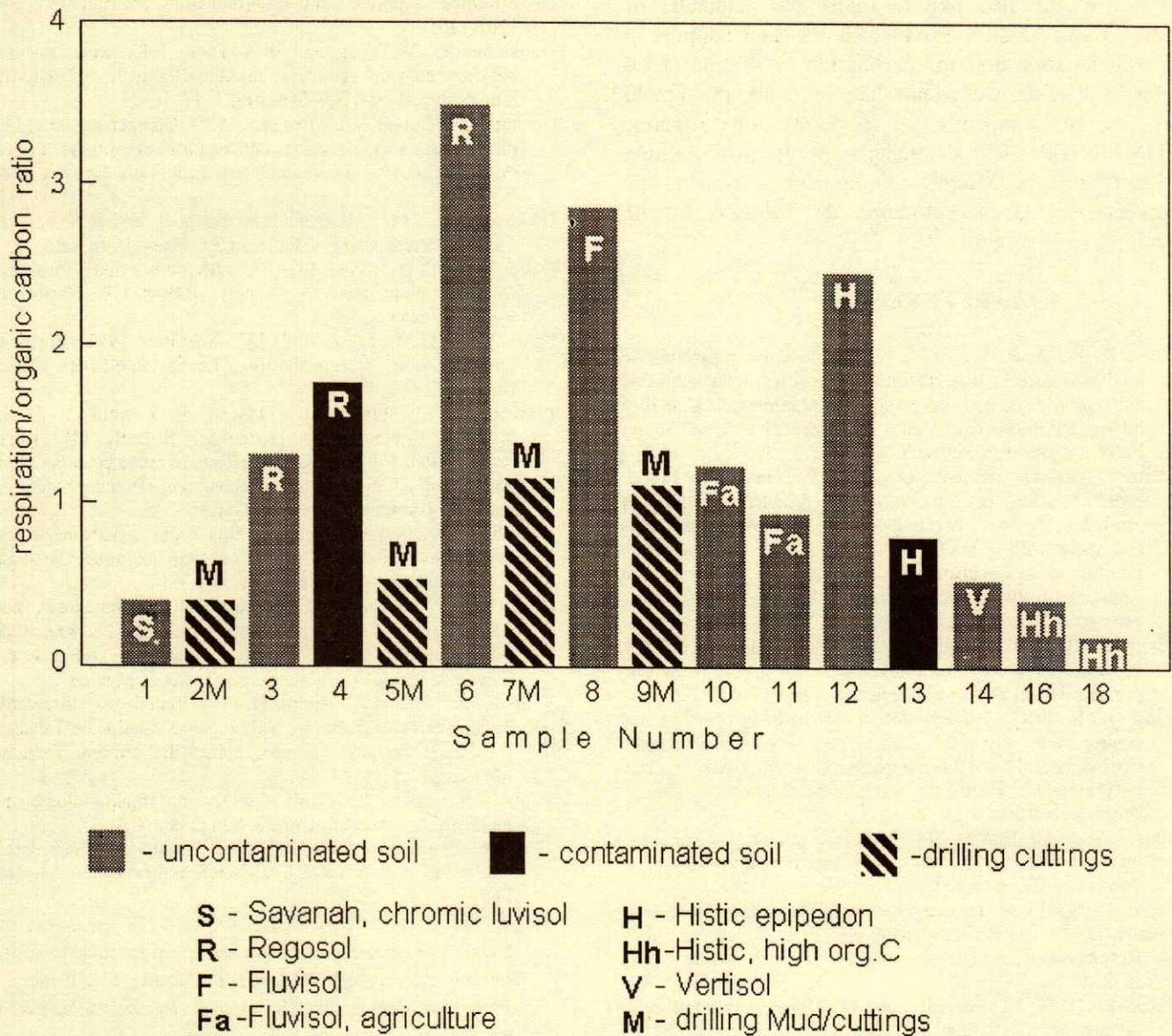


Figure 5. Respiration/organic carbon ratio in different soil types and drilling cuttings from Southeastern Mexico.

(marsh, mangrove, seasonally flooded areas) could also be expected. Very heavy contamination may lead to reduced biodegradation rates, due more to reduced aeration than to toxicity. However, as with induced bioremediation, high temperature and humidity will also improve natural biodegradation rates and promote passive restoration (Atlas and Bartha, 1987; Brock *et al.*, 1994).

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank Roberto López Ramírez for his help in sample collection and analysis, Leonardo García Hernández and José Luis Hernández Coronel for their help in locating petroleum installations and for general orientation in the field.

We would also like to thank the personnel of Pemex Exploración y Producción for their support in oil well location and for permission to sample in oil fields. Likewise, we would like to thank the Fondo para el Mejoramiento de la Educación Superior (FOMES-SEP) for financial support in obtaining reagents and the Microtox equipment as well as the Universidad Juárez Autónoma de Tabasco for its administrative support.

REFERENCES

- Adams R. and A. Rodríguez. 1997. Evaluación comparativa de productos para la biorremediación de sitios impactados por hidrocarburos de petróleo en el trópico húmedo. IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente. RICA/Univ. Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.
- Adams, R.H., G. Armenta A., and L. García H. 1995. Bioremediation in the petroleum producing region of southeast Mexico: Microbial activity in contaminated soils and spent drilling muds. pp. 211-213. 2nd Inter-American Environmental Congress. Red Interamericana para la Calidad Ambiental/Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, N.L., México.
- Adams S., R.H., V.I. Domínguez R., and L. García H. 1999. Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactado por petróleo en el trópico Mexicano. *Terra* 17: 159-174.
- Atlas, R.M. 1987. Biodegradation of hydrocarbons in the environment. pp. 211-222. *In*: G.S. Omen (ed.). Environmental biotechnology-reducing risk from environmental chemicals through biotechnology. Plenum Press. New York.
- Atlas, R.M. and R. Bartha. 1987. Microbial ecology: fundamentals and applications. (2nd ed.). The Benjamin/Cummings Publishing Company. Menlo Park, CA.
- Bartha, R. 1984. Petroleum microbiology. MacMillan. New York.
- Bauzon, D., R. van den Driessche, and Y. Dommergues. 1968. Respirometric and enzymatic characterization of forest soils. *Soil Sci.* 2: 55-77.
- Blazkiewicz, H., M. Connolly, and M. Mazur. 1997. Full-scale on-site bioremediation of PAH in soil. *In Situ* and On Site Bioremediation. Vol. 2. pp. 105. Proc. 4th International *in situ* and on-site Bioremediation Symposium. New Orleans. Batelle Press. Columbus, OH.
- Brock, T.D., M.T. Madigan, J.M. Martinko, and J. Parker. 1994. Biology of microorganisms. 7th ed. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ.
- Cole, G.M. 1994. Assessment and remediation of petroleum contaminated sites. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.
- Cook, J.T., Jr. 1995. Bioremediation engineering. McGraw-Hill. New York.
- Drake, E.N., G. Douglas, and R. Prince. 1997. Nutrient stimulated biodegradation of aged landfarm hydrocarbons in soil. *In Situ* and On Site Bioremediation. Vol. 2. pp. 175-176. Proc. 4th International *in situ* and on-site Bioremediation Symposium. New Orleans. Batelle Press. Columbus, OH.
- Easterbrook, G. 1996. A moment on the earth, the coming age of environmental optimism. Penguin. New York.
- El-Din Sharabi and R. Bartha. 1993. Testing some assumptions about biodegradability in soil as measured by carbon dioxide evolution. *Applied and Environmental Microbiology* 59: 1201-1205.
- Frankenburger, W.T., Jr. and W.A. Dick. 1983. Relationships between enzyme activities, microbial growth and activity indices in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 5.
- Hershman, L.E. and K.L. Temple. 1979. Comparison of ATP, phosphatase, pectinolyase, and respiration as indicators of microbial activity in reclaimed strip mine soils. *Soil Sci.* 127: 70-73.
- Hinchee, R.E., B.C. Alleman, R.E. Hoeppe, and R.N. Miller. 1994. Hydrocarbon remediation. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Kalra, Y.P. and D. Maynard G. 1991. Methods manual for forest soil and plant analysis. Report NOR-X-319. Northwest Region, Canada.
- King, R.B., G.M. Long, and J.K. Sheldon. 1992. Practical environmental bioremediation. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.
- Lawlor, K., K. Sublette, K. Duncan, E. Levetin, P. Buck, H. Wells, E. Jennings, S. Hettenbach, S. Baily, J.B. Fisher, and T. Todd. 1997. Long-term effects of crude contamination and bioremediation in a soil ecosystem. *Batelle Memorial Institute. Bioremediation J.* 1: 4-51.
- Microbics Corporation. 1995. Microtox acute toxicity basic test procedures. Manual for Microtox system operation. Carlsbad, CA. (Currently Azur Environmental).
- Palma L., D.J., J. Cisneros D., A. Trujillo N., N. Granados A., and J.E. Serrano B. 1985. Caracterización de los suelos de Tabasco. Uso actual, potencial y taxonomía. Gobierno del Estado de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.
- Palma-López, D. and J. Cisneros D. 1996. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Vol. 1. Series Suelos de Tabasco. Fundación Produce Tabasco, A.C. Villahermosa, Tabasco, México.
- Paul, E.A. and F.E. Clark. 1989. Soil microbiology and biochemistry. Academic Press. San Diego, CA.
- PEMEX. Petróleos Mexicanos. 1999. Indicadores petroleros. Gerencia Corporativa de Evaluación e Información. Mexico, D.F.
- Salazar G., I. and M.G. Garcilazo C. 1996. Pretratamiento de recortes de perforación contaminados con lodos de emulsión inversa. Anteproyecto de tesis de Maestría en Ingeniería y Protección Ambiental. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.
- Stotzky, G. 1965. Microbial respiration. pp. 1550-1569. *In*: A. Black (ed.). Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Tabatabai, M.A. 1996. Soil organic matter testing: an overview. pp. 1-9. *In*: F.R. Magdoff, M.A. Tabatabai, and E.A. Hanlon (eds.). Soil organic matter: Analysis and interpretation. Special publication 46. Soil Science Society of America Madison, WI.
- Venosa, A.D. and J.R. Haines. 1997. Rates of hydrocarbon biodegradation in the field and laboratory. *In Situ* and On Site Bioremediation. pp. 361-362. *In*: Vol. 2. Proc. 4th International *in situ* and on-site Bioremediation Symposium. New Orleans. Batelle Press. Columbus, OH.
- Walkley, A. and T.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.

West, R., N. Psuty, and B. Thom. 1985. Las tierras bajas de Tabasco. Gobierno del Estado de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.

Wise, D.L. and D.J. Trantolo (eds.). 1994. Remediation of hazardous waste contaminated soil. Marcel Dekker. New York.

World Oil. 2001. Industry at a glance. July 2001, Vol. 222, No.7. Gulf Publishing Company.

NITROGENO Y POTASIO EN LA PRODUCCION DE PLANTULAS DE MELON

Nitrogen and Potassium in the Production of Muskmelon Seedlings

Pablo Preciado Rangel¹, Gustavo A. Baca Castillo^{1†}, J. Luis Tirado Torres¹,
Josué Kohashi-Shibata¹, Leonardo Tijerina Chávez¹ y Angel Martínez Garza²

RESUMEN

La producción de plántulas vigorosas y aptas para el trasplante es un prerrequisito para la obtención de rendimientos económicamente redituables. La composición química de la solución nutritiva es un importante factor para el logro de este propósito. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de tres relaciones nitrato:aniones y tres de potasio:cationes, con base en la solución nutritiva universal de Steiner, sobre el crecimiento y la extracción nutrimental de plántulas de dos híbridos de melón (*Cucumis melo* L.): Crusier (HC) y Gold Eagle (HGE). Se tomaron datos de diversas variables del crecimiento y se determinó la extracción nutrimental de las plántulas. Los híbridos presentaron diferente respuesta en el crecimiento y en la extracción nutrimental a la composición química de las soluciones nutritivas; con el HC se obtuvieron plántulas con mayor crecimiento y mayor extracción nutrimental con 12 mol NO₃⁻ m⁻³ y 10 mol K⁺ m⁻³, mientras que con el HGE se logró lo mismo con 12 ó 14 mol NO₃⁻ m⁻³ y 7 mol K⁺ m⁻³. Con el suministro de las soluciones nutritivas se obtuvieron plántulas de mayor crecimiento y de mayor acumulación de nutrimentos que las correspondientes al fertilizar al suelo.

Palabras clave: Crecimiento, extracción nutrimental, *Cucumis melo* L.

SUMMARY

The production of vigorous seedlings fit for transplanting is a prerequisite to obtaining profitable yields. The use of an appropriate nutrient solution is an important factor in achieving this goal. The objective of the present work was to evaluate the

¹ Instituto de Recursos Naturales. ² Instituto de SEI. Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

[†] (bacag@colpos.colpos.mx)

effect of three nitrate:anion and three potassium:cation ratios, based on Steiner's universal nutrient solution, on growth and nutrient uptake by seedlings of two muskmelon (*Cucumis melo* L.) hybrids: Crusier (HC) and Gold Eagle (HGE). Data of diverse growth variables were taken and the nutrient uptake by seedlings was determined. Growth and nutrient uptake responses to the chemical composition of the nutrient solution differed; seedlings with the best growth and highest nutrient uptake were obtained in HC with 12 mol NO₃⁻ m⁻³ and 10 mol K⁺ m⁻³ and in HGE with 12 or 14 mol NO₃⁻ m⁻³ and 7 mol K⁺ m⁻³. Seedlings with better growth and nutrient accumulation were obtained with the use of nutrient solutions than with conventional fertilization.

Index words: Growth, nutrient uptake, *Cucumis melo* L.

INTRODUCCION

Tradicionalmente, el melón se siembra directamente en el campo. Sin embargo, el alto costo de la semilla y un ciclo vegetativo que se ajusta con dificultad, por su duración, a una época de siembra restringida por las condiciones climáticas, hacen cada vez más común la utilización del trasplante, ya que de esta manera el tiempo a cosecha es más corto que el de las plantas sembradas directamente en campo (Dufault, 1994); además, existe la posibilidad de adelantar la época de la cosecha. Los factores que afectan el desarrollo vegetativo y el crecimiento de las plántulas al ser establecidas en campo son: el tamaño del contenedor de la raíz (Kemble *et al.*, 1994; Maynard *et al.*, 1996; Armenta, 1998), la nutrición de las plántulas antes y después del trasplante (Weston y Zandstra, 1989; Armenta, 1998), la edad de la planta (Leskovar *et al.*, 1991) y las condiciones de manejo de las mismas (Leskovar y Cantliffe, 1991). El desarrollo de plántulas vigorosas con un crecimiento radical profuso es un requisito para el trasplante, ya que les

permite reponerse sin síntomas aparentes del estrés causado al ser establecidas en campo y reanudar su desarrollo normal. La nutrición apropiada a partir de la siembra contribuye, en gran medida, al desarrollo de plántulas vigorosas (Kratky y Mishima, 1981; Dufault, 1986) y es uno de los factores más importantes en la producción de plántulas, en donde el nitrógeno y el potasio son los nutrientes requeridos en mayor cantidad (Marschner, 1995), especialmente en las etapas tempranas de crecimiento (Steiner, 1973). El estado nutricional de las plántulas en el momento del trasplante influye en el establecimiento y promueve una producción temprana (Schultheis y Dufault, 1994). En un programa nutricional para esta etapa fenológica deben evitarse dosis excesivamente altas de N, ya que, aunque favorecen un mayor peso seco del vástago, disminuyen el de la raíz (Tremblay y Gosselin, 1989) e incrementan el estrés de las plántulas, al ser trasplantadas en campo (Schultheis y Dufault, 1994). En cambio, dosis relativamente altas de K incrementan el diámetro del tallo y la altura de planta, sin disminuir el peso seco de la raíz (Tremblay y Senécal, 1988). Con relación a la fertilización de plántulas de melón desde la siembra hasta su trasplante, Dufault (1986) realizó un estudio con NPK sobre algunas variables de crecimiento y recomendó el uso de 250, 125 y 250 mg L⁻¹ de dichos nutrientes, respectivamente, para obtener rendimientos tempranos; el autor señaló que dichas concentraciones de nutrientes son altas. Por otro lado, (Armenta, 1998) señaló para plántulas de tomate que mediante un incremento gradual en la concentración de la solución nutritiva, se obtiene mayor producción de biomasa y un contenido nutricional mayor. El objetivo de la presente investigación fue evaluar los efectos de los aumentos de la relación mutua de NO₃⁻:aniones y de la relación mutua de K⁺:cationes, específicos de la solución nutritiva universal de Steiner, sobre el crecimiento y

la extracción nutricional en plántulas de dos híbridos de melón.

MATERIALES Y METODOS

La presente investigación se realizó del 26 de octubre al 28 de noviembre de 1998, en un invernadero, ubicado en Montecillo, Texcoco, estado de México, con temperaturas promedio de 38/15 °C (día/noche). Semillas de melón (*Cucumis melo* L.) Crusier y Gold Eagle se sembraron en contenedores de forma cónica, con un volumen individual de 30 cm³; se utilizó como sustrato suelo agrícola. Steiner (1979) señaló que una raíz desarrollada en un suelo morirá al ser trasplantada en grava o tezontle u otro sustrato hidropónico y lo mismo ocurrirá en el caso contrario, por lo tanto, para realizar un trasplante a un suelo, la siembra debe realizarse en suelo; motivo por el cual en este estudio se eligió un suelo de textura migajón arcillo-arenosa, se esterilizó en un autoclave y según la clasificación taxonómica es un Typic Ustifluent (Segura, 1999). Este autor describe dicho suelo en términos de bajo contenido de N y que en el intercambio catiónico predominan, en forma decreciente, Ca, Mg y K, condiciones que se corroboraron (Cuadro 1). Los tratamientos en estudio se diseñaron a partir de modificaciones a la solución nutritiva universal de Steiner (1984) y consistieron en incrementar la concentración de NO₃⁻ con relación al total de aniones (NO₃⁻, H₂PO₄⁻, SO₄²⁻), así como la concentración de K⁺ con relación al total de cationes, (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺).

Los tratamientos consistieron en nueve soluciones nutritivas (Cuadro 2) resultantes de la combinación de tres relaciones de NO₃⁻:aniones con tres relaciones de K⁺:cationes, más tres tratamientos testigo adicionales (10, 11 y 12); el Tratamiento 10 corresponde por su composición química al centroide de la parte factorial, el Tratamiento 11 a la solución nutritiva de Steiner y el Tratamiento 12 corresponde a la dosis de fertilización utilizada por los productores de melón en la Comarca Lagunera. Esta consiste en aplicar 2 g de

Cuadro 1. Algunas características físicas y químicas del suelo (Typic Ustifluent) utilizado en el experimento[†].

Da [‡]	pH	CE	MO	NT	P	K	Ca	Mg	CIC
g cm ⁻³	1.2	dS m ⁻¹	--- % ---	---	mg kg ⁻¹	---	cmol kg ⁻¹	---	---
1.31	8.2	0.603	1.78	0.0821	12.54	2.22	24	4.66	33.46

[†] Suelo procedente del municipio de Texcoco, estado de México, a una profundidad de 0 a 20 cm.

[‡] Da = densidad aparente. CE = conductividad eléctrica. MO = materia orgánica. NT = nitrógeno total. CIC = capacidad de intercambio catiónico.

Cuadro 2. Composición química de las soluciones nutritivas utilizadas en la producción de plántulas de melón.

Tratamiento	NO ₃ ^{-†}	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ^{††}	Ca ²⁺	Mg ²⁺		
	----- mol m ⁻³ -----							
1	12.00	12.00	1.00	7.00	7.00	7.00	9.00	4.00
2	14.00	13.60	0.72	5.10	7.00	6.80	8.74	3.88
3	16.00	15.11	0.47	3.30	7.00	6.61	8.50	3.77
4	12.00	11.70	0.97	6.82	8.50	8.29	7.76	3.45
5	14.00	13.28	0.71	4.98	8.50	8.06	7.55	3.35
6	16.00	14.76	0.46	3.23	8.50	7.84	7.34	3.26
7	12.00	11.42	0.95	6.66	10.00	9.52	6.50	2.93
8	14.00	12.97	0.69	4.86	10.00	9.26	6.41	2.85
9	16.00	14.43	0.45	3.15	10.00	9.02	6.24	2.77
10	14.00	13.28	0.71	4.98	8.50	8.06	7.55	3.35
11	12.00	12.00	1.00	7.00	7.00	7.00	9.00	4.00
12	Fertilización al suelo y utilización de agua destilada							

† La primera columna corresponde a las concentraciones propuestas, la segunda a las concentraciones definitivas al realizar los ajustes por el potencial osmótico de -0.073 MPa (Steiner, 1984).

urea y 6 g de superfosfato triple a un volumen de suelo de 1570 cm³, siempre y cuando dicho suelo no sea demasiado arcilloso (CENAMAR, S/F). La estructura de los tratamientos corresponde a un factorial completo 3² con 12 repeticiones y el diseño de distribución en el invernadero correspondió a uno completamente al azar. Todas las soluciones nutritivas se ajustaron a un potencial osmótico de -0.073 MPa (de acuerdo con los lineamientos indicados por Steiner). Durante los tres primeros días después de la siembra, los semilleros se regaron únicamente con agua destilada. Posteriormente, cada 10 días, se incrementó la concentración de la solución nutritiva en el orden siguiente 35, 75 y 100% (Armenta, 1998), excepto para los Tratamientos 10 y 11, en los cuales se aplicó durante todo el ensayo 100% de la concentración (-0.073 MPa). Las soluciones nutritivas se prepararon con sales inorgánicas grado reactivo y agua destilada. En todas las soluciones nutritivas, las concentraciones de los micronutrientes fueron (en mg L⁻¹): Fe 8, Mn 1.6, Zn 0.023, Cu 0.011 y B 0.865; el Fe se proporcionó como Fe-EDTA (Steiner y Van Winden, 1970). Las plántulas se regaron diariamente a las 8:00 h y 14:30 h, para lo cual se utilizaron durante todo el ensayo 500 mL de solución nutritiva por planta. La duración del experimento fue de 30 días después de la siembra, tiempo recomendado por Vavrina (1998). Las mediciones para evaluar la respuesta a los factores en estudio se realizaron en seis plántulas ubicadas en la parte central del bloque de 12 plántulas y consistieron en: diámetro de tallo (DT), el cual se midió debajo de los cotiledones con un vernier; altura de plántula (AP) con un escalímetro; el número de hojas verdaderas (NH); volumen radical

(VR), realizado por desplazamiento de agua en una probeta graduada; área foliar (AF) con el integrador de área foliar Marca LI-COR modelo LI-3000; contenido de clorofila con el SPAD-502; y peso seco del vástago (PSV) y de la raíz (PSR), en una estufa con circulación forzada de aire a 70 °C hasta peso constante.

Con estos datos se calculó la relación vástago/raíz. Se molió el material seco y se realizó el análisis químico para determinar la extracción de N, P, K, Ca y Mg del vástago. El N total se determinó por el método microkjeldahl (Brearen y Mulvaney, 1982). El resto de los nutrientes por el método de digestión húmeda convencional (Alcántar y Sandoval, 1999) y la cuantificación se realizó en un espectrofotómetro de emisión (ICP-AES Plasma 96 Varian). El análisis de varianza de las variables de respuesta se hizo mediante la evaluación de los factores principales del diseño factorial: 1) relación de la concentración de NO₃⁻:total de aniones y 2) la relación de la concentración de K⁺:total de cationes en las soluciones nutritivas, expresadas en mol m⁻³. Se determinó también la interacción entre dichos factores y se comparó el efecto de cada uno de los tratamientos testigo adicionales con la media de los tratamientos correspondientes al diseño factorial.

RESULTADOS Y DISCUSION

Variabes de Crecimiento

Al comparar mediante el análisis de varianza los híbridos, se encontró que el híbrido Gold Eagle (HGE) fue superior significativamente al híbrido

Cuadro 3. Diferencias entre los híbridos Crusier y Gold Eagle en altura de plántula (AP), diámetro de tallo (DT), número de hojas (NH), peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR), volumen radical (VR), relación vástago/raíz (V/R), área foliar (AF) y contenido de clorofila (SPAD).

Híbrido	AP	DT	NH	PSV	PSR	VR	V/R	AF	SPAD
	cm	mm		----- mg -----		mL		cm ²	
Crusier (HC)	6.11 b [†]	4.23 a	3.48 b	333.52 b	111.96 a	2.44 a	3.03 b	57.33 a	49.28 a
Gold Eagle (HGE)	7.48 a	4.30 a	3.70 a	385.00 a	120.18 a	2.64 a	3.29 a	53.94 a	45.89 b

[†] Medias con letras iguales dentro de cada columna son iguales. Tukey (P ≤ 0.05).

Crusier (HC) en altura de plántula, número de hojas, peso seco del vástago y relación vástago/raíz (Cuadro 3); esto indicó un mayor vigor del HGE. Más adelante se discute este punto.

El análisis de varianza de las variables de crecimiento de cada uno de los híbridos por separado (Cuadro 4) indicó que en el HC los mayores valores se alcanzaron con 12 mol NO₃⁻ m⁻³; con respecto a 16 mol NO₃⁻ m⁻³, todos ellos fueron significativos excepto altura de plántula. Con el HGE se obtuvieron valores menores de número de hojas, relación vástago/raíz y área foliar con 16 mol NO₃⁻ m⁻³.

Ambos cultivares manifestaron respuesta al NO₃⁻ en el número de hojas y el área foliar, el HC lo hizo para la concentración de 12 mol m⁻³ y el HGE para la concentración de 12 ó 14 mol m⁻³. La importancia fisiológica del número de hojas y del área foliar radica en una mayor área para realizar la fotosíntesis y, por

lo tanto, una mayor producción de esqueletos carbonatados, los cuales son utilizados o almacenados en el tallo. Por lo tanto, el diámetro de éste también es un buen indicador del vigor de las plántulas, ya que refleja directamente la acumulación de fotosintatos, los cuales posteriormente pueden trasladarse a los sitios de demanda (Liptay *et al.*, 1981; Donald y Hamblin, 1983). Además, un tallo grueso permite soportar la parte aérea sin doblarse por los vientos en el campo (Orzolek, 1991), evitando el estrangulamiento de los haces vasculares.

Por otra parte, se han señalado efectos favorables al incrementar la relación NO₃⁻:aniones en la solución de Steiner para las variables altura de plántula y peso seco del vástago (Armenta, 1998; Lara, 1998). Otros autores indicaron que, en general, las fertilizaciones con N afectan favorablemente el diámetro de tallo y el número de hojas de las plántulas (Dufault, 1986;

Cuadro 4. Efecto de la concentración de NO₃⁻ y K⁺ en la solución nutritiva y del cultivar sobre altura de plántula (AP), diámetro de tallo (DT), número de hojas (NH), peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR), volumen radical (VR), relación vástago/raíz (V/R), área foliar (AF) y contenido de clorofila (SPAD) en plántulas de melón.

Factor	Concentración	AP	DT	NH	PSV	PSR	VR	V/R	AF	SPAD
	mol m ⁻³	cm	mm		----- mg -----		mL		cm ²	
Crusier										
NO ₃ ⁻	12	6.37 a [†]	4.43 a	3.77 a	380.56 a	123.05 a	2.65 a	3.10 a	68.56 a	51.51 a
	14	6.32 a	4.38 a	3.44 b	337.22 ab	103.88 b	2.48 ab	3.25 a	57.43 b	49.68 ab
	16	5.64 a	3.88 b	3.22 b	282.78 b	108.94 b	2.17 b	2.58 b	46.07 c	46.65 b
K ⁺	7	5.51 b	4.10 b	3.38 a	303.33 b	97.22 b	2.21 b	3.12 a	56.67 ab	48.66 a
	8.5	5.80 ab	4.05 b	3.38 a	303.33 b	113.38 a	2.40 ab	3.14 a	51.23 b	50.81 a
	10	7.03 a	4.48 a	3.66 a	393.89 a	125.27 a	2.71 a	2.66 b	64.10 a	48.36 a
NO ₃ ⁻ x K ⁺		ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	ns
Gold Eagle										
NO ₃ ⁻	12	7.67 a	4.31 a	3.77 a	409.44 a	127.77 a	2.77 a	3.26 ab	61.75 a	43.90 a
	14	7.33 a	4.33 a	3.94 a	427.78 a	120.00 a	2.66 a	3.56 a	55.86 a	47.11 a
	16	7.25 a	4.25 a	3.38 b	316.78 a	112.77 a	2.48 a	2.84 b	44.22 b	46.66 a
K ⁺	7	7.56 a	4.18 a	3.72 a	397.22 a	123.33 a	2.75 a	3.22 a	55.58 a	47.20 a
	8.5	7.23 a	4.42 a	3.72 a	390.00 a	121.66 a	2.62 a	3.26 a	53.61 a	45.06 a
	10	7.66 a	4.28 a	3.66 a	367.78 a	115.55 a	2.55 a	3.17 a	52.64 a	45.41 a
NO ₃ ⁻ x K ⁺		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

[†] Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor son iguales, según Tukey (P ≤ 0.05).

* y ns = significativa y no significativa según Tukey (p ≤ 0.05).

Basocuu y Nicola, 1995), el área foliar (Tremblay y Gosselin, 1989) y la relación vástago/raíz (Dufault, 1986). Con respecto a la relación alta de NO_3^- en la solución nutritiva ($16 \text{ mol NO}_3^- \text{ m}^{-3}$), en el presente experimento los valores de estas variables disminuyeron en el HC, con excepción de la altura de plántula y en el HGE sólo el número de hojas, la relación vástago/raíz y el área foliar, en forma similar con lo encontrado por Tremblay y Gosselin (1989) para el peso seco de raíz. Cabe indicar que esta respuesta podría obedecer al desbalance nutrimental causado por la alta concentración del NO_3^- en la solución nutritiva. De acuerdo con el conjunto de resultados en general, las concentraciones de 12 ó 14 $\text{mol NO}_3^- \text{ m}^{-3}$ fueron las mejores para la producción de plántulas de melón en el HC, ya que permitió alcanzar los mayores valores de todas las variables de crecimiento con excepción de la altura de plántula. Por otra parte, también con las mismas concentraciones, se lograron valores mayores sólo en el número de hojas, la relación vástago/raíz y el área foliar en el HGE.

En el HC con la relación de K^+ :cationes de $10 \text{ mol K}^+ \text{ m}^{-3}$ con respecto a $7 \text{ mol K}^+ \text{ m}^{-3}$, se obtuvieron los mayores valores en altura de plántula, diámetro de tallo, peso seco del vástago, peso seco de la raíz y volumen radical e, inclusive, la tendencia de las variables indica que cabe esperar valores mayores con una mayor concentración de K^+ en la solución nutritiva; en cambio, la relación vástago/raíz fue menor. Por otra parte, en el HGE las variables analizadas no fueron significativas (Cuadro 4). De acuerdo con los anteriores resultados, ambos cultivares respondieron en forma diferente a la concentración de K^+ en la solución nutritiva, ya que el HC aparentemente demandó una mayor concentración que la probada en esta investigación y el HGE completó su demanda de K^+ aún con la solución de menor concentración de este nutrimento. Cabe señalar que dado que el HC estuvo en desventaja con respecto al HGE, ya que aún la solución con mayor concentración de K^+ estudiada aparentemente no cubrió la demanda del HC. Los resultados del Cuadro 3 que indican mayor vigor del HGE, deben tomarse con reserva. De acuerdo con Dufault (1994), las diferentes variedades de una misma especie requieren diferentes condiciones nutrimentales para exhibir su máximo potencial, efecto encontrado en el presente trabajo para los híbridos en estudio. Dufault (1986), único investigador que estudió la respuesta fisiológica de plántulas de melón a la fertilización

previa al trasplante, utilizó soluciones de N y K con las concentraciones de 0.71, 3.57 y 17.86 mol N m^{-3} y de 0.26, 1.28 y 6.41 $\text{mol K}^+ \text{ m}^{-3}$, con base en urea y KCl, respectivamente, aplicó dos riegos a la semana a un suelo artificial pobre en N, P y K, donde sembró el cv. Magnum 45 y no consideró las diferencias en presión osmótica de las soluciones. A pesar de que las condiciones en que realizó dicho estudio fueron diferentes a las de la presente investigación, hubo coincidencia con los resultados obtenidos en el HC, pues determinó efecto cuadrático para N y efecto lineal para K (una concentración mayor de K podría incrementar el potencial de crecimiento de las plántulas).

La interacción $\text{NO}_3^- \text{K}^+$ originó una respuesta significativa en el peso seco de la raíz y el número de hojas en el HC (Figuras 1a y b). Con $8.5 \text{ mol K}^+ \text{ m}^{-3}$ y $12 \text{ mol NO}_3^- \text{ m}^{-3}$, se obtuvo el mayor peso seco de la raíz y del número de hojas, con relación al efecto simple de ambos nutrimentos en la solución nutritiva, explicable por sinergismo entre el K y el N (Marschner, 1995). Por otra parte, con la concentración de $8.5 \text{ mol K}^+ \text{ m}^{-3}$, al incrementar la concentración de NO_3^- de 12 a 14 mol m^{-3} , el número de hojas y el peso seco de la raíz disminuyeron (Figuras 1a y b), debido probablemente a desbalances nutrimentales.

La interacción $\text{NO}_3^- \text{K}^+$ para el HGE no fue significativa para ninguna de las variables de crecimiento analizadas (Cuadro 4).

Con relación a los tratamientos adicionales, al comparar la media de cada una de las variables de crecimiento de los tratamientos que integran el diseño factorial, con las correspondientes de cada uno de los tratamientos adicionales, se observó que en el HC con el Tratamiento 11 se obtuvieron los mayores valores en altura de plántula, número de hojas, producción de biomasa y relación vástago/raíz con respecto a la media del factorial (Cuadro 5). El Tratamiento 10 sólo superó a la correspondiente media de la factorial en la relación vástago/raíz. La media factorial fue superior en peso seco del vástago, área foliar, contenido de clorofila y relación vástago/raíz con respecto a las correspondientes del Tratamiento 12.

La media de las variables de crecimiento del diseño factorial en el HGE fue mayor con relación a las correspondientes del Tratamiento 12. De ellas destacan por su significancia estadística: el diámetro de tallo y el contenido de clorofila (Cuadro 5). Los Tratamientos 10 y 11 sólo superaron a la media factorial en el contenido de clorofila.

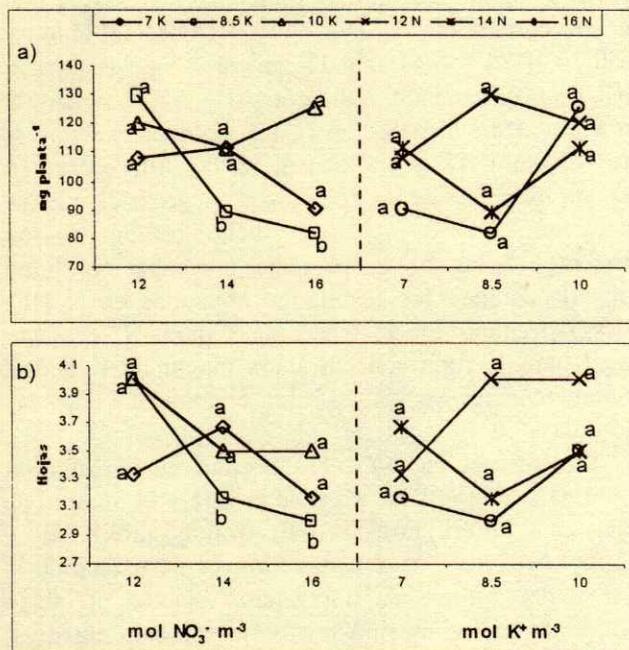


Figura 1. Interacción NO_3^- - K^+ en la solución nutritiva para el peso seco de la raíz (a) y el número de hojas (b) en plántulas de melón del híbrido Crusier (HC). Puntos adyacentes con la misma letra en cada misma línea son iguales según Scheffé ($P \leq 0.05$).

Extracción Nutricional

El análisis de varianza de la extracción nutricional permitió destacar que el HGE, con

respecto al HC, logró la mayor extracción de todos los nutrientes analizados, con excepción del N (Cuadro 6). Estos resultados fueron en gran medida un reflejo del mayor peso seco del vástago. El análisis de varianza de la extracción nutricional de cada uno de los híbridos por separado (Cuadro 7) indicó que el N de la solución nutritiva afectó significativamente la extracción de todos los nutrientes analizados en ambos híbridos, con excepción del Zn en el HGE. Anteriormente se indicó que las variables de crecimiento para el HC fueron similares con 12 ó 14 mol $\text{NO}_3^- \text{m}^{-3}$ en la solución nutritiva. En el caso de la extracción nutricional, los valores fueron mayores con 12 mol $\text{NO}_3^- \text{m}^{-3}$; estos resultados indican una mejor calidad de las plántulas obtenidas con 12 mol $\text{NO}_3^- \text{m}^{-3}$ en la solución nutritiva o sea la solución nutritiva Steiner original. Además, de acuerdo con lo que se discutió anteriormente, 16 mol $\text{NO}_3^- \text{m}^{-3}$ en la solución nutritiva significó una disminución en los valores de las variables de crecimiento y extracción nutricional. En el HGE, la respuesta a NO_3^- en la solución nutritiva no tuvo la definición que se observó con el HC, ya que las extracciones de todos los nutrientes, excepto la de Zn, fueron similares para 12 ó 14 mol $\text{NO}_3^- \text{m}^{-3}$ en la solución nutritiva. Los resultados anteriores coinciden con lo señalado por Dufault (1994), al indicar que las variedades de una misma especie requieren diferentes condiciones nutricionales para exhibir su máximo potencial.

Cuadro 5. Comparación de medias entre la parte factorial y los testigos de los cultivares Crusier y Gold Eagle, en altura de plántula (AP), diámetro de tallo (DT), número de hojas (NH), peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR), volumen radical (VR), relación vástago raíz(V/R), área foliar (AF) y contenido de clorofila (SPAD) en plántulas de melón.

Tratamiento	AP cm	DT mm	NH #	PSV mg	PSR mg	VR mL	AF cm^2	SPAD	V/R
Crusier									
Factorial 10	6.11 a [†]	4.23 a	3.47 a	333.15 a	111.96 a	2.43 a	57.33 a	49.28 a	2.97 b
	5.90 a	4.10 a	3.66 a	340.00 a	96.67 a	2.33 a	49.40 a	52.70 a	3.53 a
Factorial 11	6.11 b	4.23 a	3.47 b	333.15 b	111.96 b	2.43 a	57.33 a	49.28 a	2.97 b
	7.83 a	4.33 a	4.00 a	396.67 a	131.67 a	2.50 a	65.23 a	51.45 a	3.01 a
Factorial 12	6.11 a	4.23 a	3.47 a	333.15 a	111.96 a	2.43 a	57.33 a	49.28 a	2.97 a
	5.13 a	3.46 a	3.16 a	246.67 b	98.33 a	2.00 a	43.70 b	34.10 b	2.52 b
Gold Eagle									
Factorial 10	7.48 a	4.29 a	3.70 a	385.0 a	120.18 a	2.64 a	53.94 a	45.89 b	3.22 a
	7.30 a	4.10 a	3.66 a	376.67 a	113.33 a	2.66 a	58.70 a	50.15 a	3.31 a
Factorial 11	7.48 a	4.29 a	3.70 a	385.0 a	120.18 a	2.64 a	53.94 a	45.89 b	3.22 a
	6.90 a	4.33 a	4.00 a	405.0 a	105.0 a	2.26 a	60.50 a	49.20 a	3.88 a
Factorial 12	7.48 a	4.29 a	3.70 a	385.0 a	120.18 a	2.64 a	53.94 a	45.89 a	3.22 a
	5.76 a	3.56 b	3.66 a	370.0 a	116.67 a	2.13 a	46.43 a	41.65 b	3.17 a

[†] Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor son iguales, según la prueba DMS ($P \leq 0.05$).

Cuadro 6. Prueba de medias en los híbridos Crusier y Gold Eagle sobre la extracción nutrimental.

Híbrido	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn
	mg planta ⁻¹			μg planta ⁻¹			
Crusier (HC)	10.61 a [†]	0.65 b	8.83 b	9.06 b	2.28 b	390.42 b	191.45 b
Gold Eagle (HGE)	10.76 a	0.89 a	10.34 a	13.14 a	3.07 a	551.01 a	394.32 a

[†] Medias con letras iguales dentro de cada columna son iguales, según Tukey ($P \leq 0.05$).

Cuadro 7. Efecto de la concentración de NO₃⁻ y K⁺ en la solución nutritiva y el cultivar sobre la extracción nutrimental en plántulas de melón.

Factor	Concentración	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn
	mol m ⁻³	mg planta ⁻¹			μg planta ⁻¹			
Crusier								
NO ₃ ⁻	12	11.62 a [†]	0.902 a	10.33 a	10.83 a	2.72 a	448.52 a	225.97 a
	14	10.04 ab	0.545 b	7.43 b	7.89 b	1.98 b	330.52 b	160.65 b
	16	9.90 b	0.541 b	8.33 ab	8.20 b	2.10 b	378.56 ab	173.55 b
K ⁺	7	10.43 ab	0.634 a	8.02 b	8.62 a	2.21 a	369.65 a	164.65 b
	8.5	9.73 b	0.635 a	8.22 ab	8.80 a	2.23 a	382.56 a	189.51 ab
	10	11.90 a	0.777 a	10.36 a	9.93 a	2.46 a	414.34 a	216.84 a
NO ₃ ⁻ x K ⁺		*	ns	ns	ns	*	ns	ns
Gold Eagle								
NO ₃ ⁻	12	11.66 a	1.03 a	10.82 a	14.03 a	3.320 a	558.81 ab	414.20 a
	14	11.37 a	1.05 a	10.67 ab	14.63 a	3.321 a	622.69 a	371.577 a
	16	9.37 b	0.65 b	8.05 b	10.92 b	2.497 b	475.89 b	303.76 a
K ⁺	7	11.06 a	0.94 a	10.01 ab	14.72 a	3.21 a	605.29 a	378.22 a
	8.5	10.88 a	0.99 a	11.15 a	12.96 a	3.13 a	506.94 a	323.31 a
	10	10.43 a	0.86 a	8.50 b	12.23 a	2.88 a	576.26 a	416.07 a
NO ₃ ⁻ x K ⁺		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

[†] Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor son iguales, según Tukey ($P \leq 0.05$).

*, ns = significativa y no significativa, según Tukey ($P \leq 0.05$).

El K⁺ con una concentración de 8.5 ó 10 mol m⁻³ en la solución nutritiva ocasionó en el HC las mayores extracciones de N, K y Zn; inclusive, la tendencia de las mismas indica que con concentraciones mayores de K⁺ se lograrían mayores extracciones. Esto apoya lo anteriormente indicado para las variables de crecimiento (Cuadro 4); es decir, que el HC posiblemente requiere una mayor concentración de K⁺ con respecto a las ensayadas en esta investigación. En el caso del HGE con 10 mol K⁺ m⁻³ en la solución nutritiva ocasionó una disminución en la extracción de K (Cuadro 7). Estos resultados concuerdan con lo señalado para las variables de crecimiento; es decir, que este híbrido no respondió a los incrementos de K⁺ en la solución nutritiva (Cuadro 4). Por otra parte, la disminución en la extracción de K como respuesta al incremento de K⁺ en la solución nutritiva en el HGE, podría considerarse como efecto de un desbalance nutrimental (Cuadro 7).

La interacción NO₃⁻-K⁺ en el HC resultó significativa para la extracción del N y del Mg (Figura 2a y b). En el caso del N con 16 mol NO₃⁻ m⁻³ y 8.5 mol K⁺ m⁻³, existió una disminución significativa en la extracción de N con respecto a la misma concentración de NO₃⁻ y 10 mol K⁺ m⁻³. Es posible que esta respuesta corresponda a un desbalance nutrimental, originado por la alta concentración de NO₃⁻. Anteriormente, se señaló que este híbrido cubre sus necesidades nutrimentales con 12 mol NO₃⁻ m⁻³. En el caso de la extracción de Mg (Figura 2b), los valores mayores se obtuvieron con 12 mol NO₃⁻ m⁻³ y con 8.5 ó 10 mol K⁺ m⁻³, mientras que con 7 mol m⁻³ del mismo nutrimento disminuyó la extracción de Mg. Esta respuesta coincide con el peso seco de la raíz (Figura 1a) y con el número de hojas (Figura 1b). Quizá, la extracción de Mg fue la responsable directa de estas respuestas. Cabe señalar que la extracción de N debida a 12 mol NO₃⁻ m⁻³

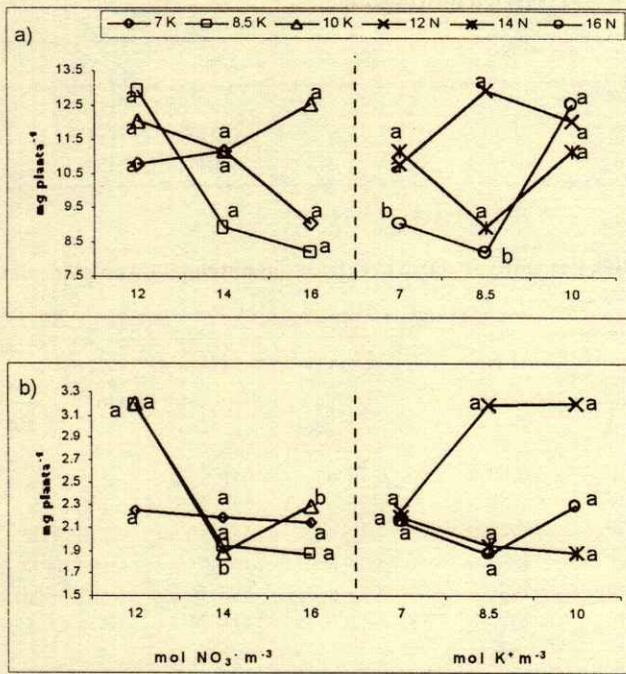


Figura 2. Interacción $\text{NO}_3^- \text{K}^+$ en la solución nutritiva para la extracción de N (a) y Mg (b) en plántula de melón del híbrido Gold Eagle (HC). Puntos adyacentes con la misma letra en cada línea son iguales según Scheffé ($P \leq 0.05$).

muestra una tendencia similar a la del Mg (Figura 2b) y, de acuerdo con esto, no sólo la extracción de Mg ocasionó el mayor peso seco de la raíz y del número de hojas, sino también la extracción de N apoyó dichos efectos.

Cuadro 8. Comparación de medias entre la parte factorial y los testigos en los híbridos Crusier y Gold Eagle sobre la extracción nutricional.

Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn
	----- mg planta ⁻¹ -----						
Crusier							
Factorial	10.61 a [†]	0.65 a	8.83 a	9.06 a	2.28 a	390.42 a	191.45 a
10	8.78 a	0.65 a	7.15 a	9.55 a	2.31 a	406.18 a	174.88 a
Factorial	10.61 a	0.65 a	8.83 a	9.06 a	2.28 a	390.12 a	191.45 a
11	12.10 a	0.87 a	9.40 a	8.34 a	2.24 a	331.87 a	169.20 a
Factorial	10.61 a	0.65 a	8.83 a	9.06 a	2.28 a	390.42 a	191.45 a
12	3.43 b	1.14 a	4.89 b	5.04 b	1.69 b	223.18 b	108.26 b
Gold Eagle							
Factorial	10.75 a	0.89 b	10.34 a	13.14 a	3.07 a	551.00 a	394.32 a
10	10.47 a	1.28 a	10.36 a	13.87 a	3.21 a	502.26 a	220.80 a
Factorial	10.75 a	0.89 a	10.34 a	13.14 a	3.07 a	551.00 a	394.32 a
11	11.72 a	1.00 a	6.71 b	15.24 a	3.15 a	692.36 a	284.70 a
Factorial	10.75 a	0.89 b	10.34 a	13.14 a	3.07 a	551.00 a	394.32 a
12	6.98 b	1.57 a	5.03 b	6.28 b	2.03 b	322.94 b	184.50 b

[†] Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor, son iguales según la prueba DMS ($P \leq 0.05$).

La interacción $\text{NO}_3^- \text{K}^+$ para el HGE no fue significativa para ninguno de los nutrientes analizados (Cuadro 7).

Con relación a los tratamientos adicionales, la extracción media de los nutrientes analizados en los tratamientos integrantes de la factorial fue mayor con respecto a las correspondientes del Tratamiento 12 para ambos cultivares, excepto las extracciones de P de ambos cultivares (Cuadro 8), varias de las variables del crecimiento (Cuadro 5), también fueron menores en el Tratamiento 12 con respecto a la media del factorial. Este tratamiento consistió en la aplicación al suelo de N y P de acuerdo con la recomendación del CENAMAR (S/F), a diferencia de los tratamientos integrantes del diseño factorial, que consistieron en la aplicación de soluciones nutritivas con todos los nutrientes esenciales. La cantidad total de N promedio, aplicada en estos tratamientos, fue cinco veces mayor con relación a la aplicada en el suelo y la de P, por el contrario, fue la mitad. Esto último explica los resultados antes indicados de las extracciones de P y de varias de las variables de crecimiento.

En el HC no existieron diferencias significativas entre los tratamientos integrantes de la factorial y el Tratamiento 11. Como ya se indicó, las variables de crecimiento fueron mayores en el Tratamiento 11, el cual consistió en la aplicación de la solución Steiner sin diluir. Por otro lado, los tratamientos integrantes de la factorial consistieron en soluciones nutritivas diluidas, cuya concentración se aumentó gradualmente (35, 75 y 100%). La explicación a la respuesta

encontrada es que el HC demanda soluciones nutritivas más concentradas ya que, de acuerdo con Shannon (1997), el melón en esta etapa vegetativa es más resistente a la salinidad que en las siguientes etapas. Con el HGE no existió una tendencia definida en la expresión de las variables de crecimiento (Cuadro 5). Sin embargo, los valores de las extracciones, en general, fueron numéricamente mayores en el Tratamiento 11. Con el Tratamiento 10, con relación a la media de la factorial, no se observaron con ambos híbridos tendencias definidas (Cuadro 8), como tampoco se observaron para la variables de crecimiento (Cuadro 5).

ASERCA (2000) indicó que las plántulas de melón para trasplante deben contar con tres hojas verdaderas, una raíz voluminosa y nunca deben de trasplantarse a raíz desnuda. Los resultados del presente estudio indicaron que en 30 días las plántulas de melón fertilizadas de manera adecuada pueden alcanzar cuatro hojas verdaderas, un diámetro mayor que 4 mm y una altura superior a 7 cm.

CONCLUSIONES

- Los cultivares respondieron de manera diferencial en el crecimiento y la extracción nutrimental a la composición química de las soluciones nutritivas.
- En el HC, con una concentración de $12 \text{ mol NO}_3^- \text{ m}^{-3}$ en la solución nutritiva, se obtuvieron plántulas con un mayor crecimiento vegetativo y una mayor extracción nutrimental. En cambio, con una concentración de 12 ó $14 \text{ mol NO}_3^- \text{ m}^{-3}$, el HGE alcanzó un mayor crecimiento vegetativo y una mayor extracción nutrimental.
- Existió una mayor demanda de K^+ en el HC, con respecto al HGE. Por otra parte, la tendencia de la demanda de K^+ del HC indica que cabe esperar una mayor extracción de K, con una mayor relación K^+ :cationes, la que se reflejaría en un mayor vigor de las plántulas.
- En la selección de plántulas vigorosas y aptas para el trasplante no sólo se debe de considerar el vigor de las mismas, sino también su análisis nutrimental.
- Con el suministro de soluciones nutritivas, se obtienen plántulas de mayor calidad que las correspondientes con la fertilización al suelo similar a la que se aplica en la Comarca Lagunera.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo forma parte del proyecto CONACYT G009-B.

LITERATURA CITADA

- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Armenta B., A.D. 1998. Relaciones óptimas de aniones y cationes en la solución nutritiva en riego por goteo para la producción de tomate. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- ASERCA. Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria. 2000. El melón mexicano, ejemplo de una tecnología aplicada. Claridades Agropecuarias 84. México, D.F.
- Basocuu, L. y S. Nicola. 1995. Supplementary light and pretransplant nitrogen effects on tomato seedling growth and yield. *Acta Hort.* 396: 313-319.
- Brearen, L. y C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. pp. 595-634. *In*: A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (Agronomy 9)*. 2nd ed. ASA, SSSA, Madison, WI.
- CENAMAR. Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego. S/F. Producción de melón por trasplante. Gómez Palacio, Durango, México.
- Donald, C.M. y J. Hamblin. 1983. The convergent evolution of annual seed crops in agriculture. *Adv. Agron.* 36: 97-143.
- Dufault, R.J. 1986. Influence of nutritional conditioning on muskmelon transplant quality and early yield. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 111: 698-703.
- Dufault, R.J. 1994. Long-term consequences and significance of short-term preplant nutritional conditioning. *Hort. Techn.* 4: 41-42.
- Kemble, J.M., J.M. Davis, R.G. Gardner y D.C. Sanders. 1994. Root cell volume affects growth of compact-growth-habit tomato transplants. *HortScience* 29: 261-262.
- Kratky, B.A. y H.Y. Mishima. 1981. Lettuce seedling and yield response to preplant and foliar fertilization during transplant production. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 106: 3-7.
- Lara H., A. 1998. Soluciones nutritivas para cuatro etapas fenológicas del jitomate. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Leskovar, D.I. y D.J. Cantliffe. 1991. Tomato transplant morphology affected by handling and storage. *HortScience* 26: 1377-1379.
- Leskovar, D.I., D. J. Cantliffe y P.J. Stoffella. 1991. Growth and yield of tomato plants in response to age of transplants. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 116: 416-420.
- Liptay, A., C.A. Jaworski y S.C. Phatak. 1981. Effect of tomato transplant stem diameter and ethephon treatment on tomato yield, fruit size and number. *Can. J. Plant Sci.* 61: 413-415.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press. San Diego, CA.
- Maynard, E.T., C.S. Vavrina y W.D. Scott. 1996. Containerized muskmelon transplant: Cell volume effects on transplant development and subsequent yield. *HortScience* 31: 58-61.
- Orzolek, M.D. 1991. Establishment of vegetables in the field. *Hort. Tech.* 1: 78-81.
- Schultheis, J.R. y R.J. Dufault. 1994. Watermelon seedling growth, fruit yield, and quality following pretransplant nutritional conditioning. *HortScience* 29: 1264-1268.
- Segura C., M.A. 1999. Los suelos arcillosos de la zona oriente del estado de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

- Shannon, M.C. 1997. Adaptation of plants to salinity. *Adv. Agron.* 60: 75-120.
- Steiner, A.A. 1973. The selective capacity of tomato plants for ions in a nutrient solution. pp. 43-53. *In: Proceeding 3rd International Congress on Soilless Culture.* Wageningen, The Netherlands.
- Steiner, A.A. 1979. Apuntes del 1er Curso Internacional sobre Hidroponía. *Hidroponía: Fisiología y métodos.* Servicio Agrícola de la Caja Insular de Ahorros de la Gran Canaria. Las Palmas, España.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. pp. 633-649. *Proceeding of the Sixth Int. Congr. on Soilless Culture.* International Society for Soilless Culture. Lunteren, The Netherlands.
- Steiner, A.A. y H. Van Winderen. 1970. Recipe for ferric salt of ethylenediaminetetra acetic acid. *Plant Physiol.* 46: 862-863.
- Tremblay, N. y A. Gosselin. 1989. Growth and nutrient status of celery seedling in response to nitrogen fertilization and $\text{NO}_3:\text{NH}_4$ ratio. *HortScience* 24: 284-288.
- Tremblay, N. y M. Senécal. 1988. Nitrogen and potassium in nutrient solution influence seedling growth of four vegetable species. *HortScience* 23: 1018-1088.
- Vavrina, C.S. 1998. Transplant age in vegetable crops. *Hort. Tech.* 8: 550-555.
- Weston, L.A. y B.H. Zandstra. 1989. Transplant age and N and P nutrition effects on growth and yield of tomatoes. *HortScience* 24: 88-90.

MATERIA SECA, RENDIMIENTO Y CORRIENTE GEOFITOELÉCTRICA EN GIRASOL

Dry Matter, Yield and Geophytoelectrical Current in Sunflower

L. Aguilar García¹, J. Alberto Escalante E.¹, M.T. Rodríguez González¹ y L. Fucikovsky Zak²

RESUMEN

Para lograr un mayor aprovechamiento del agua y de los nutrimentos por el cultivo, el manejo de la densidad de población es una de las prácticas más recomendadas. El objetivo de este estudio fue determinar si la asignación de materia seca y el rendimiento de girasol (*Helianthus annuus* L.) se afectan por el cambio en la densidad de población y si la corriente geofitoeléctrica puede ser un indicador de los cambios en el rendimiento que ocurren en el girasol en relación con la densidad de población. El girasol cv. Victoria se sembró el 26 de mayo de 1999, en Montecillo, México, con tres densidades de población: 2.5 (50*80 cm), 5 (25*80 cm) y 7.5 (33*40 cm) plantas m⁻². El diseño experimental fue bloques al azar. Los resultados muestran que, al elevar la densidad de población, se reduce la biomasa, el área de capítulo, las semillas por capítulo y el rendimiento por planta; sin embargo, la producción de biomasa y el rendimiento de semilla y aceite por unidad de superficie son más altos. También ocurrieron cambios en la corriente geofitoeléctrica. Finalmente, la asignación de materia seca se modifica al incrementar la densidad de población, siendo el tallo el órgano de mayor asignación. Estos resultados sugieren que la corriente geofitoeléctrica puede ser un indicador del cambio en la producción de biomasa y rendimiento por planta que experimenta el girasol al variar la densidad de población.

Palabras clave: (*Helianthus annuus* L.), biomasa, índice de cosecha, tasa de crecimiento, fenología, rendimiento de aceite.

¹Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Texcoco, Edo. de Méx. (garcilag@yahoo.com) (jasee@colpos.colpos.mx)

²Instituto de Fitopatología, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Texcoco, Edo. de Méx.

Recibido: Octubre de 2000. Aceptado: Enero de 2002.
Publicado en Terra 20: 277-284.

SUMMARY

Plant density is one of the best management practices to achieve optimal use of available water and nutriment resources for the crop. The aim of this study was to determine whether dry matter partitioning and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) are affected by changes in plant density, and whether geophytoelectrical currents indicate metabolic changes in yield of sunflower in relation to plant density. The sunflower cv. Victoria was sown on May 26, 1999, in Montecillo, Mexico, with three plant densities 2.5 (50*80 cm), 5 (25*80 cm) and 7.5 (33*40 cm) plants m⁻². The experimental design was a randomized block design. The results show that an increment in plant density reduces biomass and yield per plant; however, biomass, seed yield and oil increase per square meter. Changes also take place in the geophytoelectrical currents. Finally, the dry matter partitioning is modified by the increase in plant density. The stem is the organ with the highest dry matter accumulation. These results suggest that the geophytoelectrical current can be an indicator of a change in biomass production and yield per plant that sunflower undergoes when plant density varies.

Index words: (*Helianthus annuus* L.), biomass, harvest index, growth rate, phenology, oil yield.

INTRODUCCION

El manejo de la densidad de población es una de las prácticas agrícolas más recomendables para lograr un incremento en la productividad de los cultivos, debido a que con un número apropiado de individuos por unidad de superficie, se logra un mejor aprovechamiento de los recursos hídrico y nutrimental.

El mayor crecimiento y rendimiento del cultivo por aumento en la densidad de población es ampliamente señalado para diferentes especies. Por ejemplo, Gitte y Khandagale (1994) señalaron que la

producción de biomasa del algodónero (*Gossipium hirsutum* L.) es más alta al elevar la densidad de población, mientras que el índice de cosecha disminuye. En frijol mungo (*Vigna radiata* L.), cuando se eleva la densidad de población de 33 a 66 plantas m^{-2} , el número de vainas y rendimiento m^{-2} aumentan. Sin embargo, el número de semillas por vaina disminuye (Haqqani y Pandey 1994a,b). Tendencias similares ocurren en ajonjolí (*Sesamum indicum* L.), en el cual el rendimiento de semilla, la biomasa, el índice de cosecha y el contenido de aceite también son mayores con el aumento de la densidad de población (Ghosh y Patra, 1994).

En girasol, Tonev *et al.* (1992) señalaron que, al elevar la densidad de población de 3.5 a 6.5 plantas (pl) m^{-2} , se logra una mayor producción de biomasa total y rendimiento de semilla por superficie. En contraste, rendimiento de semilla y biomasa por planta se reducen al incrementar la densidad de población de 5 a 8 pl m^{-2} (Pasda y Diepenbrock, 1991), por efecto de la interferencia o competencia intraespecífica por espacio y nutrientes (Mane y Jadhav, 1994), que limita la expresión del máximo rendimiento del cultivo (González *et al.*, 1994). En cuanto a los componentes del rendimiento, se ha encontrado que al elevar la densidad de población de 4.9 a 11.1 pl m^{-2} , el peso de 100 semillas, el número de semillas por capítulo y el área de capítulo disminuye (Sarmah *et al.*, 1994). Asimismo, se modifica la asignación de materia seca por órgano; Escalante (1999) reportó que en girasol, cultivado en clima mediterráneo y en condiciones de humedad residual, se incrementa la asignación de materia seca en el tallo y capítulo al elevar la densidad de población de 2.5 a 10 pl m^{-2} , lo mismo ocurre en condiciones de temporal al elevar la densidad de 5.7 a 11.4 pl m^{-2} en clima semiárido (Vega *et al.*, 2001) y clima cálido (Olalde *et al.*, 2000). La disminución en la acumulación de materia seca en las hojas y su incremento en el capítulo sugieren que este último tiene mayor prioridad de asignación de biomasa al incrementar la densidad de población, debido al desarrollo de la semilla (Villalobos *et al.*, 1994). Además, el contenido de aceite en la semilla se incrementa en densidad baja (Vega *et al.*, 2001). El interés de estudiar la densidad de población en este trabajo es determinar si las tendencias señaladas se mantienen, al utilizar densidades más bajas en otras condiciones climáticas.

Por otra parte, la respuesta del girasol al variar la densidad de población es resultado de la alteración en los procesos metabólicos y actividad fisiológica de la

planta, lo cual también se podría evaluar mediante la medición de la corriente geofitoeléctrica (CGFE), definida como la corriente eléctrica generada en un sistema planta-suelo, en un proceso energético y que presenta una alta correlación con la actividad fisiológica de la planta (Rajda, 1992). Dicha corriente se registra como una intensidad eléctrica (amperios) y varía de acuerdo con factores abióticos y bióticos como: especie, etapa de desarrollo, diámetro de tallo, altura de medición y condiciones nutrimentales en que se desarrolle la planta (Rajda, 1992). Este indicador se emplea principalmente en árboles forestales para evaluar el vigor y la respuesta a algún tipo de enfermedad, así como la tolerancia a sales (Tasareva, 1989) y en frutales para medir la sanidad de éstos (Salgado *et al.*, 1995). No se han encontrado evidencias del uso de la corriente geofitoeléctrica como indicador de la variación del crecimiento en cultivos anuales. Así, el objetivo de este trabajo fue determinar si la asignación de materia seca y el rendimiento se afectan por los cambios en la densidad de población y si la corriente geofitoeléctrica puede ser un indicador de los cambios en el crecimiento de girasol.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en Montecillo, México (19°29' N, 98°53' O, a una altitud de 2250 m), que presenta un clima tipo Bs1, el menos seco de los áridos con lluvias en verano, temperatura media anual de 14.6 °C y 558.5 mm de precipitación (García, 1988). El suelo es de textura arcillosa (Fluvisol mólico, Flm), con 2 a 3% de materia orgánica, con un contenido inicial de N de 52 kg ha^{-1} y un pH de 8 en los primeros 30 cm del perfil. La siembra del girasol cv. Victoria se realizó el 26 de mayo de 1999, con tres densidades de población D1 = 2.5 (50*80 cm), D2 = 5.0 (25*80 cm) y D3 = 7.5 (33*40 cm) pl m^{-2} . El diseño experimental fue bloques al azar con cuatro repeticiones. El tamaño de parcela fue de 22.4 m^2 . En el momento de la siembra se fertilizó con 100-100-00, usando como fuentes urea (46% N) y superfosfato de calcio triple (46% P_2O_5), respectivamente. Durante el ciclo de crecimiento del cultivo, se registraron temperatura máxima (T_{máx}, °C) y mínima (T_{mín}, °C), precipitación (pp, mm), evaporación (Ev, mm), y humedad relativa (HR, %). La evapotranspiración del cultivo (ETc) se determinó mediante la expresión:

$$ETc = Ev * ft * kc$$

Donde se utilizó 0.6 como coeficiente del evaporímetro (ft) y 0.8 como coeficiente de cultivo (kc).

La acumulación de calor (UC, °C día⁻¹) se calculó mediante el método residual:

$$UC = (T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}})/2 - t_b$$

Donde: t_b = temperatura base de 6 °C (Merrien, 1986).

Variables Evaluadas

Fenología. Las etapas fenológicas determinadas, según la guía de Schneiter y Miller (1981), fueron: emergencia (fecha en la que al menos 50% de las plántulas han emergido y las primeras hojas verdaderas son menores que 4 cm de longitud, Etapa Ve), aparición de capítulo (fecha cuando al menos 50% de la población presenta la yema terminal en forma de una cabezuela apinada de hojas y que, vista desde arriba, da la apariencia de una estrella, R1), floración (fecha cuando 50% de la población muestra en la periferia del capítulo las lígulas expuestas y turgentes e inicia la antesis, R5) y la madurez fisiológica se registró cuando las brácteas del involucreo y las flores exteriores de la inflorescencia se tornaron amarillas y de color oscuro (R9).

Parámetros de crecimiento. Mediante muestreos periódicos de tres plantas por unidad experimental a 36, 56, 90 y 120 días después de la siembra (dds), se cuantificó la biomasa con base en el peso seco por planta y por unidad de superficie; esto representa la suma de la materia seca acumulada en lámina foliar, tallo (incluyendo pecíolos) y, en su momento, capítulo. Para obtener el peso seco, se colocó material vegetal en una estufa con circulación de aire forzado a 80 °C, por un lapso de 72 h. No se incluyó al sistema radical. La tasa de acumulación de materia seca (T_a , g d⁻¹) se determinó mediante la expresión:

$$T_a = (PS_f - PS_i)/(T_f - T_i)$$

Donde: PS_f = peso seco final; PS_i = peso seco inicial; T_f = tiempo final y T_i = tiempo inicial. A la cosecha (120 dds) se evaluó el área del capítulo ($A = \pi r^2$), el peso seco de receptáculo, el rendimiento (peso de semilla a 10% de humedad) por planta y m², y los componentes del rendimiento: peso de 100 semillas y número de semillas por capítulo (NSC), calculado mediante la expresión:

$$NSC = PSC * 100 / P100S$$

Donde: PSC = peso seco de semilla por capítulo, P100S = peso de 100 semillas.

El contenido de aceite de la semilla (%) se determinó mediante resonancia magnética nuclear, para lo cual se utilizó un analizador Newport, magnet Type 10, Oxford Instruments. El rendimiento de aceite (R_a , g m⁻²) se calculó mediante la ecuación:

$$R_a = (R_s * \%A) / 100$$

Donde: R_s = rendimiento de semilla y $\%A$ = porcentaje de aceite en la semilla.

El índice de cosecha (IC), que indica la proporción de materia seca acumulada en la semilla en relación con la materia seca total, con la ecuación:

$$IC = \text{materia seca en la semilla} / \text{materia seca total}$$

La asignación de biomasa por órgano mediante la siguiente expresión:

$$\text{Biomasa por órgano} / \text{biomasa} * 100$$

y se expresó en porcentaje.

Para cada densidad, se registró la corriente geofitoelectrónica (microamperes, μA) en cinco plantas a 61, 73, 83, 97 y 119 dds con un amperímetro manual conectado a dos sondas de aluminio mediante cables. La primera sonda de 60 cm se enterró a una profundidad de 30 cm y a una distancia de 1 a 3 m de la planta a medir. La segunda sonda, de menor tamaño, se insertó en la corteza hasta alcanzar el *cambium* vascular de la planta a la altura de la corona (punto de transición entre la parte radical y el vástago), que es el punto donde se obtiene la lectura más alta (Rajda, 1992). A las variables en estudio se les aplicó un análisis de varianza y a las que mostraron diferencias significativas se les realizó una prueba de comparación de medias (Tukey 0.05), mediante el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1985).

RESULTADOS Y DISCUSION

Condiciones Ambientales

En la Figura 1, se muestra la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) y mínima ($T_{\text{mín}}$), (media semanal) y la precipitación (suma semanal); se observa que la

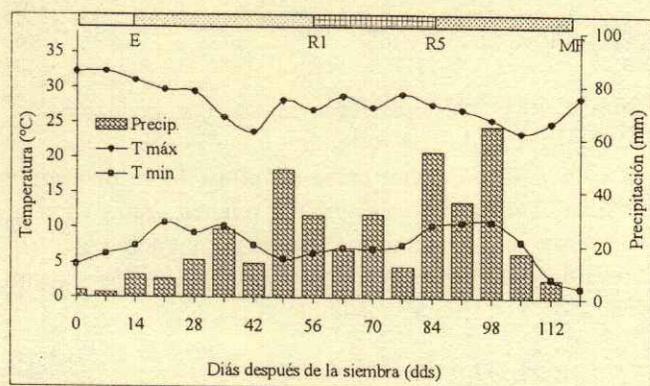


Figura 1. Temperatura máxima y mínima (promedio semanal) y precipitación (suma semanal) durante el ciclo de cultivo del girasol cv. Victoria, Montecillo, México.

E = emergencia, R1 = Aparición de capítulo, R5 = inicio de floración y MF = madurez fisiológica (Siembra: 26 de mayo de 1999).

temperatura presentó un descenso en el tiempo. Así, durante la etapa de siembra a emergencia, la T máx y T mín promedio fueron de 31 y 7 °C, respectivamente. De emergencia a aparición de capítulo (R1), la T máx y T mín fueron 28 y 9 °C. De aparición de capítulo a inicio de floración, la T máx y T mín fueron de 27 y 9 °C, respectivamente. Durante la etapa de inicio de floración a madurez fisiológica, la temperatura alcanzó un máximo de 25 °C y un mínimo de 6 °C. La precipitación y la evapotranspiración (ETc) estacional fueron de 394 mm y 370 mm, respectivamente. La radiación estacional fue de 2155 MJ y la acumulación de calor del cultivo fue de 1435 (°C d⁻¹, tb = 6).

Fenología. No se observaron cambios en la fenología del girasol por efecto de la densidad de población. Así, el periodo de siembra a emergencia duró 12 días. De emergencia a aparición de capítulo (R1) fue de 44 días. De aparición de capítulo a inicio de floración (R5) fue de 28 días y el periodo de inicio de floración a madurez fisiológica duró 33 días. De esta manera, el ciclo biológico fue de 117 días.

Producción de Biomasa y su Asignación en los Organos de la Planta

Las plantas en densidad alta mostraron tasas de acumulación de materia seca bajas, debido a la mayor interferencia por luz, agua y nutrimentos (Escalante, 1999). Así, de 56 a 90 dds, la tasa de acumulación de materia seca fue de 6.2, 3.8 y 3.4 g pl⁻¹ d⁻¹; y de 90 a 120 dds fue de 3.5, 3.4 y 3.1 g pl⁻¹ d⁻¹ para las densidades 2.5, 5.0 y 7.5 pl m⁻², respectivamente. Esto se reflejó en una producción de materia seca total por

planta más baja en el girasol en densidad alta (Figura 2). No obstante, el mayor número de plantas en esta densidad condujo a una biomasa m⁻² más alta. De esta manera, la biomasa a la cosecha fue de 908, 1396 y 1924 g m⁻², para 2.5, 5.0 y 7.5 pl m⁻², respectivamente. Respuestas similares encontró Escalante (1999) en los cultivares (cvs.) de girasol Sungro 380 y ABE353, en condiciones de humedad residual; Villalobos *et al.* (1992) en los cvs. Arbung E353, Sungro 385 y S530 con riego; Sarmah *et al.* (1994) en los cvs. Ec 68415C; Vega *et al.* (2001) en girasol cv. Victoria en temporal.

Tendencias similares se encontraron en la acumulación de biomasa en cada órgano del girasol (Figuras 3a, b y c). El tallo fue el órgano que mostró mayor acumulación de biomasa, siendo de 142, 132 y 129 g pl⁻¹ y 356, 645 y 989 g m⁻² a la cosecha para 2.5, 5.0 y 7.5 pl m⁻², respectivamente. La lámina foliar mostró una tendencia similar al tallo, donde la mayor acumulación se alcanzó a 90 dds con 57, 38 y 31 g pl⁻¹ y de 143, 191 y 232 g m⁻² para 2.5, 5.0 y 7.5 pl m⁻², respectivamente; para posteriormente disminuir debido a la translocación de materia seca hacia los órganos de demanda. En la Figura 3, se observa que el capítulo, en las densidades estudiadas, acumuló materia seca a partir de su aparición hasta alcanzar su valor máximo a la cosecha, con 163, 113 y 95 g pl⁻¹ y 408, 564 y 712 g m⁻² para 2.5, 5.0 y 7.5 pl m⁻², respectivamente. El aumento en la densidad limitó el crecimiento del capítulo, por lo cual en densidad alta se obtuvo un capítulo más pequeño y, en consecuencia, una acumulación de materia seca más

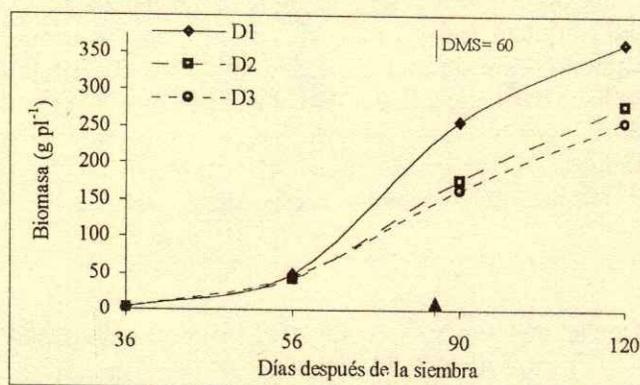


Figura 2. Dinámica de la acumulación de biomasa por planta en girasol cv. Victoria, en función de la densidad de población en Montecillo, México, 1999.

Cada punto es promedio de cuatro repeticiones. Las flechas muestran emergencia e inicio de floración. La barra vertical representa la DMS.

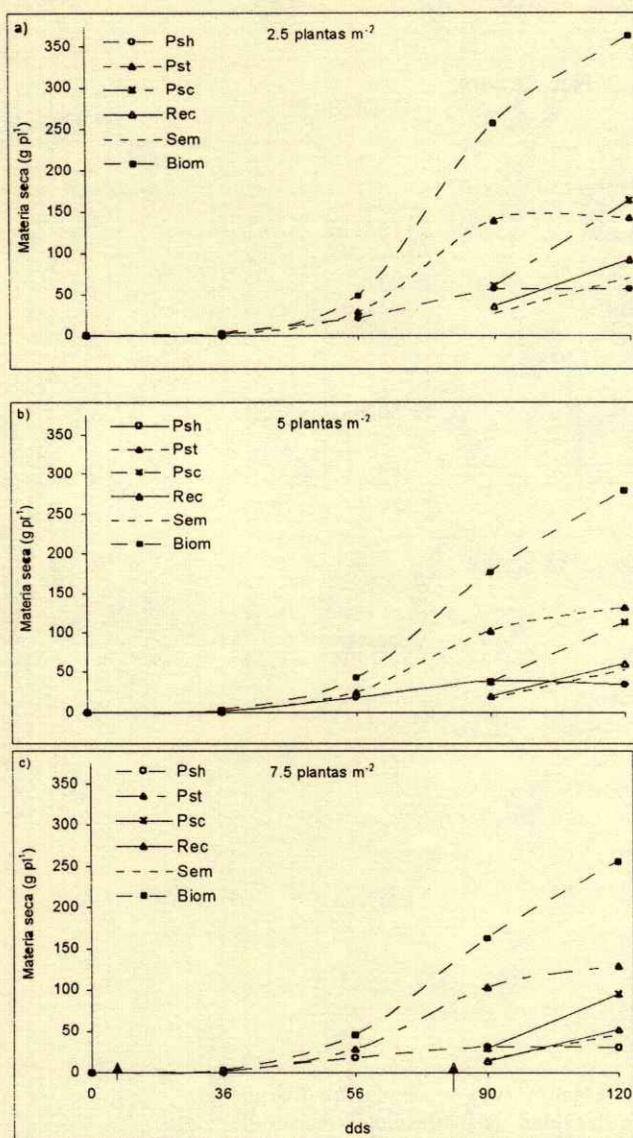


Figura 3 a, b y c. Dinámica de acumulación de materia seca total y en cada órgano de la planta del girasol cv. Victoria en función de la densidad de población. Datos promedio de cuatro repeticiones. Montecillo, Méx. 1999. Las flechas indican emergencia e inicio de floración. Psh = peso seco de hoja, Pst = peso seco de tallo, Psc = peso seco de capítulo, Rec = peso seco de receptáculo sin semilla, Sem = semilla y Biom = Biomasa total.

baja. No obstante, el mayor número de plantas por m² compensó esta limitación por lo que la acumulación de materia seca por capítulos por m² fue mayor en densidad alta. De manera similar, el peso del receptáculo por planta fue de 92, 60 y 52 g pl⁻¹; y 231, 302 y 369 g m⁻² para 2.5, 5.0 y 7.5 pl m⁻², respectivamente. La disminución de la acumulación de materia seca en el capítulo por planta al

incrementar la densidad de población, puede ser producto de una mayor redistribución de asimilados hacia la semilla, o bien, éstos pueden ser utilizados en la síntesis de aceite, lo que ocasiona un incremento en el contenido de aceite en la semilla. El rendimiento agronómico por planta también mostró una tendencia a disminuir conforme se incrementó la densidad de población; la variación encontrada fue de 71, 52 y 46 g pl⁻¹ para 2.5, 5.0 y 7.5 pl m⁻², respectivamente. En contraste, el rendimiento por m² se incrementó, debido a que el mayor número de plantas por m² compensó la reducción en el rendimiento por planta y así con 2.5, 5 y 7.5 pl m⁻² se lograron 177, 262 y 343 g de semilla m⁻², respectivamente.

En cuanto a la asignación (%) de materia seca a la cosecha en cada órgano de la planta, en general se observó que el tallo fue el órgano que mostró mayor asignación de materia seca, seguido de receptáculo, semillas y lamina foliar. Al elevar la densidad de población, la asignación de materia en tallo fue más alta con 39, 47 y 50%, para 2.5, 5.0 y 7.5 pl m⁻², mientras que se redujo de 16 a 12% en lámina foliar y de 26 a 20% para receptáculo. En semilla, la asignación fue de 19 y 18% (Figura 4).

En los componentes del rendimiento por planta, al elevar la densidad de 2.5 a 5.0 y 7.5 pl m⁻², el área de capítulo se redujo de 378 a 299 y 252 cm²; el peso de 100 semillas de 5.9 a 6.4 y 5.2 g y el número de semillas por capítulo de 899, 831 y 882, respectivamente (Cuadro 1). El aumento en el número de plantas de 5 a 7.5 pl m⁻² condujo a que el rendimiento por m² se incrementara en 48 y 94%, respectivamente, con relación a la densidad baja (177 g m⁻²). Estos datos concuerdan con lo señalado en girasol por Escalante (1999) en los cvs. Sungro 380 y ABE353, en condiciones limitantes de agua; Villalobos *et al.* (1992) en los cvs. ABE353, Sungro 385 y S530; Sarmah *et al.* (1994) en los cvs. Ec 68415C y Modern; Vega *et al.* (2001) en cv. Victoria. El número de semillas por m² fue el componente que mostró la relación más alta con el rendimiento ($r^2 = 0.92, **$). El IC no mostró cambios significativos, debido a la variación en la densidad de población, siendo éste en promedio de 0.19 (Cuadro 1).

Contenido y Rendimiento de Aceite

El contenido de aceite en la semilla se incrementó de 40 a 44 y 45% al elevarse la densidad de 2.5 pl m⁻² a 5 y 7.5 pl m⁻². En contraste, el rendimiento de aceite por planta disminuyó al incrementar la densidad de

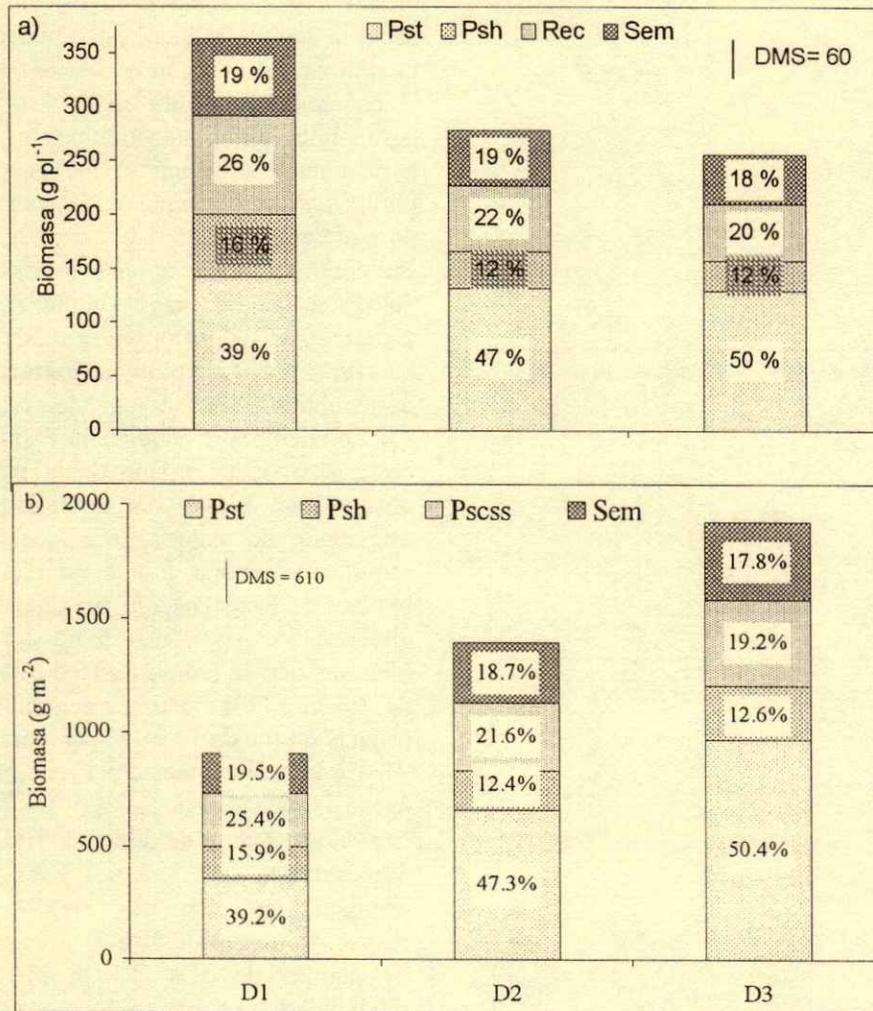


Figura 4. Biomasa total a la cosecha por planta (a), por m² (b) y su asignación (%) por órgano en girasol cv. Victoria en función de la densidad de población. Promedio de cuatro repeticiones. Montecillo, Méx. México. 1999. Psh = peso seco de hoja, Pscss = peso seco de capítulo sin semilla, Pst = peso seco de tallo, Rec = receptáculo y Sem = semilla. La barra vertical representa la DMS.

población y fue de 28, 23 y 20 g pl⁻¹, respectivamente. Por otro parte, el rendimiento de aceite por m² fue más alto en densidades altas, encontrándose valores de 71, 115 y 153 g m⁻² para 2.5, 5.0 y 7.5 pl m⁻², respectivamente (Cuadro 2); esto puede atribuirse al mayor rendimiento de semilla por metro cuadrado, obtenido en la densidad alta.

Corriente Geofitoeléctrica del Cultivo

La corriente geofitoeléctrica (CGFE) en la planta presentó variación a través del tiempo y por efecto de la densidad de población. La máxima CGFE se

encontró durante el periodo de floración (84 a 97 dds), con 251, 245 y 177 μ A para 2.5, 5.0 y 7.5 pl m⁻², respectivamente (Figura 5). Esto indica que durante la floración sucede la mayor actividad fisiológica de la planta. Posteriormente, la actividad decrece, lo cual se refleja en una reducción de la CGFE. La planta, en la más alta densidad, mostró la CGFE más alta, lo que sugiere una mayor actividad fisiológica, debida al menor estrés causado por la competencia intraespecífica; esto puede apreciarse en la acumulación de materia seca por planta, la cual fue mayor en las densidades bajas (Figura 5).

Cuadro 1. Biomasa, rendimiento de semilla por planta (pl) y m², peso de 100 semillas, número de semillas por capítulo y por m², área de capítulo (AC) e índice de cosecha (IC), en girasol cv. Victoria, en función de la densidad de población. Montecillo, México. 1999.

Tratamiento pl m ⁻²	Biomasa		Rend. de semilla		P100s g	Núm. de semillas		AC cm ²	IC
	pl ⁻¹	m ⁻²	pl ⁻¹	m ⁻²		capítulo	m ⁻²		
2.5	363.0	907.4	70.7	176.8	5.9	899.8	2249.5	378.5	0.195
5	279.2	1395.9	52.3	261.7	6.4	830.9	4154.3	298.9	0.193
7.5	256.5	1923.7	45.7	342.9	5.2	881.9	6614.5	252.5	0.185
Prob F	**	***	** (12.6)	** (52.7)	ns	ns	** (1040)	** (49)	ns

ns, indica diferencia no significativa; **, *** indica P < 0.01 y 0.001, respectivamente.

Cuadro 2. Contenido de aceite (%) y rendimiento de aceite (g) por planta y por m², en girasol cv. Victoria en función de la densidad de población.

Tratamiento pl m ⁻²	Contenido de aceite		Rendimiento de aceite	
	%		pl ⁻¹	m ⁻²
2.5	40 b		28 a	71 c
5	44 a		23 ab	115 b
7.5	45 a		20 b	153 a
Prob F	** (3.6)		*** (5.6)	*** (24)

, *, indica P < 0.01 y 0.001, respectivamente.

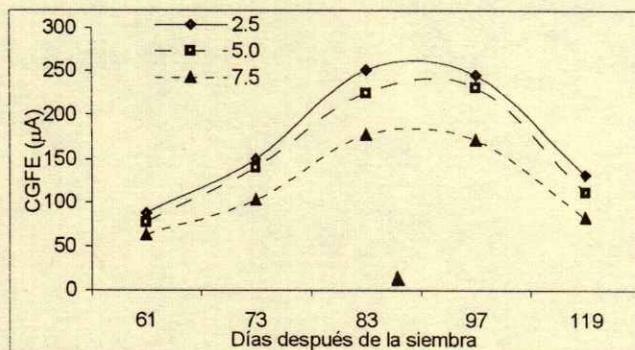


Figura 5. Corriente geofitoeléctrica del girasol en función de la densidad de población, a través del desarrollo del cultivo. Cada punto es promedio de cinco repeticiones. La flecha muestra el inicio de floración. Montecillo, México. 1999.

En resumen, se observó una tendencia de reducción en la biomasa y rendimiento por planta, y en la corriente geofitoeléctrica al elevarse la densidad de población de 2.5 a 7.5 pl m⁻². Esto sugiere que la corriente geofitoeléctrica pueda ser indicador de los cambios en rendimiento por planta del girasol. Sin embargo, se requiere de más estudios para encontrar el mejor modelo de predicción. Por otra parte, el aumento en densidad del girasol conduce a un mayor rendimiento por unidad de superficie. Asimismo, la asignación de materia seca (%) en los órganos de la

planta es afectada por los cambios en densidad de población, de tal forma, que en el tallo se observa una mayor asignación de materia seca con relación al resto de los órganos de la planta. Con respecto a la acumulación de materia seca (g) en cada órgano, ésta tiende a disminuir conforme se eleva la densidad. En contraste, la acumulación de materia seca por unidad de superficie se incrementa.

CONCLUSIONES

- La producción de biomasa, el índice de cosecha, el rendimiento y la corriente geofitoeléctrica por planta disminuyeron, mientras que el contenido de aceite en la semilla se incrementó al elevar la densidad de población.
- La producción de biomasa y el rendimiento por m² se incrementaron al elevar la densidad de población.
- El tallo, en relación con el resto de órganos de la planta, muestra mayor acumulación y asignación de materia seca y ésta se incrementa al elevar la densidad de población.
- La corriente geofitoeléctrica puede ser un indicador de los cambios en el rendimiento de girasol.

LITERATURA CITADA

- Escalante, J.A. 1999. Área foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra* 17: 149-157.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4a ed. Offset Larrios. México, DF.
- Ghosh, D.C. y A.K. Patra. 1994. Effects of plant density and fertility levels on productivity and economics of summer sesame (*Sesamum indicum*). *Indian J. Agron.* 39: 71-75.
- Gitte, A.N. y G.B. Khandagale. 1994. Growth parameters controlling biomass production in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Ann. Plant Phys.* 8: 157-160.
- González, J.L., A.A. Schneiter, N.R. Riveland and B.L. Johnson. 1994. Response of hybrid and open pollinated safflower to plant population. *Agron. J.* 86: 1070-1073.

- Haqqani, A.M. y R.K. Pandey. 1994a. Response of mung bean to water stress and irrigation at various growth stages and plant densities. I. Plant and crop growth parameters. *Tropical Agric.* 71: 281-288.
- Haqqani, A.M. y R.K. Pandey. 1994b. Response of mung bean to water stress and irrigation at various growth stages and plant densities. II. Yield and yield components. *Tropical Agric.* 71: 289-294.
- Mane, V.S. y A.S. Jadhav. 1994. Effects of fertilizers and plant densities on growth and yield of irrigated safflower (*Carthamus tinctorius*). *Indian J. Agron.* 39: 79-82.
- Merrien, A. 1986. Cahier technique tournesol. Physiologie. CETIOM. Paris.
- Olalde G., V.M., J.A. Escalante Estrada, P. Sánchez García, L. Tijerina Chávez, E.M. Engleman Clark y A.A. Mastache Lagunas. 2000. Eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno, y rendimiento del girasol, en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido. *Terra* 18: 51-59.
- Pasda, G. y W. Diepenbrock. 1991. Physiological yield analysis of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Part III. Agronomic factors and production techniques. *Fett-Wissenschaft Technologie* 93(7): 235-243.
- Rajda, V. 1992. Electrodiagnostics of the health of oak trees. *Acta Scientiarum Naturalium*, Brno. 26: 1-40.
- Salgado, M. L., V. Rajda y L. Fucikovsky Z. 1995. Medición del flujo geofitoeléctrico en la fitosanidad en frutales. Memoria Fundación Salvador Sánchez Colin, México. Cictamex S.C. Coatepec de Harinas, Estado de México.
- Sarmah, P.C., S.K. Katyal y A.S. Forada. 1994. Response of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars to fertility level and plant population. *Indian J. Agron.* 39: 76-78.
- SAS Institute Inc. 1985. SAS/STAT. Guide for personal computers. Version 6. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Schneider, A.A. y J.F. Miller. 1981. Description of sunflower growth stages. *Crop Sci.* 21: 901-903.
- Tasareva, R.P. 1989. Method for the rapid evaluation of salt resistance in clones of polar. pp. 25-30. *In: Lesnya genetika, selekticiya i fiziologiya drevesnykh rastenii.* Voronezhm: Sentyabrya.
- Tonev, T., K. Tsvetanova y M. Angelova. 1992. Effect of nitrogen rate and stand density on some indices of photosynthesis in sunflower. *Rasteniev'dni Nauki.* 29(5-6): 35-42.
- Vega M., R., J.A. Escalante E., P. Sánchez García, C. Ramírez Ayala y E. Cuenca Adame. 2001. Asignación de biomasa y rendimiento de girasol con relación al nitrógeno y densidad de población. *Terra* 19: 75-81.
- Villalobos, F.J., V.O. Sadras, A. Soriano y E. Fereres. 1992. Effects of plant population and genotype on sunflower dry matter partitioning and yield. pp. 144-145. *In: Proceedings Second Congress of the European Society for Agronomy.* Warwick University. Warwick, UK.
- Villalobos, F.J., V.O. Sadras, A. Soriano y E. Fereres. 1994. Planting density effects on dry matter partitioning and productivity on sunflower hybrids. *Field Crop Res.* 36: 1-11.

RESPUESTA DE LA VID A TRES TENSIONES DE HUMEDAD DEL SUELO EN POSTCOSECHA

Response of Grapevines to Three Soil Moisture Tensions after Harvest

Claudio Godoy Avila¹, Isaías López Montoya¹ e Isidro Reyes Juárez¹

RESUMEN

Durante el otoño, la defoliación en las plantas de vid y la presencia de un elevado contenido de humedad en el suelo favorecen su rebrotación y se estimula el uso de carbohidratos, lo que hace a las yemas más susceptibles al daño por las bajas temperaturas del invierno; este efecto provoca que al año siguiente disminuya la brotación y producción de uva. Durante los ciclos 1997-1998 y 1998-1999, se realizó un estudio cuyo objetivo fue evaluar el efecto de la tensión de la humedad del suelo en la defoliación y rebrotación en plantas de vid (*Vitis vinifera* L.) y sus efectos en la brotación y producción del año siguiente. Después de la cosecha, plantas de vid se sometieron a tres tensiones de humedad del suelo que fueron: -0.3, -0.6 y -0.9 MPa. Se evaluaron: agua consumida, porcentaje de defoliación, número de rebrotes por brote, peso seco de rebrotes, yemas dañadas, porcentaje de brotación, número de racimos por planta y rendimiento. Se utilizó un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. Las plantas que recibieron mayor cantidad de agua durante el otoño (-0.3 y -0.6 MPa) retuvieron por más tiempo el follaje, sin embargo, mostraron más rebrotes (número y peso seco) que las plantas sujetas a una tensión de -0.9 MPa, lo que aumentó la susceptibilidad de las yemas a las bajas temperaturas durante el período invernal y afectó la brotación y la producción en 45 y 46%, respectivamente, para los años siguientes. Las deficiencias de agua (-0.9 MPa) resultaron ser efectivas para inducir una temprana y mayor brotación.

Palabras clave: *Vitis vinifera* L., defoliación, rebrotación, brotación, carbohidratos.

¹ Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Comarca Lagunera. Apartado Postal 247, 27000 Torreón, Coah. Tel. (871) 7620202 al 05, Fax: (871) 7620715. (ferti@halcon.laguna.ual.mx)

Recibido: Noviembre de 2000. Aceptado: Diciembre de 2001.
Publicado en Terra 20: 285-290.

SUMMARY

During autumn, leaf fall and high soil moisture favor the growth of lateral shoots of grapevines and stimulates the use of carbohydrates, making buds more susceptible to low winter temperatures. This effect causes the next year's bud break and grape production to decrease. In the growing seasons 1997-1998 and 1998-1999, a study was conducted to evaluate the effect of soil moisture tension on leaf drop and growth of new lateral shoots in grapevines (*Vitis vinifera* L.), and its effect on bud break and yield of the following year. After harvest, grapevines were subjected to three soil moisture tensions (-0.3, -0.6, and -0.9 MPa). Water consumption, leaf fall percent, number of lateral shoots per shoot, lateral shoot dry weight, bud break percent, number of clusters, and yield (t ha⁻¹) were evaluated. The experimental design was a randomized complete block with four replications. Vines that received more water during autumn (-0.3 and -0.6 MPa) retained foliage longer. However, they had more lateral shoots (number and dry weight) than those that were subjected to a tension of -0.9 MPa, which increased susceptibility of their buds to low temperatures during the winter and affected bud break and yield by 45 and 46%, respectively, in the following years. Water stress (-0.9 MPa) enhanced early bud break and increased total bud break.

Index words: *Vitis vinifera* L., leaf fall, lateral shoot, bud-burst, carbohydrates.

INTRODUCCION

En áreas semi-desérticas, las necesidades hídricas de la vid (*Vitis vinifera* L.), aun cuando sean bajas, se extienden hasta la postcosecha, ya que se requiere que la planta complete, en forma adecuada, el segundo crecimiento de raíces, no se defolie y sus hojas sigan realizando fotosíntesis para mantener y completar las reservas de carbohidratos que utilizará en el siguiente ciclo (Kliwer, 1981; Edwards, 1987; Williams *et al.*,

1994; Kamande *et al.*, 1996). Sin embargo, las altas temperaturas presentes durante el otoño, así como la presencia de organismos dañinos que causan defoliación y el alto contenido de humedad en el suelo, favorecen el desarrollo de nuevos brotes. Esto último provoca un gasto considerable de carbohidratos (Winkler *et al.*, 1974; Obando y Mancilla, 1975; Godoy, 1985; Neja *et al.*, 1994). En estas condiciones, aumenta la susceptibilidad de la vid a las bajas temperaturas del invierno y disminuye la brotación de las yemas al año siguiente, lo que supone el deterioro de la estructura permanente de la planta y repercute en una baja producción de uva (Osterass, 1962; Fogliani *et al.*, 1983; Hubáckova y Hubáček, 1984; Samtsyan *et al.*, 1984; Miller *et al.*, 1988; Hamman *et al.*, 1990). El crecimiento de los nuevos brotes puede evitarse, manteniendo un bajo contenido de humedad en el suelo. Estudios realizados por Williams *et al.* (1991), Stern *et al.* (1993), Neja *et al.* (1994), Ndung'u *et al.* (1995) y Kamande *et al.* (1996, 1997) han demostrado que someter a plantas de vid a un estrés severo de agua después de la cosecha es efectivo para inducir una temprana y mayor brotación, lo cual puede contribuir a solucionar el problema de brotación errática en regiones vitícolas con baja acumulación de horas frío.

Por lo anterior, se realizó, durante dos años, un estudio en plantas de vid con el objetivo principal de cuantificar el efecto de diferentes condiciones de humedad en el suelo en postcosecha sobre la defoliación y rebrotación y su repercusión en la brotación y producción en los años siguientes.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó durante los ciclos 1997-1998 y 1998-1999 en el Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de la Comarca Lagunera, ubicado en Matamoros, Coahuila, México, en un suelo de textura migajón-arcillo-arenosa, plantado con el cv. Carignane sobre su propio pie en 1992, con una densidad de 1538 plantas por hectárea (3.25 m entre hileras y 2 m entre plantas), formado en cordón bilateral, poda a pulgares y espaldera en telégrafo con tres alambres. Antes de iniciar el experimento, se tomaron muestras del suelo para determinar la curva característica de retención de humedad por el método de la cámara de presión, propuesto por Richards (1944). El lote experimental se irrigó mediante el método superficial con agua proveniente del subsuelo.

En la etapa de brotación-cosecha (marzo-julio), el experimento se manejó con un criterio de riego uniforme, el cual consistió en usar 40% de la evapotranspiración (ET) desde la brotación a la floración (15 de marzo a finales de abril), mientras que durante el crecimiento y desarrollo del fruto (primera semana de mayo a finales de julio) se utilizó 60% de la ET (Godoy, 1985). Después de la cosecha, se aplicó un riego a todos los tratamientos y se empezó a medir la tensión de la humedad en el suelo. Se estudiaron tres tratamientos que consistieron en aplicar los riegos cuando en el estrato de 0 a 90 cm se alcanzaron valores de -0.3, -0.6 y -0.9 MPa de tensión de la humedad en el suelo, lo cual correspondió a encontrar valores de 26, 22 y 17.5% de humedad base peso seco, respectivamente.

La parcela total constó de cuatro hileras de 20 plantas cada una y la parcela útil quedó constituida por 12 plantas de las dos hileras centrales, las cuales se seleccionaron por las características de vigor (número y diámetro de los brotes) y rendimiento alcanzado en el año previo (1996) a la realización del presente estudio. Se utilizó un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones.

El agua consumida se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$AC = (A_1 - A_2) (D_a) (P_r)$$

Donde: AC = agua consumida (cm), A_1 = humedad anterior (%), A_2 = humedad actual (%), D_a = densidad aparente del suelo ($g\ cm^{-3}$), P_r = profundidad radical (cm).

Para cuantificar la dinámica de defoliación, se seleccionaron 80 brotes por tratamiento, a los cuales semanalmente se les contó el número de hojas caídas. Los valores anteriores se relacionaron con el número total de hojas, para así determinar el porcentaje de defoliación. A partir de la segunda semana de agosto y hasta finales de noviembre, en estos mismos brotes se contó semanalmente el número de rebrotes y siete días antes de que se registrara la primera helada (28 y 30 de noviembre para 1997 y 1998, respectivamente), dichos rebrotes se recolectaron y se determinó su peso fresco y peso seco.

Durante la segunda semana de febrero del siguiente año, se muestrearon las yemas en los primeros 10 cm por encima de las dos yemas basales de las cañas y se les realizaron cortes horizontales para observarlas al microscopio, para determinar si los

conos vegetativos presentaban tejido necrosado, lo cual es un síntoma del daño que provocan las bajas temperaturas durante el invierno.

El número de yemas dejadas en el momento de podar se determinó con base en la capacidad productiva de cada planta; éste se ajustó a 18 yemas por kilogramo de madera podada (Mancilla, 1996).

Iniciada la brotación, cada 72 h se registró la evolución de la misma, mediante el conteo del número de yemas brotadas sobre un total de 160 yemas por tratamiento dejadas *ex profeso*.

La cosecha se realizó cuando las uvas alcanzaron 18 °Brix; entonces se procedió a registrar el número de racimos y los kilogramos de uva por planta y tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los datos del Cuadro 1 muestran que las fechas de aplicación de los riegos fueron muy similares durante los dos ciclos que abarcó el estudio, con la única diferencia de que en 1998-1999 los riegos se aplicaron en fechas más tempranas; el agua consumida durante este período y el total por ciclo fueron un poco mayores.

Los mayores consumos de agua se registraron en los tratamientos de -0.3 y -0.6 MPa, en los cuales las plantas utilizaron más agua durante el tiempo en que tuvieron más hojas. Por otro lado, el bajo consumo de agua en el tratamiento de -0.9 MPa se debió a que en la fecha en que se aplicó el riego, las plantas mostraban cerca de 90% de defoliación, y la cantidad de agua consumida se debió principalmente a la evaporación directa del suelo.

La dinámica de defoliación durante el ciclo 1997-1998 fue similar entre tratamientos y no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre ellos. En el ciclo 1998-1999, aun cuando se presentó la misma tendencia, se detectaron en algunas fechas de muestreo diferencias estadísticamente

significativas (Cuadro 2), ya que las plantas del tratamiento de -0.3 MPa lograron conservar el follaje por más tiempo en comparación con las plantas de los tratamientos de -0.6 y -0.9 MPa. Como puede observarse en el Cuadro 2, para el 24 de octubre las plantas de los últimos dos tratamientos alcanzaron valores de defoliación cercanos a 100%, mientras que las del primero alcanzaron valores de 80%. Cabe hacer notar que poco antes de la fecha (15 de octubre) en que se detectaron diferencias estadísticamente significativas, el tratamiento de -0.6 MPa había recibido un riego, mientras que el tratamiento de -0.9 MPa no había recibido ninguno (Cuadro 1). Los resultados anteriores permiten afirmar que la baja disponibilidad de agua en el suelo aceleró la caída de las hojas, como sucedió en los tratamientos de -0.9 y -0.6 MPa.

En el ciclo 1997-1998, después de la aplicación del riego de postcosecha y hasta la segunda semana de octubre, la dinámica de rebrotación fue similar en los tres tratamientos evaluados. Sin embargo, al aplicar el primer riego en los tratamientos de -0.3 y -0.6 MPa, la rebrotación se incrementó significativamente. Después, en la segunda y tercera semana de noviembre, se aplicó el primer y segundo riego en los tratamientos de -0.9 y -0.3 MPa, respectivamente, y se observó un incremento no significativo en la rebrotación para estos dos tratamientos.

En el ciclo 1998-1999, se observó una tendencia similar a la del ciclo anterior y se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, ya que las plantas de los tratamientos de -0.3 y -0.6 MPa, regadas el 3 y 15 de octubre, respectivamente (Cuadro 1), presentaron mayor número de rebrotes en comparación con las del tratamiento de -0.9 MPa que para esas fechas todavía no se regaba (Cuadro 3). Cuando se aplicó el riego del 15 de octubre al tratamiento de -0.6 MPa, se incrementó el número de rebrotes/brote, lo mismo ocurrió cuando el riego se aplicó al tratamiento de

Cuadro 1. Número y fecha de aplicación de riegos y agua consumida en postcosecha y total por ciclo por la vid con tres tensiones de humedad en el suelo durante dos ciclos.

Tratamiento (MPa)	Número de riegos	Fecha de aplicación		Agua consumida			
		1997 - 1998	1998 - 1999	1997 - 1998	Lámina total	1998 - 1999	Lámina total
----- cm -----							
-0.3	2	7 de oct. y 16 de nov.	3 de oct. y 8 de nov.	28.5	68.5	30.7	73.7
-0.6	1	17 de oct.	15 de oct.	20.7	60.7	23.9	66.9
-0.9	1	10 de nov.	7 de nov.	15.3	55.3	18.1	58.1

Cuadro 2. Defoliación registrada en diferentes fechas en el cultivo de la vid con tres tensiones de humedad del suelo durante el otoño 1997-1998.

Tratamiento (MPa)	Defoliación		
	10 de oct.	24 de oct.	22 de nov.
	----- % -----		
-0.3	62.3	80.8 b*	96.3
-0.6	66.0	97.5 a	100.0
-0.9	67.6	98.6 a	100.0
CV (%)	26.9	6.03	6.79

* Medias con letras iguales son similares entre sí (Tukey, 0.05).

-0.3 MPa el día 8 de noviembre. El riego aplicado el 7 de noviembre al tratamiento de -0.9 MPa no tuvo un efecto significativo en el incremento en el número de rebrotes. Estos resultados coinciden con los encontrados por algunos autores (Kasimatis, 1966; Neja *et al.*, 1994; Kamande *et al.*, 1996) referente a que las plantas de vid que crecen en climas semi-desérticos, como es el caso de la Comarca Lagunera, requieren más agua después de la cosecha, para mantener el área foliar ya establecida, y así completar las reservas de carbohidratos que las plantas utilizarán en el siguiente ciclo. Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos, si a las plantas de vid se les incrementa la disponibilidad de agua después de la cosecha, sobre todo en el período de máxima defoliación, continúan creciendo y empiezan a rebrotar, haciendo uso de los carbohidratos almacenados.

Respecto al peso seco de los rebrotes, se detectaron diferencias estadísticamente significativas en los dos ciclos. Se observó que el peso seco fue estadísticamente significativo y menor en el tratamiento de -0.9 MPa que en los tratamientos de -0.3 y -0.6 MPa, los cuales, a su vez, fueron estadísticamente iguales entre sí. Esta circunstancia indica que los rebrotes en los tratamientos de -0.3 y -0.6 MPa tuvieron más tiempo para incrementar su

peso seco a partir de la aplicación del riego y hasta la fecha en que se realizó la evaluación de esta variable.

En lo que se refiere al porcentaje de yemas dañadas, se detectaron diferencias estadísticamente significativas en los dos ciclos de estudio (Cuadro 4). Se observó que en los tratamientos de -0.3 y -0.6 MPa, en los que se aplicaron más riegos y en fechas más tempranas durante el otoño, se incrementó de forma significativa el porcentaje de yemas dañadas por las bajas temperaturas que tuvieron lugar durante el invierno, lo cual propició una disminución de 45% en la brotación, que fue estadísticamente diferente en los dos ciclos que comprendió el presente estudio. Las diferencias detectadas en estas variables durante los dos ciclos afectaron al número de racimos y las toneladas de uva por hectárea, ya que se encontraron diferencias significativas a favor del tratamiento de -0.9 MPa, el cual superó en 46% a los tratamientos de -0.3 y -0.6 MPa, mismos que fueron estadísticamente iguales (Cuadro 5).

En la Figura 1, se muestra la dinámica de brotación para los tres tratamientos estudiados. Se encontró que las plantas de vid regadas durante el otoño a una tensión de -0.9 MPa, presentaron una brotación más alta y temprana que la mostrada por las plantas regadas a una tensión de -0.3 y -0.6 MPa, tratamientos para los que esta variable presentó un marcado retraso. Este mejoramiento en la brotación por medio de un estrés de agua tiene un fuerte soporte en el contenido de nitrógeno más que en el de carbohidratos. En otros estudios (Srinivasan y Mullins, 1981; Mullins *et al.*, 1992; Keller y Koblet, 1995; Ndung'u *et al.*, 1997) se ha encontrado que al final del otoño y al inicio de la brotación del siguiente año, el contenido total de nitrógeno y la proporción de nitrógeno soluble a nitrógeno total en las partes permanentes son significativamente más altos en plantas bajo estrés, ya que el nitrógeno se moviliza de las hojas en senescencia a las partes permanentes

Cuadro 3. Número y peso seco de rebrotes por brote en la vid con tres tensiones de la humedad del suelo durante dos ciclos.

Tratamiento (MPa)	Número de rebrotes por brote				Peso seco de rebrotes	
	1997-1998 22 de nov.	10 de oct.	25 de oct.	21 de nov.	1997-1998	1998-1999
	----- g -----					
-0.3	4.9	2.05 a	2.40 a	4.6 a	5.50 a	7.76 a*
-0.6	4.5	0.50 a	2.10 a	3.9 a	5.10 a	4.98 a
-0.9	1.2	0.10 b	0.20 b	0.80 b	0.90 b	0.88 b
CV (%)	10.9	13.2	6.8	12.2	15.2	12.4

* Medias con letras iguales son similares entre sí (Tukey, 0.05).

Cuadro 4. Yemas dañadas y porcentaje de brotación en la vid obtenida con tres tensiones de la humedad del suelo durante dos ciclos.

Tratamiento (MPa)	Yemas dañadas		Brotación	
	1997-1998	1998-1999	1997-1998	1998-1999
	----- % -----			
-0.3	56.7 a	52.2 a	44.2 b	49.2 b*
-0.6	57.2 a	53.0 a	43.7 b	47.3 b
-0.9	22.6 b	20.1 b	80.0 a	80.0 a
CV (%)	18.0	16.5	15.3	18.2

* Medias con letras iguales son similares entre sí (Tukey, 0.05).

Cuadro 5. Número de racimos y rendimiento de uva por planta bajo tres tensiones de la humedad del suelo durante dos ciclos.

Tratamiento (MPa)	Número racimos/planta		Rendimiento	
	1997-1998	1998-1999	1997-1998	1998-1999
	----- t ha ⁻¹ -----			
-0.3	22.0 b	24.3 b	12.2 b	12.6 b*
-0.6	20.6 b	22.7 b	12.0 b	12.0 b
-0.9	46.5 a	43.7 a	23.5 a	21.5 a
CV (%)	12.6	14.2	16.4	13.9

* Medias con letras iguales son similares entre sí (Tukey, 0.05).

de la planta. Asimismo, el incremento en el porcentaje de yemas brotadas en el siguiente ciclo está íntimamente asociado con una buena inducción y mantenimiento de la dormancia de las yemas; se ha encontrado que estos dos procesos se mejoran notablemente y dependen del contenido de ácido abscísico (ABA) acumulado en las partes permanentes de la planta (raíz, tronco y brotes) (Coombe y Monk, 1979; Liu *et al.*, 1978; Ndung'u *et al.*, 1996, 1997). Un estrés de agua en postcosecha, como en el caso del

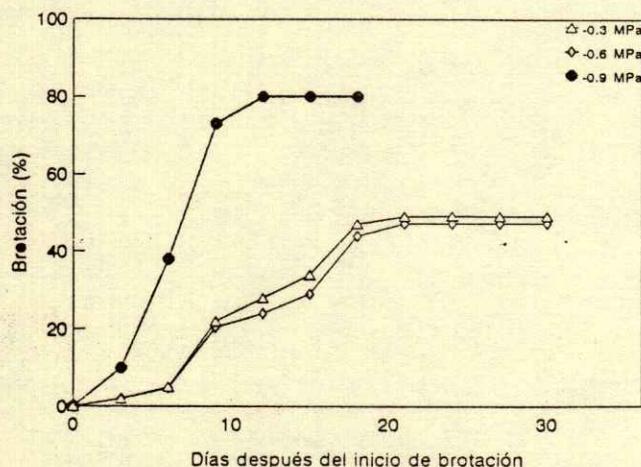


Figura 1. Dinámica de brotación de la vid cv. Carignane con tres tensiones de humedad del suelo en el ciclo 1998-1999.

tratamiento de -0.9 MPa, incrementa el contenido de ABA en una proporción de tres a cuatro veces más que en las plantas sin estrés de agua (Ndung'u *et al.*, 1997), por lo que una deficiencia de agua de ligera (-0.3 MPa) a moderada (-0.6 MPa) durante este período, no es efectiva para mejorar esta variable.

CONCLUSIONES

- La baja disponibilidad de humedad en el suelo acelera la defoliación de la vid.
- La defoliación de la vid y la alta humedad disponible en el suelo provocan rebrotación, lo cual aumenta la susceptibilidad de las yemas a las bajas temperaturas y, por consiguiente, afecta la brotación y la producción en 45 y 46%, respectivamente, del año siguiente.
- Aplicar una deficiencia de agua (-0.9 MPa) después de la cosecha provoca una mayor y temprana brotación.
- En la Comarca Lagunera, la aplicación del riego a la vid se deberá de realizar cuando la tensión de la humedad en el suelo descienda a -0.9 MPa y, con ello, se satisface adecuadamente sus necesidades hídricas.

LITERATURA CITADA

- Coombe, B.G. y P.R. Monk. 1979. Proline and acid abscisic content of juice of ripe Riesling grape berries: Effects of irrigation during harvest. *Am. J. Enol. Vitic.* 30: 64-67.
- Edwards, G.R. 1987. Producing temperate-zone fruit at low latitudes: Avoiding rest and chilling requirement. *HortScience* 22: 1236-1240.
- Fogliani, G., A.G. Gentile y S. Heitz. 1983. Study in the sensibility of grapevine buds to winter frosts in relation to their position on the cane and to the presence of blind buds. *Rev. Viticultura e Enologia, Conegliano* 36: 99-116.
- Godoy A., C. 1985. Respuesta de la vid (*Vitis vinifera* L.) a diferentes tensiones de humedad en el suelo en dos etapas de desarrollo. *Agric. Téc. Méx.* 11: 39-40.
- Hamman, R.A., R.A. Renquist y H.G. Hughes. 1990. Pruning effect on cold hardiness and water content during deacclimation of Merlot bud and cane tissues. *Am. J. Enol. Vitic.* 41: 251-260.
- Hubáckova, M. y V. Hubáček. 1984. Frost resistance of grapevine bud on different rootstocks. *Vinoh rad, Bratislava* 22: 55-56.
- Kamande, N.C., G. Okamoto y K. Hirano. 1996. Use of water stress in forcing Kyoho grapevines to produce two crops per year. *Am. J. Enol. Vitic.* 47: 157-162.
- Kamande, N.C., M. Shimizu, G. Okamoto y K. Hirano. 1997. Abscisic acid, carbohydrates, and nitrogen contents of Kyoho grapevines in relation to budbreak induction by water stress. *Am. J. Enol. Vitic.* 48: 115-120.
- Kasimatis, A.N. 1966. Vineyard irrigation. *Univ. Calif. Agr. Ext. Serv. Bull. Davis, CA.*

- Keller, M. y W. Koblet. 1995. Dry matter and leaf area partitioning, bud fertility and second season growth of *Vitis vinifera* L.: Responses to nitrogen supply and limiting irradiance. *Vitis* 34: 77-83.
- Kliewer, W.M. 1981. Grapevine physiology. How does a grapevine make sugar? Leaflet 21231. Division of Agricultural Sciences, University of California. Davis, CA.
- Liu, W.T., R. Pool, W. Wenkert y E. Kriedemann. 1978. Changes in photosynthesis, stomatal resistance and abscisic acid of *Vitis labruscana* through drought and irrigation cycles. *Am. J. Enol. Vitic.* 29: 239-246.
- Mancilla y D.I., R. 1996. Efecto de la fecha de poda, concentración y época de aplicación después de poda de cianamida hidrogenada en la protección de yemas de vid cv. Málaga Roja. *Información Técnica Económica Agraria. Producción Vegetal* 92:104-115.
- Miller, D.P., G.S Howell y R.K. Striegler. 1988. Cane and bud hardiness of own-rooted White Riesling and scions of White Riesling and Chardonnay grafted to selected rootstocks. *Am. J. Enol. Vitic.* 39: 60-66.
- Mullins, M.G., A. Bouquet y L.E. Williams. 1992. *Biology of the grapevine*. Cambridge University Press. London, England.
- Ndung'u, G.M., G. Okamoto y K. Hirano. 1995. Budbreak induction in dormant cuttings of Kyoho grape by use of water stress. *Environ. Control Biol.* 33: 269-275.
- Ndung'u, G.M., G. Okamoto y K. Hirano. 1996. Use of water stress in forcing Kyoho grapevines to produce two crops per year. *Am. J. Enol. Vitic.* 47: 157-162.
- Ndung'u, C.K., M. Shimizu, G. Okamoto y K. Hirano. 1997. Abscisic acid, carbohydrates, and nitrogen contents of Kyoho grapevines in relation to budbreak induction by water stress. *Am. J. Enol. Vitic.* 48: 115-120.
- Neja, R.A., L.E. Williams, L.A. Yates y E.L. Walker. 1994. Post-harvest irrigation and cyanamide effects on budbreak and yield of Perlette grapevines grown in the Coachella Valley. pp. 109-113. *In: International Symposium on Table Grape Production*. Am. Soc. Enol. Vitic. Anaheim, CA
- Obando R., R. y R. Mancilla D.I. 1975. Evaluación del daño de quemadura del tronco ocurrido durante el invierno en viñedos de la Comarca Lagunera. pp. 318-320. *In: Avances de Investigación del Centro de Investigaciones Agrícolas del Norte*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Matamoros, Coahuila, México.
- Osterass, P. 1962. Vineyard irrigation practices. *Calif. Irrig. Inst. Proc.* Fresno, CA.
- Richards, L.A. 1944. Moisture retention by some irrigated soils as related to soil moisture tension. *J. Agr. Res.* 69: 215-235.
- Samtsyan, S.M., V.F. Ponovarev y G.A. Samygin. 1984. The effect of grafting on grapevine frost resistance. *Soobshchenija Akademii Nauk, Tbilisi.* 13: 145-148.
- Srinivasan, C. y M.G. Mullins. 1981. Physiology of flowering in the grapevine. A review. *Am. J. Enol. Vitic.* 32: 47-63.
- Stern, R.A., I. Adato, M. Goren, D. Eisenstein y S. Gazit. 1993. Effects of autumnal water stress on Litchi flowering and yield in Israel. *Sci. Hort.* 54: 295-302.
- Williams, L.E., R.A. Neja, J.L. Meyer, L.A. Yates y E.L. Walker. 1991. Postharvest irrigation influences budbreak of Perlette grapevines. *Hortscience* 26: 1081.
- Williams, L.E., J.A. Cook., W.M. Kliewer y L.A. Lider. 1994. Grape. pp. 43-75. *In: B. Schaffer and P.C. Anderson (eds.). Handbook of Environmental Physiology of Fruits Crops*. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Winkler, A.J., J.A. Cook., W.M. Kliewer y L.A. Lider. 1974. *General viticulture*. Univ. of Calif. Press. Berkeley and Los Angeles, CA.

RESPUESTA AL DEFICIT HIDRICO EN *Pinus leiophylla*: ACUMULACION DE BIOMASA, DESARROLLO DE HOJAS SECUNDARIAS Y MORTANDAD DE PLANTULAS

Response of *Pinus leiophylla* to Water Deficit: Biomass Accumulation, Development of Secondary Needles and Seedling Mortality

T. Martínez-Trinidad¹, J. J. Vargas-Hernández¹, J. López-Upton¹ y A. Muñoz-Orozco²

RESUMEN

Se establecieron dos ensayos para determinar la respuesta al déficit hídrico de plántulas de 11 poblaciones de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham. catalogadas en dos grupos ("agotador y ahorrador") en función de su consumo de agua. En el primer ensayo, se evaluó el incremento en biomasa y el desarrollo de hojas secundarias en plantas de nueve meses de edad, sometidas a tres niveles de humedad (S₀ "control", S₁ "déficit moderado", S₂ "déficit severo") durante dos meses (periodo de sequía), seguido por un periodo de recuperación de cuatro meses. En el segundo ensayo, se suspendió el riego 12 días y dos meses después se evaluaron la mortandad y el daño en el brote terminal de las plantas. La acumulación de biomasa se redujo hasta 80% durante el periodo de sequía en el nivel S₂; en cambio, durante el periodo de recuperación la acumulación de biomasa fue similar en los tres niveles de humedad. Las poblaciones "ahorradoras" de humedad fueron más sensibles al déficit hídrico, pero durante el periodo de recuperación acumularon mayor biomasa que las poblaciones "agotadoras". El déficit hídrico severo también ocasionó un retraso en el desarrollo de hojas secundarias, siendo más notorio el efecto en el grupo "ahorrador". Asociado a su menor consumo de agua, el grupo "ahorrador" presentó menor mortandad y daño al brote terminal que el grupo "agotador", por lo que en condiciones de sequía ese tipo de poblaciones podría ser útil en la restauración de sitios donde exista una baja disponibilidad de agua.

¹Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, km 36.5 Carr. México-Texcoco, 56230 Montecillo, estado de México. Tel. y Fax: (595) 9520256. (tomtz@colpos.mx, vargashj@colpos.mx)

²Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, estado de México.

Recibido: Marzo de 2001. Aceptado: Marzo de 2002.
Publicado en Terra 20: 291-301.

Palabras clave: Variación intraespecífica, materia seca, supervivencia, adaptación a sequía, fenología del brote.

SUMMARY

Two nursery trials were established to determine the response of *Pinus leiophylla* Schl. et Cham. to water deficit in seedlings from 11 populations characterized as either "high" or "thrifty" consumers. The first trial included three levels of water availability in the soil (S₀ "control", S₁ "moderate deficit", S₂ "severe deficit") during a two-month period (drought period) when seedlings were nine months old, followed by a four-month period under favorable soil water conditions (recovery period). Biomass accumulation and development of secondary needles were evaluated in this trial. In the second trial watering was suspended during a 12-day period and two months later seedling mortality and shoot damage were evaluated. Biomass accumulation was reduced 80% under severe water deficit (S₂) but growth recovered to a rate similar to control seedlings afterwards. Low water-consumption ("thrifty") populations were more sensitive to severe water deficit during the drought period, but showed a higher compensatory effect during the recovery period. Water deficit also caused a delay in development of secondary needles that was more evident in populations from the "thrifty" group. Associated to its lower water consumption, populations from the "thrifty" group showed less mortality and shoot damage under drought conditions than populations from the "consumer" group, so these populations could be useful for restoration of sites with limited water availability.

Index words: Intraespecific variation, dry matter, seedling survival, drought adaptation, shoot phenology.

INTRODUCCION

Las poblaciones naturales de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham. de la región central de México se encuentran deterioradas debido al cambio de uso del suelo y a la tala clandestina. Ante esta situación es necesario reforestar estas zonas para detener y revertir el proceso de deterioro ecológico. La sequía es uno de los factores ambientales limitativos en terrenos forestales deteriorados (Kozłowski *et al.*, 1991). La disponibilidad de agua puede alterar en gran medida el área foliar, la tasa de fotosíntesis, el patrón de distribución de biomasa y, por consecuencia, la productividad de la planta (Teskey y Hinckley, 1986). El marchitamiento de las hojas y de los tallos jóvenes es otro efecto causado por la sequía, que durante periodos prolongados puede provocar la muerte de la planta o el daño permanente de alguna de sus partes.

La selección de genotipos con mayor capacidad de supervivencia a un nivel preestablecido de déficit hídrico es importante porque la planta en su conjunto utiliza una variedad de mecanismos de adaptación a la sequía. El conocimiento de la respuesta de los genotipos al déficit hídrico ayuda a determinar fuentes de semilla tolerantes, permitiendo seleccionar aquéllos con características ideales para las condiciones ambientales a reforestar (Cregg, 1994). Existen diversos trabajos en los que se considera la acumulación y distribución de materia seca como un criterio para evaluar y determinar diferencias en el comportamiento de los genotipos al déficit hídrico (Seiler y Johnson, 1988; Zhang *et al.*, 1996). En otros trabajos se ha considerado el efecto de la sequía sobre el desarrollo de hojas secundarias y la capacidad de supervivencia (Venator, 1976; Kaufmann, 1977; López y Muñoz, 1991; Cregg, 1994). En *Pinus leiophylla* var. *chihuahuana* (Engelm.) Shaw se ha detectado un mayor grado de tolerancia a condiciones de sequía que en otras especies del género *Pinus* (Barton y Teeri, 1993). Aparentemente, su mayor tolerancia se debe al mantenimiento de potenciales hídricos favorables en la planta. En otro estudio, se han encontrado diferencias intraespecíficas en la supervivencia de las plantas de *P. leiophylla* en condiciones de déficit hídrico (Vargas *et al.*, 1986).

Martínez *et al.* (2002) encontraron diferencias entre poblaciones de *P. leiophylla* en el consumo de agua y en la tasa de crecimiento en altura en condiciones de déficit hídrico. En ese estudio se identificaron dos grupos de poblaciones en función del mecanismo de posposición a la sequía utilizado

por ellas (uno de ellos "agotador" y el otro "ahorrador" de agua). Es importante conocer si las diferencias existentes en la respuesta de dichas poblaciones al déficit hídrico se mantienen en términos de otras características de crecimiento. Los objetivos de este estudio fueron: (1) evaluar la respuesta de plantas de *P. leiophylla* al déficit hídrico en términos de distribución de biomasa y desarrollo de hojas secundarias; y (2) determinar la variación en la mortandad entre poblaciones y grado de daño a las plantas por efecto de déficit hídrico.

MATERIALES Y METODOS

Germoplasma Utilizado

Se utilizaron plantas de nueve meses de edad de 11 poblaciones de *Pinus leiophylla* de la región central de México (Cuadro 1), obtenidas de semilla colectada por el personal del Programa Forestal del Colegio de Postgraduados. La siembra se realizó en charolas de plástico con una mezcla de arena y agrolita en proporción 50:50 (v.v) y un mes después se transplantaron a envases de plástico cónicos con capacidad aproximada de 100 cm³, con un sustrato de turba, vermiculita y agrolita (50:25:25). En el momento de preparar el sustrato, se agregó fertilizante de liberación lenta (nutricote 17-7-12) en dosis de 1 kg m⁻³. Se le determinó la curva de retención de humedad entre -0.03 y -2.0 MPa (233 y 162% de contenido de humedad, respectivamente) para determinar el punto a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente teórico (-1.5 MPa) (Kozłowski *et al.*, 1991). El elevado contenido de humedad del sustrato (en porcentaje) se debe a la naturaleza física de los materiales utilizados (turba, vermiculita y agrolita), que tienen gran capacidad de retención de humedad en relación con su peso. Con este material se establecieron dos ensayos: uno para evaluar la acumulación de biomasa y el desarrollo de hojas secundarias, y el otro para evaluar la mortandad y daño a las plantas por efecto del déficit hídrico.

Ensayo 1: Acumulación de Biomasa y Desarrollo de Hojas Secundarias

A partir de nueve meses de edad, las plantas se mantuvieron con tres niveles de humedad del suelo durante dos meses (periodo de sequía). En el nivel S₀ (testigo), el contenido de humedad se mantuvo por arriba de 165% (potencial hídrico del suelo mayor que

Cuadro 1. Características geográficas del origen de las poblaciones de *Pinus leiophylla*, que conforman los grupos "agotador" y "ahorrador" de agua (Martínez et al., 2002).

Grupo ¹ y población	Ubicación		Exposición	Altitud	Precipitación
	L.N.	L.O.			
				m	mm
Grupo "agotador"					
Tlalmanalco, Méx. (1) †	19° 11'	98° 47'	O	2550	1072
Tequesquahuac, Méx. (2)	19° 27'	98° 47'	O	2700	750
Amecameca, Méx. (3)	19° 10'	98° 46'	O	2550	936
San Rafael, Méx. (4)	19° 13'	98° 45'	O	2600	1072
San Juan Tetla, Pue. (7)	19° 15'	98° 32'	E	2550	950
San Felipe, Tlax. (8)	19° 28'	98° 32'	NE	2630	822
Grupo "ahorrador"					
Tlamacas, Méx. (5)	19° 03'	98° 40'	O	2700	1186
Tlahuapan, Pue. (6)	19° 21'	98° 36'	E	2500	1100
Españita, Tlax. (9)	19° 27'	98° 24'	NE	2600	879
La Malinche, Tlax. "Oeste" (10)	19° 19'	98° 00'	E	2780	800
La Malinche, Tlax. "Este" (11)	19° 14'	97° 57'	Z	2660	800

† Los grupos de poblaciones se conformaron en función del consumo promedio de agua en un estudio anterior (Martínez et al., 2002); † La numeración corresponde a la asignada por Martínez et al. (2002).

-1.5 MPa), en el nivel S₁ (déficit moderado) se mantuvo entre 80 y 165%, y en el nivel S₂ (déficit severo) entre 30 y 80%. Debido a la naturaleza del sustrato, no fue posible determinar el potencial hídrico del suelo a niveles inferiores de humedad de 162%, por lo que el límite inferior del nivel S₂ se determinó con base en el contenido de humedad en el que las plantas mostraron doblez del brote terminal. Para determinar el contenido de humedad, se utilizó el método gravimétrico. Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar en parcelas divididas, con los niveles de humedad en las parcelas grandes y las poblaciones en las parcelas chicas, utilizando cuatro repeticiones y 10 plantas por parcela chica. Al inicio del experimento, las plantas se homogeneizaron por su altura dentro de cada bloque. Después del periodo de sequía, las plantas se mantuvieron en condiciones favorables de humedad durante cuatro meses (periodo de recuperación).

Al inicio del experimento, se tomó una planta por parcela chica para determinar la biomasa inicial. Al final del periodo de sequía y del de recuperación, se tomaron dos y tres plantas, respectivamente, por parcela, para determinar la producción de biomasa en cada periodo. En las plantas muestreadas se lavó cuidadosamente el sistema radical y se separó la parte aérea; ambas partes se introdujeron en bolsas de papel y se colocaron en una estufa a una temperatura de 72 °C ± 1 °C durante 48 h. El peso seco de cada una de las partes se obtuvo en una balanza digital. Con los datos promedio por parcela se determinó el

incremento en biomasa total y de cada una de las partes (aérea y radical), así como la relación parte aérea/raíz de las plantas al final de cada periodo (sequía y recuperación). Con los datos de biomasa se calculó la tasa relativa de crecimiento (TRC) de las plantas en cada uno de los periodos de evaluación (Zhang et al., 1996):

$$TRC = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$$

Donde: W₁ y W₂ representan la biomasa en los tiempos t₁ y t₂ (inicio y final del periodo), respectivamente. Sin embargo, dado que los resultados del análisis estadístico de las dos variables (incremento absoluto en biomasa y TRC) fueron similares, sólo se presentan y discuten los valores absolutos. Adicionalmente, a partir del inicio del experimento y cada siete días, se contó el número de plantas con presencia de hojas secundarias en cada parcela, considerando como planta con hojas secundarias a aquélla que presentaba al menos dos hojas secundarias con un tamaño mínimo de 0.5 cm de longitud. Con estos datos se determinó el porcentaje de plantas que desarrollaron hojas secundarias durante las primeras tres semanas del periodo de sequía, así como el número de días requerido para que todas las plantas en la parcela presentaran hojas secundarias.

El análisis de varianza de las variables de biomasa y desarrollo de hojas secundarias se efectuó

considerando los dos grupos de poblaciones definidos por Martínez *et al.* (2002), con base en el siguiente modelo estadístico que utiliza los valores promedio por parcela:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + S_j + BS_{ij} + G_k + GS_{kj} + P(G)_{l(k)} + SP(G)_{jl(k)} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde: Y_{ijkl} = valor promedio de la l-ésima población del k-ésimo grupo, en el j-ésimo nivel de humedad de la i-ésima repetición (bloque); μ = media general; B_i = efecto del i-ésimo bloque; S_j = efecto del j-ésimo nivel de humedad del suelo; BS_{ij} = interacción de bloques con niveles de humedad (error a); G_k = efecto del k-ésimo grupo; GS_{kj} = efecto de la interacción del k-ésimo grupo con el j-ésimo nivel de humedad; $P(G)_{l(k)}$ = efecto de la l-ésima población dentro del k-ésimo grupo; $SP(G)_{jl(k)}$ = efecto de la interacción del j-ésimo nivel de humedad con la l-ésima población dentro del k-ésimo grupo; y ε_{ijkl} = error experimental asociado a los valores promedio por parcela (error b). En aquellos casos donde se encontró un efecto significativo ($P \leq 0.05$), se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de medias de Tukey con $P = 0.05$ para determinar diferencias entre niveles de humedad y entre grupos de poblaciones (SAS, 1989; Littell *et al.*, 1996).

Los valores de porcentaje de plantas que desarrollaron hojas secundarias durante las primeras tres semanas y el número de días en el que todas las plantas presentaron hojas secundarias se transformaron antes de realizar el análisis de varianza, debido a que estas variables no se ajustan a los requisitos de dicho análisis. Para ello, se utilizó la función arco seno de la raíz cuadrada de la proporción de plantas y la raíz cuadrada del número de días, respectivamente (Snedecor y Cochran, 1980).

Ensayo 2: Evaluación de la Mortandad y Daño a las Plantas

A un grupo de plantas de cada población con altura similar se les suspendió el riego durante un periodo de 12 días, para evaluar la mortandad y el daño a las plantas por efecto de la sequía. El ensayo se estableció en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones y 10 plantas por parcela. Durante la suspensión del riego, se determinó el contenido de humedad del suelo en cada uno de los envases con el método gravimétrico (Rose *et al.*, 1993), para establecer la curva de descenso de humedad para cada población.

A 12 días de la suspensión del riego, se restablecieron las condiciones favorables de humedad del suelo y dos meses después se determinó la mortandad y el daño causado por la sequía a las plantas en cada población. En el momento de la evaluación, se consideró como planta muerta a aquella que se veía totalmente seca y sin señales de rebrotar. En las plantas que sobrevivieron, se evaluó el daño ocasionado por el déficit hídrico, midiendo la longitud seca (necrótica) del tallo a partir del ápice terminal (Glerum, 1984).

Los datos promedio por parcela de mortandad y daño de las plantas se sometieron a un análisis estadístico, utilizando el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + G_j + P(G)_{k(j)} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} = valor promedio de la k-ésima población del j-ésimo grupo en el i-ésimo bloque; μ = media general; B_i = efecto del i-ésimo bloque; G_j = efecto del j-ésimo grupo; $P(G)_{k(j)}$ = efecto de la k-ésima población dentro del j-ésimo grupo y ε_{ijk} = error experimental asociado a los valores promedio por parcela. Se utilizó la prueba de comparaciones múltiples de medias de Tukey ($P = 0.05$) en los casos donde se encontró un efecto significativo, para determinar diferencias entre grupos y entre poblaciones dentro de grupo (SAS, 1989). Antes de efectuar el análisis estadístico, el porcentaje de mortandad de plantas por parcela se transformó con la función arco seno de la raíz cuadrada de la proporción.

Para determinar la relación de la mortandad y el daño de las plantas con las variables de biomasa en condiciones de sequía (incremento total y de las partes) y el porcentaje de plantas con hojas secundarias al inicio del periodo de sequía, se estimaron las correlaciones entre dichas variables. En este análisis se utilizaron los valores promedio por población ($n = 11$) obtenidos en el nivel de sequía S_2 .

RESULTADOS Y DISCUSION

Acumulación y Distribución de Biomasa

La disminución del agua en el suelo en el tratamiento S_2 afectó de manera significativa la acumulación de biomasa en las plantas hasta 80% (Cuadro 2). El efecto negativo del déficit hídrico fue más intenso en la parte aérea de la planta que en la

raíz, lo que ocasionó que la relación parte aérea/raíz se redujera proporcionalmente, en especial, en condiciones de déficit hídrico severo. Estos resultados coinciden con lo que se ha encontrado en otras especies como *Pinus ponderosa* Laws (Cregg, 1994), *P. resinosa* D. Don. (Becker et al., 1987) y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Zhang et al., 1996). Sin embargo, la reducción en la acumulación de biomasa observada en *P. leiophylla* por efecto del déficit hídrico (casi 80% en S₂) es mayor que la reportada en las otras especies, posiblemente como consecuencia de una mayor intensidad de la sequía.

En diversas especies de coníferas (Zahner, 1968; Vargas et al., 1986) es común observar una reducción en la relación parte aérea/raíz como resultado del déficit hídrico. Esto se interpreta como un mecanismo de la planta para tolerar las condiciones de sequía al tratar de mantener un equilibrio más favorable entre la capacidad de absorción de agua y la demanda transpiratoria (Cregg, 1994). En el caso de *P. leiophylla* var. *chihuahuana*, Barton y Teeri (1993) señalaron que en condiciones de sequía la especie acumula menor cantidad de biomasa en las raíces que otras especies del género *Pinus*, debido principalmente a que mantiene potenciales hídricos altos dentro de la planta. De acuerdo con estos autores, el principal mecanismo de *P. leiophylla* para tolerar la sequía es reducir la transpiración y no elevar la tasa de absorción de agua.

Después del periodo de sequía aumentó la tasa de acumulación de materia seca en las plantas, al grado que la biomasa total acumulada durante el periodo de recuperación fue similar en los tres niveles de humedad (Cuadro 2); sólo en el caso de la biomasa de la raíz se observaron diferencias entre los tratamientos durante el periodo de recuperación. Esto indica que las plantas favorecieron primordialmente la reactivación del crecimiento de la parte aérea a expensas del crecimiento de la raíz. Como consecuencia, la relación parte aérea/raíz al final del periodo de recuperación aumentó con respecto a la del periodo de sequía (Cuadro 2).

No se encontraron datos en la literatura que señalen que después de un periodo de sequía se presente un aumento de la relación parte aérea/raíz. De hecho, es más común que esta relación disminuya después del periodo de sequía debido a un retraso en la reactivación del crecimiento del brote (Clements, 1970). En el presente estudio, es posible que el aumento en la relación parte aérea/raíz esté asociado con la limitación del crecimiento de la raíz debido al reducido tamaño del contenedor y a una recuperación relativamente rápida del crecimiento de la parte aérea.

El patrón de respuesta, observado durante las dos etapas, indica que *P. leiophylla* redujo la tasa de crecimiento del brote durante el periodo de sequía como un mecanismo de evasión a ella. Esto le permitió reducir los daños, favoreciendo una recuperación rápida de la tasa de crecimiento al restablecerse las condiciones favorables de humedad. A pesar de la rápida recuperación, cuatro meses después de la sequía aún persistieron diferencias en la acumulación total de biomasa entre los tratamientos de humedad del suelo (Cuadro 2).

Aunque se encontraron diferencias en la acumulación de biomasa entre los dos grupos de poblaciones ("agotador" vs "ahorrador"), la respuesta a los niveles de humedad del suelo fue similar en ambos grupos. En promedio de los tres niveles de humedad, la acumulación de biomasa total en la planta durante el periodo de sequía fue significativamente mayor (15%) en el grupo "agotador". En cambio, durante el periodo de recuperación la acumulación de biomasa total fue mayor en las poblaciones del grupo "ahorrador". Esto se debió fundamentalmente a diferencias en la acumulación de biomasa en la parte aérea (Figura 1a), ya que la de la raíz fue similar en los dos grupos (Figura 1b).

Al final del periodo de sequía no se encontraron diferencias significativas entre los grupos en la relación parte aérea/raíz (2.09 vs 2.01), mientras que al final del periodo de recuperación, el grupo "ahorrador" tuvo una relación parte aérea/raíz (3.02)

Cuadro 2. Producción de biomasa por planta (g) y relación parte aérea/raíz (PA/R) durante los periodos de sequía y recuperación posterior.

Nivel de humedad	Periodo de sequía				Periodo de recuperación				Total
	Raíz	Aérea	Total	PA/R	Raíz	Aérea	Total	PA/R	
S ₀	0.49 a [†]	1.66 a	2.15 a	2.3 a	0.55 a	2.35 a	2.90 a	3.0 a	5.05 a
S ₁	0.37 a	1.03 b	1.40 b	2.1 ab	0.43 ab	2.39 a	2.82 a	2.9 a	4.22 b
S ₂	0.10 b	0.35 c	0.45 c	1.9 b	0.32 b	2.20 a	2.52 a	2.8 a	2.97 c

[†] Valores seguidos por letras diferentes en una misma columna representan diferencias significativas (P = 0.05) entre niveles de humedad.

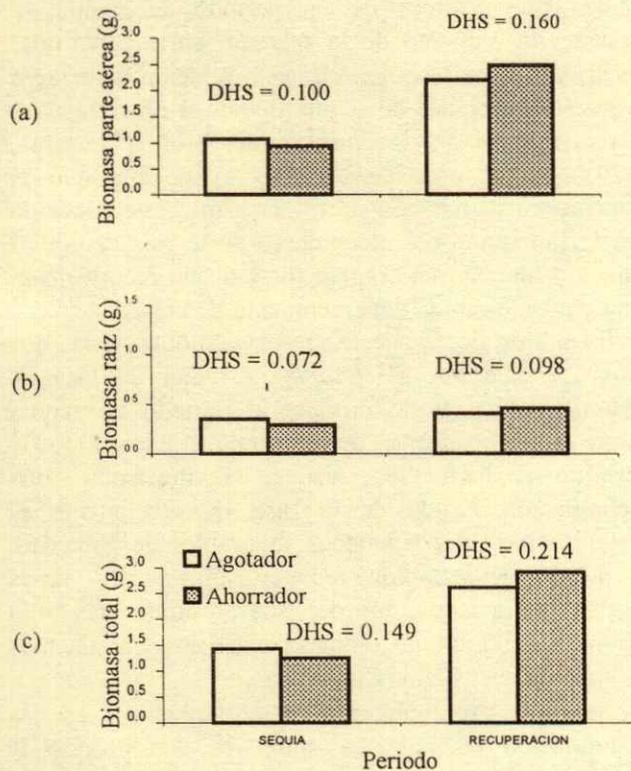


Figura 1. Producción de biomasa en la parte aérea (a), raíz (b) y total (c) en plantas de dos grupos de poblaciones ("agotador" y "ahorrador") de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham. durante el periodo de sequía (dos meses) y de recuperación (cuatro meses). (DHS: diferencia honesta significativa con $\alpha = 0.05$ entre valores de grupos).

significativamente mayor que la del grupo "agotador" (2.79). En términos generales, el primer grupo de poblaciones redujo en mayor grado la acumulación de biomasa durante el periodo de sequía, pero después tuvo una reactivación más rápida del crecimiento, manifestando un efecto compensatorio en la acumulación de biomasa, similar a lo descrito para el crecimiento en altura (Martínez *et al.*, 2002). Kaufmann (1977) encontró una respuesta similar en *P. radiata* D. Don. después de haber sometido plántulas a diferentes ciclos de sequía en el suelo durante 28 días.

La interacción de las poblaciones con los niveles de humedad no fue significativa, lo cual indicó que las poblaciones dentro de cada grupo respondieron de manera similar a las condiciones de humedad del suelo. Sin embargo, dentro de cada grupo es posible encontrar diferencias importantes en la acumulación de biomasa entre las poblaciones. Por ejemplo, al final

del periodo de sequía existen diferencias en la acumulación de biomasa total de hasta 30% entre las poblaciones del grupo "agotador" y de hasta 25% dentro del grupo "ahorrador". Este patrón de variación también se observa en el incremento de biomasa aérea y de raíz (Cuadro 3).

La relación parte aérea/raíz también mostró diferencias significativas entre las poblaciones de cada grupo. En el grupo "agotador" se encontraron valores desde 1.87 hasta 2.23 al final del periodo de sequía y desde 2.86 hasta 3.20 en el periodo de recuperación. Mientras que en el grupo "ahorrador" los valores de parte aérea/raíz variaron entre las poblaciones desde 1.92 a 2.20 en sequía y de 2.64 hasta 2.96 en recuperación (Cuadro 3). Los datos anteriores indican que existen diferencias entre las poblaciones en la sensibilidad al déficit hídrico, que se ven reflejadas en el patrón de distribución de biomasa, lo cual permitiría seleccionar algunas de ellas con base en esta característica. En general, se considera que una mayor distribución de biomasa hacia las raíces es un mecanismo primario por el cual las plantas podrían tolerar la sequía (Barton y Teeri, 1993; Cregg, 1994).

Desarrollo de Hojas Secundarias

El déficit hídrico afectó de manera drástica el desarrollo de hojas secundarias, siendo notorio únicamente en condiciones severas "S₂" (Cuadro 4). Durante las primeras tres semanas de déficit hídrico sólo 40% de las plantas en el nivel S₂ formaron hojas secundarias, a diferencia de 70% presentado en los niveles S₀ y S₁. Como consecuencia, el periodo requerido para que todas las plantas desarrollaran hojas secundarias aumentó en casi 30 días en el nivel S₂ con respecto al S₀. En especies como *Pinus resinosa* (Becker *et al.*, 1987) y *P. radiata* (Kaufmann, 1977), se ha encontrado que la sequía tiene un efecto similar al disminuir el alargamiento de las hojas.

Se encontraron diferencias notorias en el desarrollo de hojas secundarias entre los grupos de poblaciones, especialmente en condiciones de déficit hídrico severo (Cuadro 5). El grupo "ahorrador" presentó un desarrollo significativamente más lento de hojas secundarias que el grupo "agotador", por lo que tardó dos semanas más para que todas las plantas desarrollaran hojas secundarias (Cuadro 5). Estos resultados son congruentes con las diferencias observadas entre los grupos en la acumulación de biomasa y con la hipótesis de que el

Cuadro 3. Producción de biomasa (g) en la raíz, parte aérea y total y relación parte aérea-raíz (PA/R) en plantas de diferentes poblaciones de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham. durante los periodos de sequía y recuperación posterior.

Grupo, Población	Periodo de sequía				Periodo de recuperación			
	Raíz	Aérea	Total	PA/R	Raíz	Aérea	Total	PA/R
Agotador								
Tlalmanalco, Méx. (1)	0.40 ab [†]	0.95 a	1.35 a	2.14 ab	0.36 a	2.01 a	2.38 a	2.94 a
Tequesquahuac, Méx. (2)	0.24 b	1.15 a	1.40 a	1.96 b	0.49 a	2.03 a	2.52 a	2.86 a
Amecameca, Méx. (3)	0.51 a	1.16 a	1.67 a	2.23 a	0.46 a	2.41 a	2.87 a	3.13 a
San Rafael, Méx. (4)	0.37 ab	1.11 a	1.48 a	2.19 ab	0.44 a	1.98 a	2.41 a	2.93 a
San Juan Tetla, Pue. (7)	0.32 ab	1.20 a	1.52 a	1.87 ab	0.38 a	2.24 a	2.61 a	3.20 a
San Felipe, Tlax. (8)	0.28 ab	0.90 a	1.18 a	2.21 ab	0.37 a	2.48 a	2.85 a	2.97 a
Ahorrador								
Tlamacas, Méx. (5)	0.33 a [†]	0.94 ab	1.27 a	1.92 ab	0.47 ab	2.54 a	3.01 a	2.81 ab
Tlahuapan, Pue. (6)	0.31 a	1.06 a	1.37 a	1.90 b	0.54 a	2.41 a	2.70 a	2.66 ab
Españita, Tlax. (9)	0.29 a	0.92 ab	1.21 a	1.93 ab	0.22 a	2.48 a	2.95 a	2.96 a
La Malinche, Tlax. (10)	0.28 a	0.76 b	1.03 a	2.20 a	0.57 a	2.44 a	3.01 a	2.75 ab
La Malinche, Tlax. (11)	0.28 a	1.04 a	1.32 a	1.98 ab	0.48 ab	2.47 a	2.95 a	2.64 b

[†] Valores seguidos por letras diferentes en una misma columna dentro de cada grupo representan diferencias significativas ($P = 0.05$) entre poblaciones.

grupo "ahorrador" fue más sensible a las condiciones de déficit hídrico severo, reduciendo en mayor grado su tasa de crecimiento y desarrollo de hojas secundarias.

En poblaciones dentro de grupos se encontró una amplia variación en el desarrollo de hojas secundarias en respuesta al déficit hídrico en el nivel de humedad S_2 (Figura 2). En el grupo "agotador", el porcentaje de plantas que formaron hojas secundarias en las tres primeras semanas varió de 38.1 a 62.8% y el número de días varió desde 107 hasta 126. En el grupo "ahorrador" los valores variaron de 21.1 a 36.1% y de 128 a 139 días, respectivamente. A pesar de que en la población de la Malinche, Tlax. (11) 65% de las plantas tenía hojas secundarias al inicio de la sequía, el periodo de aparición de hojas secundarias se prolongó aproximadamente 54 días por efecto del déficit hídrico (Figura 2).

El comportamiento general de las poblaciones en cuanto al desarrollo de las hojas secundarias en

Cuadro 4. Porcentaje de plantas que desarrollaron hojas secundarias durante las primeras tres semanas de exposición a diferentes niveles de humedad del suelo y número de días necesarios para que todas las plantas (100%) presentaran hojas secundarias.

Nivel de humedad	Plantas con hojas secundarias	Días en lograr 100%
	%	
S_0	71.8 a [†]	93 a
S_1	68.6 a	93 a
S_2	40.6 b	122 b

[†] Valores seguidos por letras diferentes en una misma columna representan diferencias significativas ($P = 0.05$) entre niveles de humedad.

condiciones de sequía pudo haber tenido un efecto sobre el consumo de agua y crecimiento en altura en esas condiciones y, por lo tanto, en el incremento en biomasa. Es decir, un menor número de plantas con hojas secundarias puede repercutir en un menor consumo de agua, pero también en una menor producción de biomasa.

Mortandad y Daño a las Plantas

Se encontraron diferencias notorias entre los dos grupos de poblaciones en la reducción del contenido de humedad del suelo (Figura 3). Las poblaciones del grupo "agotador" consumieron agua más rápidamente que el grupo "ahorrador", de tal manera que a los nueve días de la suspensión del riego la mayoría de las poblaciones del primer grupo prácticamente habían agotado el agua del suelo. En cambio en el grupo "ahorrador" esto se observó hasta 12 días.

Debido a las diferencias en la tasa de consumo de agua entre grupos, se encontraron diferencias en la mortandad y en el grado de daño en las plantas al final del periodo de evaluación. En promedio, la mortandad en el grupo "agotador" fue más del doble que la del grupo "ahorrador". Dentro de grupos de poblaciones, los valores extremos de mortandad se presentaron en la población de Tlahuapan (grupo "ahorrador") con 0% y en la población de Amecameca (grupo "agotador") con 40% (Cuadro 6). En lo que respecta al grado de daño, los datos son similares a lo observado con la mortandad (Cuadro 6). La longitud de daño en el tallo en las poblaciones del grupo "agotador" (10.9 cm) fue casi el doble de la longitud

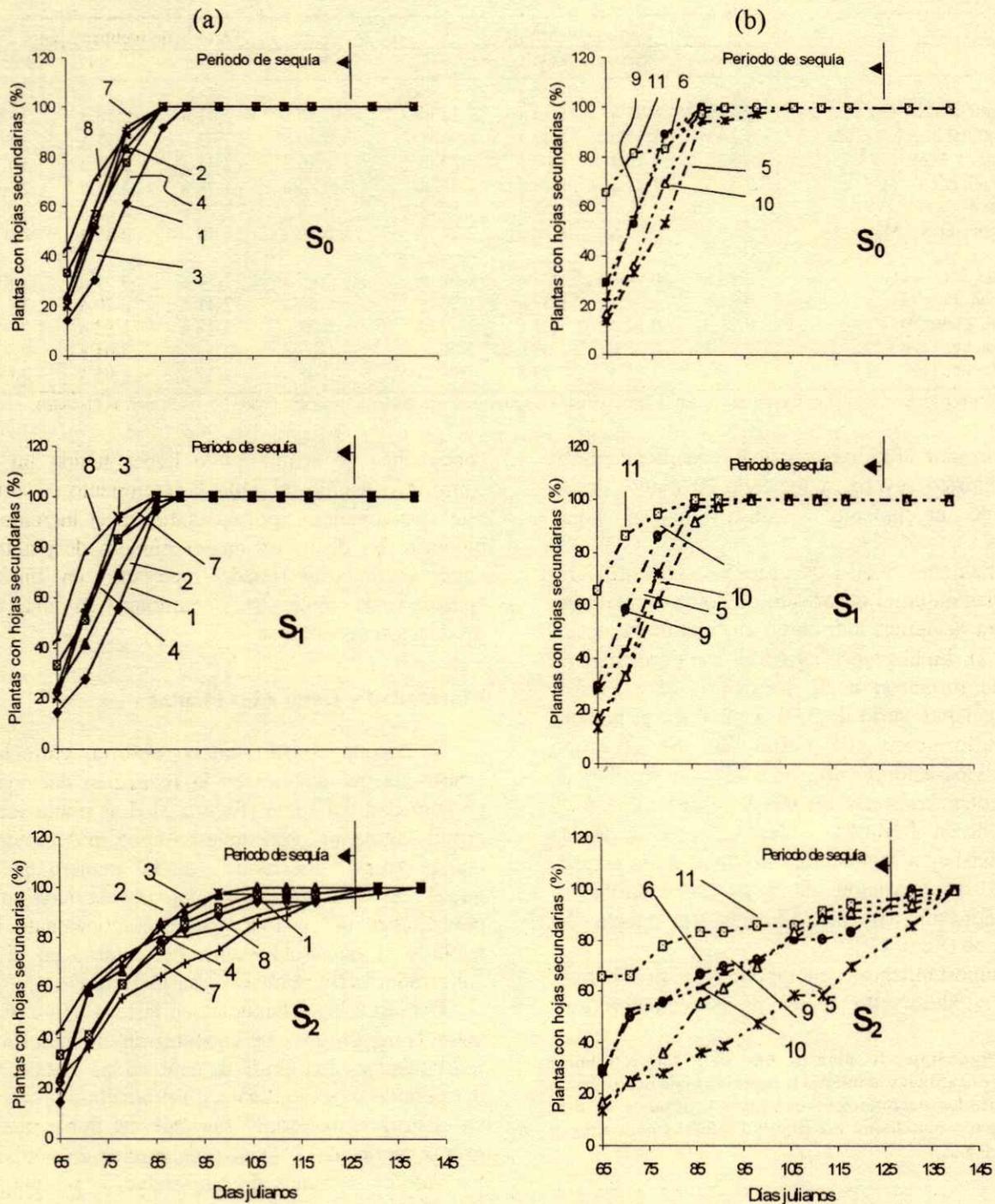


Figura 2. Porcentaje de plantas que desarrollaron hojas secundarias a lo largo del periodo de sequía en tres niveles de humedad (S_0 , S_1 y S_2) en poblaciones de los grupos (a) agotador y (b) ahorrador de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham. El día juliano 65 (5 de marzo) representa el inicio del periodo de sequía. Los números asignados a cada línea identifican a las poblaciones (Ver Cuadro 1).

Cuadro 5. Porcentaje de plantas que desarrollaron hojas secundarias durante las primeras tres semanas y número de días requeridos para que todas las plantas presentaran hojas secundarias en dos grupos de poblaciones sometidas a tres niveles de humedad del suelo.

Grupo de poblaciones	Plantas con hojas secundarias			Días en lograr 100%		
	S ₀	S ₁	S ₂	S ₀	S ₁	S ₂
	----- % -----					
Agotador	74.0 a [†]	70.1 a	50.2 a	93 a	92 a	115 a
Ahorrador	69.3 a	66.7 a	29.0 b	93 a	93 a	131 b

[†] Valores seguidos por letras diferentes en una misma columna representan diferencias significativas ($P = 0.05$) entre niveles de humedad.

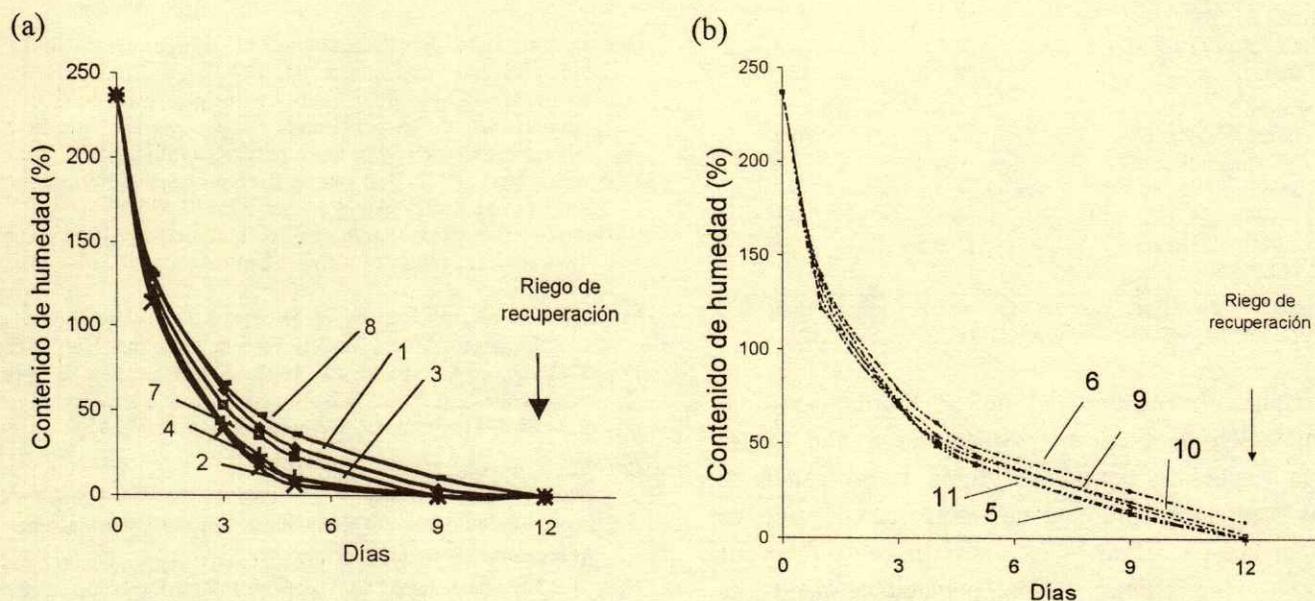


Figura 3. Contenido de humedad del suelo en envases ocupados por plantas de diferentes poblaciones de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham. del grupo agotador (a) y del grupo ahorrador (b), después de suspender el riego. Por las características físicas del sustrato utilizado un contenido de humedad de 233% representa condiciones de capacidad de campo (Ver texto).

dañada en el otro grupo (6.0 cm). Al igual que con la mortandad, las poblaciones de Tlahuapan y Amecameca presentaron los valores extremos de daño en las plantas. Estos resultados son lógicos si se considera que estas dos poblaciones presentaron también las posiciones extremas en el consumo de agua (Figura 3).

Aunque la mayor variación en mortandad se debió a los grupos de poblaciones, dentro de estos grupos también fue posible identificar poblaciones con mayor capacidad de supervivencia. Las poblaciones con mayor supervivencia dentro del grupo "agotador" son útiles en sitios que requieren plantas con carácter agresivo, las cuales puedan competir favorablemente con otras especies, mientras que las poblaciones con mayor supervivencia dentro del grupo "ahorrador" son útiles en sitios donde no existan problemas de

competencia con malezas. Sin embargo, a nivel de poblaciones, la mortandad y el daño en las plantas no estuvieron correlacionados en forma significativa ($P = 0.05$) con el incremento en biomasa o la presencia de hojas secundarias al inicio del periodo de sequía. Estos resultados difieren de lo señalado para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*, especie en la que se encontró que una temprana emergencia de hojas secundarias es una característica que favorece la resistencia a la sequía (Venator, 1976).

CONCLUSIONES

La acumulación y distribución de biomasa en *Pinus leiophylla* se afectaron drásticamente por el efecto del déficit hídrico impuesto. A pesar de que se presenta una recuperación rápida después del periodo

Cuadro 6. Mortandad y longitud de daño del brote en plantas de diferentes poblaciones de *P. leiophylla* por efecto del déficit hídrico.

Grupo, población y número	Mortandad	Longitud dañada
	%	cm
Agotador		
Tlalmanalco, Méx. (1)	26.6	10.2
Tequesquahuac, Méx. (2)	16.6	8.8
Amecameca, Méx. (3)	40.0	12.5
San Rafael, Méx. (4)	10.0	11.9
San Juan Tetla, Pue. (7)	23.3	11.9
San Felipe, Tlax. (8)	20.0	9.8
Promedio	22.7 a [†]	10.9 a
Ahorrador		
Tlamacas, Méx. (5)	13.3	4.8
Tlahuapan, Pue. (6)	0.0	4.4
Españita, Tlax. (9)	6.6	6.3
La Malinche, Tlax. (10)	6.6	7.9
La Malinche, Tlax. (11)	16.6	6.5
Promedio	8.6 b	6.0 b

[†] Letras diferentes en una columna representa diferencias significativas ($P = 0.05$) entre valores promedio de cada grupo.

de sequía, los efectos del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa permanecieron aún cuatro meses después del periodo de sequía. La formación de hojas secundarias presentó un retraso considerable en condiciones de déficit hídrico severo, con diferencias notorias entre grupos y entre poblaciones dentro de cada grupo. El grupo "ahorrador" fue más sensible al déficit hídrico, de tal manera que presentó un mayor retraso en el desarrollo de hojas secundarias, asociado con una reducción de la tasa de crecimiento, como un mecanismo para reducir el consumo de agua y sufrir daños menores. Las plantas del grupo "ahorrador" presentaron, en promedio, una menor tasa de consumo de agua y una menor mortandad y longitud dañada en el brote terminal que las poblaciones del grupo "agotador". Las diferencias encontradas en la respuesta al déficit hídrico entre poblaciones de un mismo grupo muestran que existen diferentes mecanismos de adaptación a la sequía en *P. leiophylla*. Por lo anterior, es importante considerar tanto las condiciones ambientales del sitio, como la capacidad de consumo de agua de la población al utilizar germoplasma de *P. leiophylla* con fines de reforestación o restauración ecológica.

LITERATURA CITADA

- Barton, A.M. y J.T. Teeri. 1993. The ecology of elevational positions in plants: Drought resistance in five montane pine species in southeastern Arizona. *Am. J. Bot.* 80: 15-25.
- Becker, C.A., G.D. Mroz y L.G. Fuller. 1987. The effects of plant moisture stress on red pine (*Pinus resinosa*) seedling growth and establishment. *Can. J. For. Res.* 17: 813-820.
- Clements, J.R. 1970. Shoot responses of young red pine to watering applied over two seasons. *Can. J. Bot.* 48: 75-80.
- Clegg, B.M. 1994. Carbon allocation, gas exchange, and needle morphology of *Pinus ponderosa* genotypes known to differ in growth and survival under imposed drought. *Tree Physiol.* 14: 883-898.
- Glerum, G. 1984. Frost hardiness of coniferous seedlings: principles and applications. pp. 107-123. *In:* M.L. Duryea (ed.). *Evaluating seedling quality: Principles, procedures, and predictive abilities of major tests.* Forest Research Laboratory. Oregon State University. Corvallis, OR.
- Kaufmann, M.R. 1977. Soil temperature and drought effects on growth of Monterey pine. *For. Sci.* 23: 317-325.
- Kozlowski, T.T., P.J. Kramer y S.G. Pallardy. 1991. *The physiological ecology of woody plants.* Academic Press. New York.
- Littell, R.C., G.A. Milliken, W.W. Stroup y R.D. Wolfinger. 1996. SAS System for Mixed Models. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- López U., J. y A. Muñoz O. 1991. Selección familiar por tolerancia a sequía en *Pinus greggii* Engelm I: Evaluación en plántula. *Serie Fitociencia. Agrociencia* 2: 111-123.
- Martínez T., T., J.J. Vargas H., A. Muñoz O. y J. López U. 2002. Respuesta al déficit hídrico en *Pinus leiophylla*: Consumo de agua y crecimiento en plántulas de diferentes poblaciones. *Agrociencia* (aceptado).
- Rose, R., J.F. Gleason y M.A. Atkinson. 1993. Morphological and water-stress characteristics of three Douglas-fir stocktypes in relation to seedling performance under different soil moisture conditions. *New Forests* 7: 1-17.
- SAS. Statistical Analysis System Institute. 1989. SAS/STAT user's guide version 6. 4th ed. Cary, NC.
- Seiler, J.R. y J.D. Johnson. 1988. Physiological and morphological responses of three half-sib families of loblolly pine to water-stress conditioning. *For. Sci.* 34: 487-495.
- Snedecor, G.W. y W.G. Cochran. 1980. *Statistical Methods.* 7th ed. Iowa State Univ. Press. Ames, IA.
- Teskey, R.O. y T.M. Hinckley. 1986. Moisture: Effects of water stress on trees. pp. 9-33. *In:* T.C. Hennessey, P.M. Dougherty, S.V. Kossuth y J.D. Johnson (eds.). *Stress physiology and forest productivity.* Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- Vargas H., J.J., A. Muñoz O. y M.R. Keyes. 1986. Drought response in seedlings of four *Pinus* species from central Mexico. pp:158-165. *In:* Proc. Ninth North American Forest Biology Workshop. Oklahoma State University. Stillwater, OK.
- Venator, C.R. 1976. Natural selection for drought resistance in *Pinus caribaea* Morelet. *Turrialba* 26: 381-387.

Zahner, R. 1968. Water deficits and growth of trees. pp. 191-254.
In: T.T. Kozlowski (ed.). Water deficits and plant growth.
Academic Press. New York.

Zhang, J., J.D. Marshall y L. Fins. 1996. Correlated population differences in dry matter accumulation, allocation, and water-use efficiency in three sympatric conifer species. *For. Sci.* 42: 242-249.

DINAMICA POBLACIONAL DE *Eisenia andrei* (Bouché 1972) EN DIFERENTES RESIDUOS ORGANICOS

Population Dynamic of *Eisenia andrei* (Bouché 1972) in Different Organic Wastes

S. Santamaría Romero¹ y R. Ferrera-Cerrato^{1†}

RESUMEN

La investigación se realizó con el fin de conocer la preferencia de la lombriz compostera *Eisenia andrei* por seis sustratos obtenidos de estiércol de ganado bovino, paja agotada utilizada en la producción del hongo *Pleurotus ostreatus* y desperdicios orgánicos del mercado municipal de Texcoco, estado de México, y mezclas de ellos. Se evaluaron las poblaciones de lombrices a 75, 100 y 130 días después de la inoculación de éstas en los diferentes sustratos. Se observó la preferencia por los desechos de mercado, seguidos por la mezcla de éstos con paja (1:1 v/v), con incrementos, en cuanto al número de lombrices, superiores a 1200% respecto a la cantidad inoculada (1000 individuos m⁻²). El estiércol presentó un efecto negativo en la dinámica poblacional de la especie, ya que sólo se encontró 8% de las inoculadas, 130 días después del proceso y no se observaron capullos.

Palabras clave: Lombrices composteras, paja, estiércol bovino, residuos de mercado.

SUMMARY

This work was done in order to identify the preference of the compost earthworm *Eisenia andrei* for six feedstocks: cattle manure, straw debris used for the production of the fungus *Pleurotus ostreatus*, organic waste from the municipal market of Texcoco, State of Mexico, and mixtures of these. Earthworm populations were evaluated 75, 100, and 130 days after earthworms were introduced into the various substrates. The earthworms most preferred waste from the municipal market, followed by the mixture of this waste with straw debris (1:1 v/v), with increases of more than 1200% relative to the number inoculated

(1000 earthworms m⁻²). Cattle manure had a negative effect on the *E. andrei* population since only 8% of the initial number of earthworms were found 130 days after inoculation and no eggs were observed.

Index words: Earthworms, straw debris, cattle dung, waste of municipal market.

INTRODUCCION

El composteo es un proceso biooxidativo de los residuos orgánicos en condiciones controladas de humedad, temperatura y, en algunos casos, aireación y otros parámetros. Cuando en dicho proceso se involucra la participación de lombrices como *Eisenia foetida*, *E. andrei* u otras denominadas composteras, se llama entonces proceso de vermicomposteo o lombricomposteo. La lombriz compostera *Eisenia foetida* ha sido reportada como la más útil en la transformación de los residuos orgánicos (Reinecke *et al.*, 1992; Martínez, 1995). Se observó que esta especie requiere de siete a ocho semanas para llegar a su madurez sexual, deposita de dos a cinco capullos semana⁻¹, de los cuales emergen de uno a siete individuos capullo⁻¹ (Edwards *et al.*, 1985). No obstante, las características físicas y químicas del sustrato influyen en la dinámica poblacional de estos anélidos.

La vermicultura trae consigo numerosos beneficios, como los agrícolas y pecuarios, además de los beneficios ecológicos, por la reducción de los desperdicios orgánicos que ocasionan contaminación, por el lento proceso en su descomposición. Por todo ello, la investigación de la dinámica poblacional de lombrices en diferentes sustratos orgánicos producidos en una zona determinada representa uno de los puntos iniciales para el establecimiento del proceso de vermicomposteo. El objetivo del presente trabajo consistió en evaluar la dinámica poblacional de la especie *E. andrei* Bouché 1972 en diferentes sustratos orgánicos, considerados basura en la zona de Texcoco, estado de México, y conocer el mejor sustrato para la

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

[†] (ronaldfc@colpos.colpos.mx)

producción de vermicomposta y de biomasa de lombrices.

MATERIALES Y METODOS

El experimento se ubicó en Montecillo, Texcoco, estado de México. Se utilizaron seis contenedores fabricados con bastidores de madera cubiertos con malla metálica, con dimensiones de 2.40 x 0.90 x 0.45 m. Cada uno se dividió en cuatro secciones de 0.90 x 0.57 m, las cuales fueron las repeticiones de cada tratamiento. El experimento se llevó a cabo bajo techo (estructura metálica sin paredes), para evitar un exceso de luz y pérdida directa de humedad que afectan negativamente a las lombrices. Los residuos orgánicos utilizados fueron: estiércol de bovino (pH 9.4), desperdicios de frutas y verduras (mango, jitomate, aguacate, principalmente) del mercado municipal de Texcoco (pH 9.1) y paja de avena agotada por el cultivo de hongos comestibles *Pleurotus ostreatus* (pH 8.1). Dichos residuos orgánicos se precompostearon durante 30 días, hasta que la temperatura se estabilizó y permitió la penetración de las lombrices. El sustrato se depositó en capas de 20 cm de espesor. Se utilizó la lombriz compostera *Eisenia andrei* Bouché 1972, proporcionada por la Unidad de Capacitación para el Desarrollo Rural (UNCADER) de Coatepec, Veracruz, mezclada con el sustrato pulpa de café. Además, se incluyó una cantidad adicional de la misma especie procedente de Yuriria, Guanajuato, reproducida en desperdicios agrícolas. Se inocularon 230 g de lombriz m⁻² de diferentes tamaños (1000 lombrices) y 130 capullos m⁻². Se utilizó un diseño experimental al azar con cuatro repeticiones por cada unidad experimental. Los resultados se analizaron mediante el programa Statistical Analysis System. Se emplearon los tratamientos siguientes:

1. 100% paja de avena agotada en el cultivo de hongos comestibles (Pj).
2. 100% estiércol de ganado bovino (E).
3. 100% desechos orgánicos de mercado (Dm).
4. Mezcla 50% estiércol y 50% desechos orgánicos de mercado (DmE).
5. Mezcla 50% desechos orgánicos de mercado y 50% paja (DmP).
6. Mezcla 30% estiércol, 30% desechos orgánicos de mercado y 40% Paja (DmE).

Pj, E y Dm son sustratos muy abundantes en la región, por lo cual se trató de utilizarlos; se prepararon algunas mezclas que se creyeron convenientes, pues se observó que el estiércol no era colonizado por las lombrices. Para la obtención de muestras para la evaluación de lombrices y su comportamiento poblacional, se tomaron muestras a 7, 45, 75 y 120 días después de la inoculación de las lombrices. Los residuos se mezclaron antes de tomar las muestras, ya que Huhta y Haimi (1988) mencionaron que la distribución de los individuos en el sustrato no siempre es uniforme. Además de que en los sustratos con estiércol, los individuos se amontonaban en sitios específicos, quizá debido al ambiente adverso que les proporcionaba el estiércol. Con un recipiente de 10 cm de diámetro se tomó 1 dm³ de sustrato por repetición para cuantificar la densidad de lombrices, número de capullos (estructuras en forma de gota donde se encuentran los huevos) y la biomasa total. El dispositivo, empleado para tomar las muestras, se introdujo desde la parte superficial hasta el fondo de los contenedores. Las lombrices y los capullos se aislaron de los sustratos y se procedió a cuantificarlos. Una vez realizada esta etapa, el total de las lombrices se pesó para obtener la biomasa total, el peso promedio individual y el peso promedio de adultos. Estos últimos se identifican por un abultamiento en la parte media anterior del cuerpo de la lombriz denominado clitelo, donde se forman los capullos. El peso promedio de individuos adultos se midió en algunos individuos adultos, seleccionados al azar, contados y pesados. Durante el proceso de vermicomposteo, la humedad se mantuvo entre 75 y 80% mediante riegos, según lo recomendado por Kaplan *et al.* (1980). Por otra parte, para relacionar los factores que pueden afectar el desarrollo de las lombrices fue necesario registrar:

- a) la temperatura cada tercer día (con termómetro de -10 a +200 °C con graduación de 0.1 °C), el que se introdujo, durante 4 min antes de tomar la lectura, al centro del sustrato en cada una de las repeticiones.
- b) El pH se midió con un potenciómetro Corning 7, a una relación sustrato:agua 1:4 (p/p).
- c) El contenido de nitrógeno total se cuantificó por el método semimicrokjeldahl digestión húmeda (H₂SO₄ - C₃H₇O₆) arrastre de vapor (Jones *et al.*, 1991).

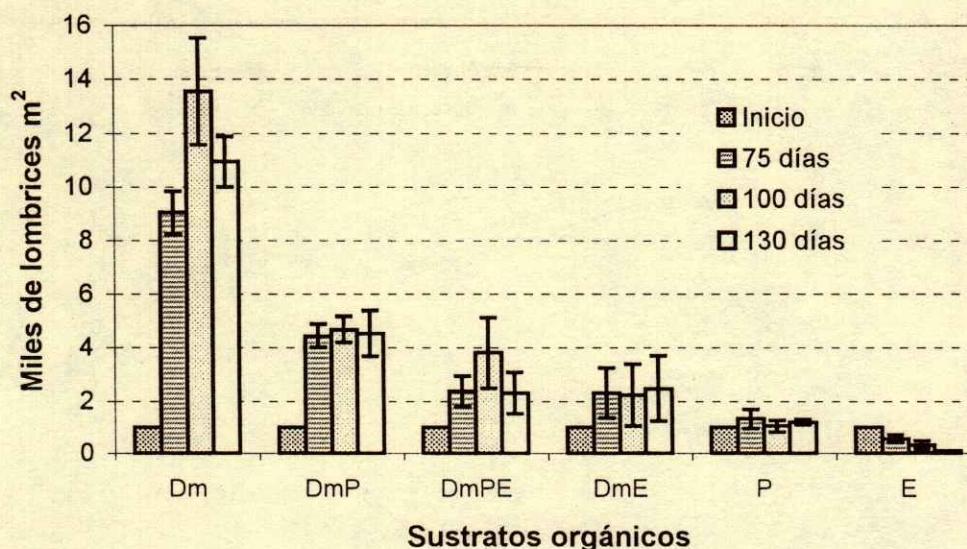


Figura 1. Densidad poblacional de lombrices durante el proceso de vermicomposteo en los diferentes sustratos empleados. P = paja, E = estiércol, Dm = desechos orgánicos de mercado, DmE = 50% Dm + 50% E, DmP = 50% Dm + 50% P y DmPE = 30% Dm + 40% P + 30% E.

RESULTADOS Y DISCUSION

Es de suma importancia el conocimiento de la dinámica poblacional de las lombrices, es decir, su crecimiento y reproducción, en un determinado sustrato orgánico. De esta manera, se podrá recomendar o no la utilización de alguno de los residuos orgánicos que se generan en una región específica. Además, la obtención de vermicomposta o lombricomposta está en función de la dinámica poblacional de las lombrices, las cuales, en la presente investigación, mostraron preferencia por algunos de los sustratos utilizados por factores que se discutirá más adelante. Sin embargo, en otros sustratos, estos individuos emplearon una estrategia de amontonamiento, probablemente para protegerse cuando el medio no les fue favorable, por factores de pH y conductividad eléctrica elevados.

Densidad de Lombrices

La cantidad de lombrices inoculadas en la unidad de área (1000 lombrices m⁻²) se incrementó en todos los sustratos, excepto en el estiércol sin mezclar, en el cual disminuyó 45% a 75 días después de la inoculación y a 130 días sólo se encontró 8% de las inoculadas (Figura 1). Esto contradice los resultados de Lee (1985) y de Reinecke y Viljoen (1990), quienes mencionaron a las lombrices composteras como

excelentes transformadoras del estiércol bovino. Sin embargo, los aspectos químicos, físicos y biológicos del estiércol varían de acuerdo con el patrón alimenticio del ganado, de lo cual dependerá la calidad del estiércol y, por lo tanto, la aceptación de dicho sustrato por las lombrices (Ferruzzi, 1987).

La mayor cantidad de lombrices se observó en el sustrato de los residuos de mercado después de 100 días de la inoculación (Figura 1). En todas las fechas, el aumento de lombrices fue significativamente mayor en Dm que en los demás sustratos. Esta preferencia por Dm se debió, posiblemente, al contenido de proteínas y fibras requeridas para el desarrollo de las lombrices (Rodríguez *et al.*, 1992). Las mezclas que contenían Dm superaron significativamente en número de individuos a los sustratos de estiércol y paja solos, incluso DmP produjo 100% más individuos que Pj y E. En los desechos orgánicos de mercado, la densidad de lombrices se incrementó 1244% en cuatro meses (Figura 1). Rodríguez *et al.* (1992) encontraron que en 16 meses el incremento fue de 2870% en basura orgánica con estiércol y pulpa de café. Martínez y Gómez (1995) encontraron que, al alimentar a *E. foetida* con residuos florales durante cuatro meses, la población final no alcanzó a duplicarse; sin embargo, dichos autores encontraron que la mezcla de estiércol con pasto permitió un aumento de 300%. En la presente investigación, las mezclas DmE y DmPE

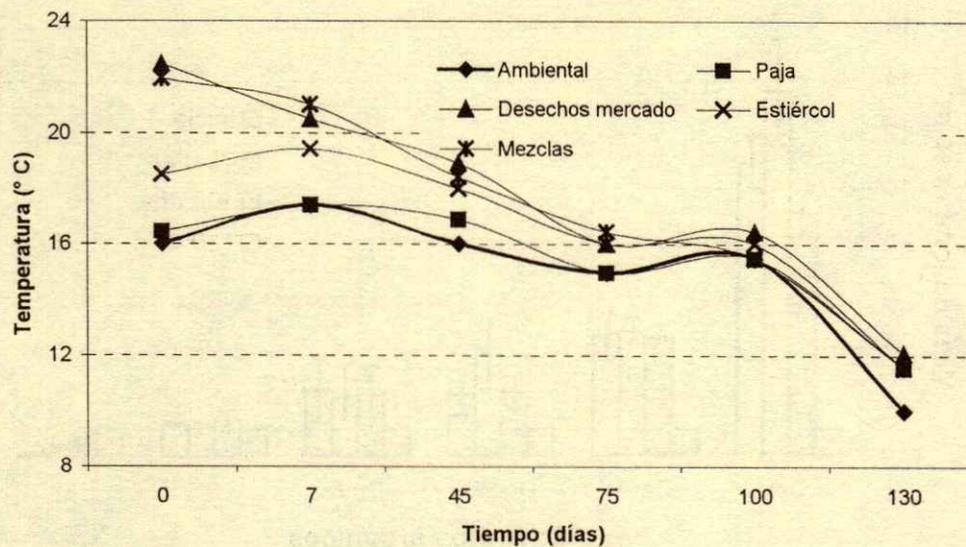


Figura 2. Fluctuación de la temperatura ambiental y de los sustratos utilizados en el proceso de vermicomposteo.

tuvieron resultados semejantes en la densidad de lombrices y se observaron incrementos superiores a 100% respecto a la cantidad inoculada, aunque el número de lombrices fue inferior a Dm y DmP. Con estos antecedentes se infiere que la presencia de estiércol en aquellos sustratos fue lo que disminuyó el desarrollo y la reproducción de los individuos. En paja sola, la densidad poblacional no varió respecto a la cantidad inoculada, ya que se registró un incremento de 20 a 30% durante el proceso (Figura 1). Es posible que este aumento tan ligero sea manifestación de una falta de material nitrogenado en Pj, que los demás sustratos contenían por la adición de Dm y a la calidad de la materia orgánica fundamentalmente constituida por lignina y celulosa. Estos materiales son de difícil descomposición por su alto contenido de carbono y bajo nitrógeno que provocan amplia relación C/N (Rodríguez, 1993). La relación C/N de la paja estuvo por arriba de 40:1. Aunado a estos efectos adversos del sustrato, se presentó también una limitación dado a que en este sustrato se presentaron las temperaturas más bajas, en relación con los demás sustratos. Probablemente, esto se debe a que durante el proceso de descomposición de los residuos de mercado y mezclas con este sustrato, se produce un incremento de temperatura. La temperatura cambiaba de acuerdo con la temperatura promedio diaria, principalmente en paja (Figura 2), ya que ésta había pasado ya por un proceso previo de utilización y agotamiento de la misma.

Peso de Lombrices (Biomasa)

El peso promedio individual de las lombrices antes de la inoculación se estimó en 0.23 g y durante el proceso de vermicomposteo se observó que dicho peso disminuyó notablemente en los sustratos donde el desarrollo de lombrices fue mayor (Cuadro 1). Lo anterior puede tener dos explicaciones: a) la baja temperatura que, como se ha mencionado, tiene relación con la dinámica poblacional y b) la aparición de las lombrices juveniles pudo haber provocado que el peso por individuo disminuyera, ya que al incrementarse la población, la relación biomasa:número de lombrices se hace más estrecha. El peso individual de las lombrices en el sustrato E fue superior al de las desarrolladas en los demás sustratos, debido a que no se observaron individuos juveniles por la falta de reproducción, algo similar ocurrió en el sustrato Pj durante las dos primeras fechas en que se tomaron las muestras. Sin embargo, en Dm y la mezcla DmP, el peso individual disminuyó, pero esto fue debido a la amplia reproducción de los individuos. También se observó que a pesar de no haber reproducción inmediata en el sustrato Pj, la lombriz se fue adaptando, ya que su dinámica, aunque limitada, no se inhibió como en el caso del sustrato E. La paja de avena contiene celulosa, de la cual probablemente se alimentaron las lombrices, pues Hartenstein (1984) reportó que la especie *E. foetida* puede alimentarse de

Cuadro 1. Peso individual promedio de las lombrices juveniles en los sustratos utilizados durante el proceso.

Sustrato	75 días	100 días	130 días
	----- g -----		
Paja	0.25 ab	0.27 ab	0.20 b
Estiércol	0.29 a	0.30 a	0.32 a
Desechos orgánicos de mercado	0.11 b	0.09 cd	0.07 c
Desechos orgánicos de mercado + estiércol	0.17 ab	0.16 bcd	0.07 c
Desechos orgánicos de mercado + paja	0.10 b	0.06 d	0.07 c
Desechos orgánicos de mercado + paja + estiércol	0.21 ab	0.19 abc	0.16 b

Valores con la misma letra dentro de las columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$).

Cuadro 2. Peso individual promedio de las lombrices adultas (con clitelo) en diferentes etapas.

Sustrato	75 días	100 días	130 días
	----- g -----		
Paja	0.36 b	0.38 a	0.33 a
Estiércol	0.43 b	0.42 a	0.32 a
Desechos orgánicos de mercado	0.49 ab	0.37 a	0.37 a
Desechos orgánicos de mercado + estiércol	0.63 a	0.42 a	0.29 a
Desechos orgánicos de mercado + paja	0.48 ab	0.42 a	0.34 a
Desechos orgánicos de mercado + paja + estiércol	0.50 ab	0.48 a	0.39 a

Valores con la misma letra dentro de las columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$).

la celulosa, al ganar de 5 a 300 mg en la utilización de ésta como fuente principal de carbono, y de microorganismos como reguladores del crecimiento.

Un mayor número de lombrices indica que los individuos se están reproduciendo, por lo que el peso individual promedio disminuye. De esta manera, en el sustrato Dm, al existir un mayor número de lombrices juveniles pequeñas, el peso individual, resultado del cociente biomasa/densidad, se redujo hasta 0.07 g. En cuanto al peso de adultos (Cuadro 2), se encontró que al final del experimento las lombrices cliteladas (adultas) pesaron 0.49 g en el sustrato con mayor número de individuos (Dm), 75 días después de la inoculación. Los adultos menos pesados se encontraron en Pj y E en esa misma fecha, ello muestra la baja aceptación de estos sustratos al inicio. Al respecto, Cluzeau *et al.* (1992) encontraron que en la especie *E. foetida* se registra disminución en el peso cuando utiliza energía en la reproducción.

Por otra parte, en estiércol, a 130 días, el peso individual promedio fue de 0.32 g y en paja de 0.20 g (Cuadro 1), lo cual se debió, quizá, a la baja densidad de lombrices encontrada en estos sustratos, cuyo peso individual promedio no se afectó como en los otros sustratos, pues sencillamente no hubo juveniles. Es en este sentido que Hartenstein (1984) encontró que las lombrices pueden vivir sin alimentarse por grandes

periodos sin que se observe mortalidad de éstas, además de que la baja temperatura permite la supervivencia. Al final del experimento (130 días), el peso medio de las lombrices adultas bajó de manera considerable; este comportamiento se atribuye sobre todo a la baja temperatura (13 °C), pues en todos los tratamientos fue similar y no se encontraron diferencias estadísticas en esta etapa (Cuadro 2). Las lombrices desarrolladas en estiércol no se reprodujeron y la disminución en el peso fue resultado de la baja temperatura y la falta de aceptación de este sustrato por las condiciones desfavorables de pH y conductividad eléctrica elevados.

Número de Capullos Producidos

La temperatura en los primeros 60 días fue superior a 16 °C en todos los sustratos, excepto en Pj (Figura 2), por lo que, a 75 días de la inoculación, la producción de capullos se incrementó en 1123%, respecto a los inoculados inicialmente para el tratamiento Dm (Figura 3). La reproducción de la lombriz, así como su desarrollo, y otros factores fisiológicos como se ha observado, se encuentran influenciados por el factor temperatura, la cual también afecta la producción de capullos. Por otra parte, el número de capullos bajó al incrementarse la

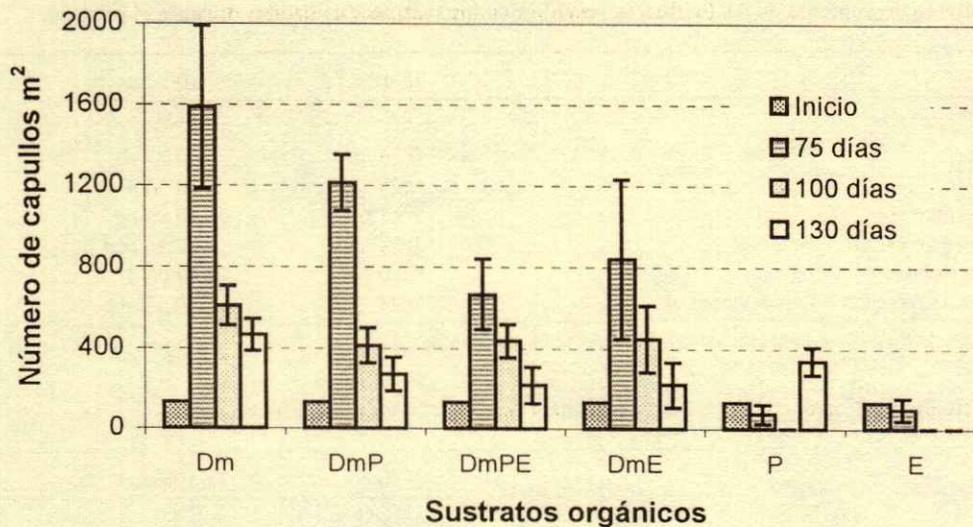


Figura 3. Efecto de los sustratos utilizados sobre la producción de capullos de lombrices durante el proceso de vermicomposteo. P = paja, E = estiércol, Dm = desechos orgánicos de mercado, DmE = 50% Dm + 50% E, DmP = 50% Dm + 50% P y DmPE = 30% Dm + 40% P + 30% E.

densidad de lombrices a 100 días después de la inoculación, debido a la presencia de las que emergieron de los capullos formados 25 días antes, además de que las juveniles aun no llegaban a su etapa de madurez, es decir, no habían alcanzado la etapa reproductiva.

La adaptación de la lombriz al sustrato también jugó un papel importante. Esto se observa específicamente en paja, en la que a 75 días el número de capullos disminuyó 50% de la cantidad inoculada; posteriormente, se observó un incremento en la tasa de copulación probablemente por la adaptación a dicho sustrato. Este aspecto llevó a encontrar una mayor cantidad de capullos en Pj, en la evaluación realizada a 130 días, en comparación con los sustratos DmE, DmPE, DmP y E; siendo sólo superada por Dm (Figura 3). Además de la adaptación, esta mayor producción en paja se debió posiblemente a una avanzada descomposición del sustrato y, con ello, mayor cantidad de alimento disponible. La disponibilidad de alimento está directamente relacionada con la producción de capullos. Al respecto, Reinecke y Viljoen (1990), después de alimentar con estiércol a 10 lombrices durante 20 días, observaron más de 40 capullos, mientras que en ausencia de alimento éstos no se presentaron. En el estiércol utilizado en el presente trabajo, que no fue aceptado por las lombrices, no se encontraron capullos a 100 y 130 días después de la inoculación de

lombrices. Los capullos encontrados a 75 días fueron aquellos inoculados al principio del proceso, o bien, los que las lombrices adultas expulsaron en las primeras etapas. De lo que se infiere que no existió copulación y al final sólo se encontraron 80 lombrices adultas m^{-2} en mal estado por factores adversos (pH y conductividad eléctrica) de este sustrato.

La temperatura inicial superior a 16 °C propició que la cantidad de capullos en las mezclas y en Dm a 75 días presentara un incremento (Figura 3). Sin embargo, al empezar a disminuir ésta por debajo de 16 °C, disminuyó la cantidad de capullos, por la baja reproducción. Las mezclas DmPE y DmE mostraron respuestas muy similares en la evaluación de este parámetro y se observó la producción de capullos a pesar de que estos sustratos contenían estiércol; sin embargo, el número de éstos fue inferior a los encontrados en los sustratos sin estiércol (Dm y DmP). Las características biológicas de la especie influyen también en la capacidad de las lombrices para reproducirse, por lo que es posible que en un principio se hayan reproducido profusamente los individuos, disminuyendo dicha actividad en etapas posteriores. En este sentido, Reinecke y Viljoen (1991) mencionaron que *E. andrei* presentó alta producción de capullos al inicio de su madurez y posteriormente decreció, a los dos meses siguientes.

En investigaciones realizadas por Huhta y Haimi (1988), el número total de capullos acumulados fue de

4580, después de 112 días, habiendo inoculado 200 g de lombrices de la especie *E. foetida* en desperdicios orgánicos colectados de cinco familias. En tanto que en este trabajo sólo se alcanzaron 2750 capullos en Dm después de 130 días con 230 g de lombrices. Los mismos autores también encontraron una producción de 879 capullos a 80 días, mientras que en el experimento aquí expuesto se encontraron entre 1300 y 1700 capullos a 75 días en Dm y DmP. La diferencia en las dos fechas se relacionó con la fluctuación de la temperatura durante el proceso.

pH y N-total Durante el Proceso de Vermicomposteo

Los valores de pH fueron superiores a 8.3 en todos los sustratos empleados, sobre todo en aquéllos que contenían estiércol. Lo anterior originó la muerte de las lombrices en el estiércol (pH 9.7). En general, se observó altos valores de pH, tendencia a la alcalinidad que afecta negativamente el desarrollo, la reproducción y la actividad de las lombrices. Al respecto, se ha reportado que *E. foetida* murió en sustratos que presentaron pH superior a 9.5 (Kaplan *et al.*, 1980). La paja presentó los valores más bajos para este parámetro (Cuadro 3), aunque la densidad poblacional de las lombrices en este sustrato no se incrementó inicialmente debido a que no descomponen la lignina. Sin embargo, fue el sustrato más propicio para que las lombrices lo habitaran; lo negativo de éste fue su bajo contenido de nitrógeno. Al evaluar el contenido de N en la etapa inicial del proceso, se observó que Dm presentó la mayor concentración (Cuadro 4); el sustrato Pj contenía sólo 9.7 mg g⁻¹ de N. La importancia de este parámetro es que es amplia la relación C/N en gramíneas y con ello se reduce la actividad microbiana en la descomposición y, por ende, la de las lombrices. Si se tiene en consideración

Cuadro 3. Valores de pH en los sustratos donde se desarrolló *Eisenia andrei*.

Tiempo días	Pj [†]	E	Dm	DmE	DmP	DmPE
0	8.1	9.4	9.1	-	-	-
45	8.9	9.5	9.5	9.4	9.3	9.4
75	8.8	9.7	9.3	9.4	9.0	9.5
130	8.9	9.7	9.4	9.5	9.0	9.5

[†] Pj = paja, E = estiércol, Dm = desechos orgánicos de mercado, DmE = 50% Dm + 50% E, DmP = 50% Dm + 50% Pj, DmPE = 30% Dm + 40% Pj + 30% E.

Cuadro 4. Concentración de N-total en los sustratos donde se desarrolló *Eisenia andrei*.

Tiempo días	Pj [†]	E	Dm	DmE	DmP	DmPE
	N (mg kg ⁻¹ de sustrato)					
0	9.7	13.8	12.9	-	-	-
15	9.8	-	22.1	11.6	18.8	18.4
75	14.7	20.0	29.7	24.5	20.0	20.6
130	16.9	20.0	18.7	17.1	21.0	18.3

[†] Pj = paja, E = estiércol, Dm = desechos orgánicos de mercado, DmE = 50% Dm + 50% E, DmP = 50% Dm + 50% Pj, DmPE = 30% Dm + 40% Pj + 30% E.

que la población de lombrices en Dm fue mayor que los demás sustratos, es claro que la concentración de nitrógeno en estos residuos jugó un importante papel. Lo mismo puede decirse de la paja que con un bajo contenido de nitrógeno inicial no provocó el desarrollo de los individuos, sino hasta que la paja en su proceso de descomposición alcanzó una mayor proporción de nitrógeno, lo cual ocurrió a 75 días del proceso (Cuadro 4). Esto logró tener un efecto positivo en la reproducción de las lombrices, ya que al final del proceso (130 días), la producción de capullos en este sustrato Pj, superó casi a todos los demás con excepción de Dm (Figura 3). Por lo anterior, este nutrimento desempeñó un papel importante en el desarrollo de las lombrices en Dm y en Pj. Después de 130 días del proceso, la vermicomposta de paja alcanzó 16.9 mg g⁻¹ de N, lo que influyó notablemente en la adaptación y reproducción de los anélidos en este sustrato. En el estiércol, la concentración de nitrógeno fue aceptable para el desarrollo de las lombrices, sin embargo, no se desarrollaron por el pH elevado, además de la alta conductividad eléctrica que presentó este sustrato >10 dS m⁻¹, en comparación con los otros sustratos < 8 dS m⁻¹.

CONCLUSIONES

- Los desperdicios orgánicos de mercado son un excelente sustrato alimenticio para las lombrices composteras *E. andrei*, ya que en sólo cuatro meses se tuvo un incremento superior a 1200% en el número de lombrices.
- La temperatura y el pH de los sustratos influyeron notablemente en el desarrollo y la reproducción de las lombrices. Con una temperatura inferior a 16 °C y pH superior a 9.5, los individuos no se reproducen. El estiércol sin mezclar presentó pH de 9.7 y

conductividad eléctrica de $> 10 \text{ dS m}^{-1}$, lo que causó la muerte de los individuos.

- Los residuos orgánicos con bajo contenido de N-total supone alta relación C:N, como es el caso de la paja utilizada. Estos pueden aprovecharse para el vermicomposteo, pero el proceso es demasiado lento y las lombrices no se incrementan inicialmente. Por tal motivo, es recomendable la mezcla de estos residuos orgánicos con sustratos con baja relación C:N (*e gr.* desperdicios de mercado) para acelerar la biotransformación y obtener mayor biomasa de lombrices.

LITERATURA CITADA

- Cluzeau, D., L. Fayolle y M. Hubert. 1992. The adaptation value of reproductive strategy and mode in three epigeous earthworm species. *Soil Biol. Biochem.* 24: 1309-1315.
- Edwards, C.A., I. Burrows, K.E. Fletcher y B.A. Jones. 1985. The use of earthworms for composting farm wastes. pp. 229-241. *In:* J.K.R. Gasser (ed.). *Composting and agricultural and other wastes.* Elsevier. Oxford, UK
- Ferruzzi, C. 1987. *Manual de lombricultura.* Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Hartenstein, R. 1984. Rate of production and loss of earthworm biomass in relation to species and size. *Soil Biol. Biochem.* 16: 643-649.
- Huhta, V. y J. Haimi. 1988. Reproduction and biomass of *Eisenia fetida* in domestic waste. pp. 65-69. *In:* C.A. Edwards y E.F. Neuhauser (eds.). *Earthworms in waste and environmental management.* SPB Academic Publishing. The Hague, The Netherlands.
- Jones Jr., J.B., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. *Plant analysis handbook.* Micro-Macro Publishing. Athens, GA.
- Kaplan, D.L., R. Hartenstein, E.F. Neuhauser y M.R. Malecki. 1980. Physicochemical requirements in the environment of the earthworm *Eisenia foetida*. *Soil Biol. Biochem.* 12: 347-352.
- Lee, K.E. 1985. *Earthworms. Their ecology and relationships with soils and land use.* Academic Press. Adelaide, Australia.
- Martinez, A.A. 1995. *Manual práctico do minhocultor.* 3a ed. Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado de Sao Paulo. FUNEP. Jaboticabal, Brasil.
- Martínez, S.D. y J. Gómez Z. 1995. Uso de lombricompostos en la producción comercial del crisantemo *Chrysanthemum morifolium* Ramat. *Acta Agronómica* 45: 7-127. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia.
- Reinecke, A.J. y S.A. Viljoen. 1990. The influence of feeding patterns on growth and reproduction of the vermicomposting earthworm *Eisenia fetida* (Oligochaeta). *Biol. Fert. Soils* 10: 184-187.
- Reinecke, A.J. y S.A. Viljoen. 1991. Vertical deposition of cocoons by the compost worm *Eisenia fetida* (Oligochaeta). *Pedobiología* 35: 147-152.
- Reinecke, A.J., S.A. Viljoen y R.J. Saayman. 1992. The suitability of *Eudrilus eugeniae*, *Perionix excavatus* and *Eisenia fetida* (Oligochaeta) for vermicomposting in Southern Africa in terms of their temperature requirements. *Soil Biol. Biochem.* 24: 1295-1307.
- Rodríguez, F., G. Velázquez, C. Chamorro y N. Martínez. 1992. Adaptación tecnológica de la lombricultura en la zona cafetalera de Albán Cundinamarca. *Acta Biológica Colombiana* (7 y 8): 91-109.
- Rodríguez, S.J. 1993. *La fertilización de los cultivos, un método racional.* Colección en Agricultura, Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

EFFECTO DE DOSIS Y FUENTE DE NITROGENO EN RENDIMIENTO Y CALIDAD POSTCOSECHA DE TOMATE EN FERTIRRIEGO

Nitrogen Rate and Source Effect on Yield and Postharvest Quality of Tomato, Grown in Fertigation Conditions

Manuel Villarreal Romero¹, Raymundo S. García Estrada¹, Tomás Osuna Enciso¹ y Adolfo D. Armenta Bojórquez²

RESUMEN

La presente investigación se llevó a cabo en el valle de Culiacán, Sinaloa, México, en un suelo representativo de la región (Pellustert), para conocer el efecto de dosis y fuentes de nitrógeno por etapas de desarrollo del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), en condiciones de fertirrigación por goteo. En el centro y norte de Sinaloa se siembran anualmente cerca de 20 mil ha de tomate para exportar y consumir en fresco. Los productores de esta hortaliza emplean dosis de N superiores a los requerimientos del cultivo, en gran parte en forma nítrica, lo que incide en altos costos por fertilización y en contaminación del suelo y mantos acuíferos. Se estudiaron nueve tratamientos, correspondientes a tres relaciones NH_4/NO_3 y tres etapas de desarrollo del cultivo, con 250 kg ha^{-1} de N; se incluyó un testigo equivalente a 450 kg ha^{-1} de N, mismo que emplean los productores de tomate en la región. La producción de fruto para exportación en los tratamientos con 250 kg ha^{-1} de N y proporción $75\%\text{NH}_4/25\%\text{NO}_3$ en tres etapas de desarrollo del cultivo fue estadísticamente igual al testigo de 450 kg ha^{-1} de N con $25\%\text{NH}_4/75\%\text{NO}_3$ durante el ciclo del cultivo. Las dosis de K y Ca asociadas a las fuentes de N y proporciones NH_4/NO_3 empleadas en las distintas etapas de desarrollo del cultivo, no influyeron significativamente en la producción de fruto y su calidad postcosecha de 0 a 22 días de simulación de mercadeo (firmeza, acidez, color). La concentración de sólidos solubles totales (grados Brix) presentó una tendencia hacia la baja en los tratamientos con

proporción alta de N-NH_4 en todas las etapas de desarrollo del cultivo. La pérdida de peso durante el estudio postcosecha no fue significativamente diferente entre el testigo y el resto de los tratamientos. Entre los tratamientos de 250 kg ha^{-1} de N, el tratamiento con la proporción $75\%\text{NH}_4/25\%\text{NO}_3$ durante la etapa de desarrollo vegetativo a cuaje de frutos del primer racimo floral y $25\%\text{NH}_4/75\%\text{NO}_3$ en el resto del desarrollo del cultivo conservó, por lo general, alta calidad postcosecha de los frutos (firmeza, grados Brix, y acidez), así como alta producción, y además fue uno de los tratamientos con más bajo costo por fertilización nitrogenada. En adición a lo anterior, al emplear menor cantidad de nitrógeno nítrico, los costos de producción se reducen y la concentración de N-NO_3 en los frutos de tomate y la contaminación de los mantos freáticos se disminuyen.

Palabras clave: *Lycopersicon esculentum* Mill., nutrición vegetal, vida de anaquel, riego por goteo.

SUMMARY

The present research was done in the Culiacan Valley, Sinaloa, Mexico. A common regional soil (Pellustert) was used to determine rate and source effects of drip fertigated nitrogen on different tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) development stages. Tomatoes are grown in central and northern Sinaloa with almost 20 000 ha, mainly for export as fresh produce. Nitrogen rates exceeding crop requirements, usually as $\text{NO}_3\text{-N}$, are generally used by tomato growers, resulting in higher costs and pollution of soil and underground water. In this work, nine treatments resulted from combining three NH_4/NO_3 ratios and three tomato crop development stages. Each of the treatments received 250 kg ha^{-1} N. A 450 kg ha^{-1} N control treatment, which is the usual N rate used by tomato growers in the region, was included. Export quality fruit yield of treatments receiving 250 kg ha^{-1} N and a ratio of $75\%\text{NH}_4/25\%\text{NO}_3$ during three development stages was statistically equal to the

¹ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo-Unidad Culiacán. km 5.5 Carr. Culiacán-Eldorado, Apartado Postal 32-A, Culiacán, Sinaloa, México. (mvilla@ciad.edu.mx)

² Centro Interdisciplinario de Investigación y Desarrollo Integral Regional-Sinaloa. Km 1.0 Carr. a las Glorias, Apartado Postal 280, Guasave, Sinaloa, México.

control that received 450 kg ha⁻¹ N with 25%NH₄/75%NO₃ during the entire growing period. The different K and Ca doses associated to N sources and NH₄/NO₃ ratios used in different developing stages did not significantly influence fruit yield and postharvest quality. Concentration of soluble solids (°Brix) decreased for treatments with relatively high N-NH₄ ratios during the entire crop developing stages. Weight loss during postharvest evaluation was not significantly different between the control and the other treatments. Among the 250 kg ha⁻¹ N treatments, Treatment 7 generally presented high postharvest quality (fruit firmness, °Brix, and acidity), as well as high fruit yield; also, this treatment had the lowest cost in N fertilization. The use of smaller amounts of N-NO₃ results in lower production costs, and N-NO₃ in tomato fruits and underground water pollution are reduced.

Index words: Lycopersicon esculentum Mill., plant nutrition, shelf life, drip irrigation.

INTRODUCCION

En el noroeste de México, en los últimos años se ha incrementado la práctica de fertirrigación en riego por goteo, principalmente en hortalizas; sin embargo, la investigación en este aspecto sigue siendo escasa. En el centro y norte de Sinaloa se siembran cada año cerca de 20 mil ha de tomate para consumo fresco, con fines de exportación, como ocurrió en el ciclo agrícola 1997/1998 con 22 200 ha de este cultivo (CAADES, 1997). En general, se aplican dosis de fertilizantes superiores a los requerimientos del cultivo, como es el caso del nitrógeno (N), misma que en muchos casos asciende a 450 kg ha⁻¹. Estas aplicaciones de nutrimentos pueden, en determinadas circunstancias, no ser perjudiciales para el rendimiento y la calidad de los frutos, pero inciden en los costos de producción y, además, son un desperdicio de fertilizante (Carballo *et al.*, 1994) y una fuente de contaminación del suelo y mantos acuíferos subterráneos (Hochmuth y Clark, 1991). En la práctica de fertirrigación de cultivos, es muy importante el uso adecuado de las fuentes de fertilizante nitrogenado (nitráticas, amoniacales y ureicas), ya que el empleo inapropiado de la relación N-NH₄/N-NO₃ en la fertirrigación puede causar problemas nutricionales en las plantas (Lips *et al.*, 1990). Sin embargo, cuando las condiciones del suelo y clima lo permiten, es posible emplear cantidades

relativamente altas de N-NH₄ respecto a N-NO₃ (Hageman, 1984). Esto también estimula el crecimiento de las plantas (Merkel, 1973; Hartman *et al.*, 1986) y con la ventaja adicional de que las fuentes amoniacales, incluyendo la urea, son más económicas que las nitráticas y se logra reducir la lixiviación de N-NO₃ hacia los mantos acuíferos, situación que se ha detectado en el valle de Culiacán (Burgueño *et al.*, 1995); además, se evita la posible e indeseable acumulación de este ion en los frutos (Luo *et al.*, 1993). Por lo anterior, en el presente trabajo se planteó como objetivo central, establecer las relaciones óptimas de N-NH₄ y N-NO₃ por etapas de desarrollo del cultivo de tomate híbrido tipo determinado y su influencia en el rendimiento y la calidad postcosecha de fruto.

MATERIALES Y METODOS

Ubicación del Sitio Experimental

La presente investigación se realizó en el Campo Experimental del Valle de Culiacán del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Geográficamente se ubica a 24°48'30" N y 107°24'30" O, a una altitud de 38 m (INIFAP, 1997). El suelo del sitio experimental corresponde a un Pellustert (USDA-Soil Conservation Service, 1975). El clima es semiárido BS1(h')W(e), con lluvias predominantes en verano y erráticas en invierno (García, 1973); la precipitación pluvial media anual es de 800 mm. La temperatura media anual es de 26.8 °C con máximas de 34 a 43.5 °C en verano y mínimas de 2 a 8.5 °C en invierno. La humedad relativa media anual es de 68% con una máxima de 81% en septiembre y la mínima de 51% en abril (INIFAP, 1997).

Siembra y Análisis Químico de Suelo

El 30 de octubre de 1998 se sembró el híbrido EF-99 de crecimiento determinado, en surcos de 1.80 m de separación y distancia entre plantas de 0.40 m, con una densidad de 13 888 plantas ha⁻¹. Previo al establecimiento del experimento, se tomaron muestras de suelo de 0 a 30 cm de profundidad para efectuar los análisis químicos, cuyos resultados fueron los siguientes: pH de 7.5 a 7.6, conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación de 1.25 a 1.4 dS m⁻¹, materia orgánica y N total de < 1.0 y < 0.05%, respectivamente, fósforo (P) extractable < 15 mg kg⁻¹,

K, Ca y Mg (1.45, 25 y 6 $\text{cmol}_{(+)}$ kg^{-1} de suelo, respectivamente). La textura del suelo es arcillosa (54% de arcilla, 23% de limo y 24% de arena). El análisis químico del agua de riego presentó un pH de 7.7, CE de 0.20 dS m^{-1} ; el contenido de Ca, Mg, Na, K, CO_3^{-2} , HCO_3^{-} , Cl y SO_4^{-2} fue de 1.0, 0.5, 0.6, 0.15, 0.0, 1.1, 0.6 y 0.55, respectivamente, y una RAS de 0.70; el agua se clasifica como C1S1, agua de buena calidad, apta para la mayoría de los cultivos comunes.

Tratamientos y Diseño Experimental

Los tratamientos estudiados se detallan en el Cuadro 1. Del Tratamiento 1 al 9 les correspondió la dosis de 250 kg ha^{-1} de N y consistió en la combinación de diferentes proporciones de N amoniacal y nítrico, en distintas etapas de desarrollo del cultivo; el Tratamiento 10 o testigo (Cuadro 3), correspondió a la dosis que comúnmente emplean los productores de la región (450 kg ha^{-1} de N). El diseño experimental fue bloques al azar con tres repeticiones.

Fertirriego

Previo al trasplante en campo de las plántulas de tomate, de 35 días de edad, se aplicó un riego de inundación al lote experimental hasta capacidad de campo del suelo. Los riegos posteriores se efectuaron con base en lecturas de tensiómetros de vacío, regándose al alcanzarse tensiones entre 25 y 30 Kp. Para la aplicación de fertilizantes se utilizó una bomba

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos de fertilización de N, empleando diferentes relaciones NH_4/NO_3 en distintas etapas fenológicas.

Tratamiento	Relación NH_4/NO_3 en etapa [†]			Dosis de N kg ha^{-1}
	A	B	C	
1	0/100	25/75	25/75	250
2	25/75	0/100	25/75	250
3	25/75	25/75	0/100	250
4	50/50	25/75	25/75	250
5	25/75	50/50	25/75	250
6	25/75	25/75	50/50	250
7	75/25	25/75	25/75	250
8	25/75	75/25	25/75	250
9	25/75	25/75	75/25	250
10	25/75	25/75	25/75	450

[†] Etapa A = desarrollo vegetativo a cuaje de frutos del primer racimo floral.

Etapa B = desarrollo de primeros frutos a inicio de su madurez.

Etapa C = durante la cosecha.

portátil de motor de gasolina y la solución nutritiva se inyectó en la tubería de riego a cada tratamiento. La dosificación del N durante el desarrollo del cultivo en los Tratamientos 1 a 9 se indica en el Cuadro 2; el total de P y K aplicado en estos tratamientos fue 52 y 250 kg ha^{-1} , respectivamente; el suministro de N, P y K del Tratamiento 10 se muestra en el Cuadro 3. Antes de aplicar cada fertirriego, el agua se acidificaba con ácido sulfúrico a un pH entre 6.0 y 6.5, con la finalidad de evitar precipitaciones de los fertilizantes en la solución de riego.

Forma de Suministro del N, K y Ca

En el Cuadro 4, se describe la dosificación del N- NH_4 , así como el K y Ca asociados a la fuente de N, en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo.

Medición de Parámetros para Evaluar los Tratamientos

Concentración salina de la solución del suelo (Conductividad eléctrica). Con objeto de conocer la influencia en el rendimiento y la calidad del fruto de la concentración salina en la solución del suelo, por efecto de la aplicación de los fertilizantes en cada tratamiento, se realizaron muestreos semanales de la solución del suelo, en el período de 30 a 131 días después del trasplante (ddt), empleándose extractores de solución del suelo (sondas de succión con cápsula porosa), instalados a 30 cm de profundidad.

Cosecha de fruto. La cosecha de fruto inició a 93 ddt y comprendió ocho cortes, desde el 01 de febrero al 20 de marzo de 1999. Para la clasificación de tamaños de fruto se emplearon los estándares del USDA (1992); los frutos de calidad de exportación fueron los que no presentaban defectos y de tamaños 4x4, 4x5, 5x5, 5x6, 6x6 y 6x7 (32, 40, 50, 60, 108 y 126 frutos por caja, respectivamente); el peso aproximado de cada caja es de 11 kg. Los frutos de mercado nacional tienen los mismos tamaños pero con defectos leves. Los defectos considerados en la clasificación fueron carigato, deformes, bofos, pared gris, virosos, asoleados y rajados. Defectos acentuados y tamaños menores de 6x7, así como con pudrición apical se consideraron como rezaga.

Calidad postcosecha de frutos. Para la evaluación de la calidad postcosecha de los frutos de tomate, cosechados en estado de madurez verde-maduro, se realizó un estudio que consistió en mediciones de su firmeza, acidez, concentración de sólidos solubles

Cuadro 2. Dosificación del N en los Tratamientos 1 al 9.

Dosis	Días después del trasplante						
	0-17	18-33	34-49	50-64	65-80	81-96	97-138
kg ha día ⁻¹	0.52	1.00	1.67	2.19	3.13	4.38	1.10
kg ha ⁻¹ (en el período)	9	16	27	33	50	70	45

totales, pérdida de peso y color, colocándose los frutos en condiciones de simulación de mercadeo (cámaras de almacenamiento, a 20 °C y 70% de humedad relativa), de acuerdo con la metodología descrita en Araiza *et al.* (1997).

Para medir la firmeza (Newtons), se utilizó un penetrómetro Chatillon, mod. DFIS- 50; la acidez titulable por titulación de neutralización y la concentración de sólidos solubles (CSS) empleando un refractómetro Abbe Leica Mark II. La pérdida de peso se determinó en una balanza electrónica y se expresó en porcentaje acumulado. Las evaluaciones empezaron desde el momento de la cosecha y a 5, 10 y 20 días después del corte.

RESULTADOS Y DISCUSION

Rendimiento de Fruto

La producción de fruto para exportación de los Tratamientos 2, 5, 7, 8 y 9 (250, 52 y 250 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente) fue estadísticamente igual (Duncan, $\alpha = 0.05$) al testigo (450, 118 y 498 kg ha⁻¹ N, P y K). El Tratamiento 7 fue uno de los sobresalientes en la producción de fruto total comercializable y de exportación (Cuadro 5); este tratamiento mostró alta producción de frutos de tamaño grande y mediano de exportación y resultó ser uno de los más económicos, dado la cantidad

Cuadro 3. Dosificación de N, P y K en el Tratamiento 10.

DDT [†]	N	N	P	K
	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
0-17	16.2	3.6	35	-
18-33	28.8	6.4	-	37
34-49	48.6	10.8	17	37
50-64	59.4	13.2	15	55
65-80	90.0	20.0	14	85
81-96	126	28.0	14	137
97-116	43.2	9.6	13	97
117-140	37.8	8.4	10	50
Total	450	100	118	498

[†] DDT = días después del trasplante.

aplicada de N amoniacal respecto al nítrico, ya que se suministraron 39 kg ha⁻¹ de N-NH₄ en la etapa de desarrollo vegetativo y floración temprana [0 a 49 días después del trasplante (ddt)], 38.3 kg en etapa de desarrollo de los primeros frutos (50 a 96 ddt) y 11.3 kg en etapa de cosecha (96 a 138 ddt). La dosis complementaria de N en este tratamiento, en las tres etapas de desarrollo del cultivo estudiadas, se suministró como N-NO₃ (Cuadro 4). La dosis de N-NH₄ antes indicada puede aplicarse bajo las condiciones ambientales en que se desarrolló el experimento, o sea buena luminosidad (medio nublado a despejado) y temperatura mensual media máxima de 30 °C y media mínima de 13 °C, en siembras de segunda etapa del cultivo de tomate (octubre), pero condicionado a mantener una buena aireación del suelo en la zona radical; con estas condiciones de suelo y clima es muy factible el uso de esta fuente de N (Ganmore-Newman y Kafkafi, 1980; Hagin *et al.*, 1990). Por otro lado, la aplicación de N amoniacal es factible desde el punto de vista económico como ambiental, ya que las fuentes nítricas son costosas y si no se aplican con cuidado provocan contaminación de mantos acuíferos (Hochmuth y Clark, 1991) y cantidades excesivas de NO₃ en verduras comestibles por aplicaciones excesivas de NO₃ (Mengel y Kirkby, 1982). El nitrato puede acumularse en frutos si las plantas se fertilizan con dosis elevadas de N nítrico (Mengel y Kirkby, 1982).

El empleo de cantidades relativamente altas de N amoniacal en los Tratamientos 5 y 8 durante la etapa de desarrollo de frutos (50 a 96 ddt) no afectó la producción, para mercado de exportación o nacional. Lo mismo ocurrió en el Tratamiento 9 que también recibió relativamente alta dosis de N-NH₄ en la época de cosecha. El suministro de N amoniacal puede ser perjudicial para el crecimiento de las plantas debido a que disminuye en la absorción de K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ (Wilcox *et al.*, 1977; Marti y Mills, 1991). Cantidades relativamente altas de N-NH₄ en etapas de desarrollo avanzado del cultivo, pueden ser perjudiciales en circunstancias desfavorables para la nitrificación, como bajas temperaturas, pobre aireación y escasa

Cuadro 4. Suministro de N-NH₄, K y Ca, por tratamiento y etapa de desarrollo del cultivo de tomate, variedad EF-99.

Tratamiento	Días después del trasplante										Total	
	0-49			50-96			97-138			K		
	52 kg ha ⁻¹ de N			153 kg ha ⁻¹ de N			45 kg ha ⁻¹ de N					
	N-NH ₄	K	Ca	N-NH ₄	K	Ca	N-NH ₄	K	Ca	K	Ca	
	----- kg ha ⁻¹ -----											
1	0	40	34	38.3	178	15	11.3	32	10	250	59	
2	13	79	0	0	145	92	11.3	27	16.5	251	109	
3	13	78	0	38.3	133	29.5	0	41	27	251	57	
4	26	0	0	38.3	212	21	11.3	38	8.9	250	59	
5	13	78	0	<u>76.5</u>	134	28	11.3	38	9.0	250	37	
6	13	81	1.7	38.3	152	10	22.5	17	0	250	12	
7	<u>39</u>	0	0	38.3	202	9.1	11.3	48	6.1	250	15	
8	13	79	1.2	<u>114.8</u>	104	3.7	11.3	38.6	0	221	4.9	
9	13	64.1	4.5	38.3	187	17.9	<u>33.8</u>	0	0	251	22	

Las cifras subrayadas indican empleo de urea como principal fuente de N.

actividad microbiana en el medio radical, lo cual no fue el caso en las condiciones en que se desarrolló el experimento, por lo que se asume que el N-NH₄ aplicado en estas circunstancias se transforma relativamente rápido a N-NO₃ (Liu y Shelp, 1993), y no permanecen cantidades importantes de N-NH₄ en el medio radical.

Respecto al empleo de urea como fuente de N, en los Tratamientos 7, 8 y 9 se aplicó urea en cantidades relativamente altas, equivalentes a 44, 82 y 39% del N-NH₄, respectivamente, durante el desarrollo del cultivo; sin embargo, las plantas en dichos tratamientos no se vieron perjudicadas en la producción y calidad de fruto, por lo que se infiere que hubo una rápida hidrólisis de la urea con la consecuente nitrificación (Marschner, 1995).

Dosificación de K y Ca Asociado a la Fuente de N y su Efecto en la Producción de Fruto de Tomate

Potasio. Analizando las dosis diferenciales de K suministradas en los Tratamientos 1 a 9, en las tres

etapas de desarrollo del cultivos estudiadas (Cuadro 4), no se observaron diferencias estadísticas significativas (Duncan, $\alpha = 0.05$) en rendimiento de fruto total comercializable ni de exportación, a favor de las dosis mayores de K. Lo mismo se puede afirmar si comparamos el suministro de este nutrimento en el tratamiento testigo en dichas etapas de desarrollo del cultivo (Cuadro 3). De lo anterior puede destacarse que la respuesta observada en producción de fruto a la adición diferencial de K en la producción de fruto, en las etapas de desarrollo indicadas, obedece al nivel de K que presentó en análisis del suelo de 500 a 560 mg kg⁻¹ de K asimilable, lo cual es considerado alto aún para un suelo arcilloso y en agricultura de riego. Estos resultados concuerdan con los de Armenta (1998), también en tomate bola y en condiciones similares de suelo y clima, quien no encontró diferencias significativas en la producción comercializable de fruto de tomate bola entre 246 y 498 kg ha⁻¹ de K₂O.

Calcio. En los Tratamientos 6, 7 y 8 se aplicó muy poco Ca en las etapas de desarrollo de frutos y en la

Cuadro 5. Producción de fruto de tomate (kg ha⁻¹), por tratamiento.

Tratamiento	Total	Exportación	Grande [†]	Mediano [†]	Chico [†]
1. 0NH ₄ /100NO ₃ (a)	63 270 b	46 319 d	16 077 a	18 581 bc	11 661 b
2. 0NH ₄ /100NO ₃ (b)	74 060 ab	59 314 abcd	15 441 a	26 672 a	17 201 ab
3. 0NH ₄ /100NO ₃ (c)	64 691 b	48 929 bcd	13 524 a	19 539 abc	15 867 ab
4. 50NH ₄ /50NO ₃ (a)	61 982 b	47 492 cd	13 309 a	17 035 c	17 147 ab
5. 50NH ₄ /50NO ₃ (b)	69 590 ab	54 683 abcd	14 056 a	19 489 abc	21 137 ab
6. 50NH ₄ /50NO ₃ (c)	66 703 b	51 643 bcd	14 746 a	18 849 bc	18 047 ab
7. 75NH ₄ /25NO ₃ (a)	76 725 ab	61 280 ab	18 155 a	22 839 abc	20 286 ab
8. 75NH ₄ /25NO ₃ (b)	77 518 ab	60 801 abc	16 399 a	22 520 abc	21 881 a
9. 75NH ₄ /75NO ₃ (c)	72 948 ab	56 761 abcd	14 272 a	23 268 abc	19 220 ab
10. Testigo [†]	82 578 a	65 964 a	18 794 a	25 182 ab	21 988 a

[†] Tamaños de exportación. [†] = 450 kg ha⁻¹ de N. (a) = etapa de desarrollo vegetativo hasta cuaje de primeros frutos, (b) = etapa de desarrollo de primeros frutos a inicio de su madurez, (c) = cosechas. Las medias entre columnas con la misma letra, son estadísticamente iguales (Duncan, $\alpha = 0.05$).

cosecha. La dosis del elemento fluctuó entre 3.7 y 10, y 0 a 6.1 kg ha⁻¹, respectivamente en cada etapa (Cuadro 4), sin embargo, no hubo diferencias significativas en la producción de fruto de exportación (Duncan, $\alpha_{0.05}$) con los Tratamientos 3 y 2 que recibieron mayor cantidad de Ca: 6.5 a 92 kg ha⁻¹ en las mismas etapas de desarrollo del cultivo. Lo anterior muestra que el Ca aplicado no incidió en la producción de fruto con calidad de exportación, asumiendo que el suelo posee alta disponibilidad de este nutrimento, dado su pH ligero a moderadamente alcalino y textura arcillosa, y que no se presentaron condiciones adversas para su absorción por el cultivo.

El rendimiento significativamente menor de los Tratamientos 1, 3, 4 y 6 no obedece al efecto de las dosis diferenciales de Ca ni de K, como puede observarse en el Cuadro 4 y, por otro lado, de acuerdo con el tipo de suelo, Pellustert (USDA-Soil Conservation Service, 1975) y con Burgueño *et al.* (1995), éste es rico en Ca y K; sin embargo, podría deberse a la influencia de fitopatógenos radicales en las plantas de estos tratamientos como: *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici* y *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (Ramírez, 1998).

Forma de Suministro del N, K y Ca en la Calidad Postcosecha del Fruto de Tomate

Firmeza. En la Figura 1 se muestra el comportamiento de la firmeza de frutos almacenados en condiciones de simulación de mercadeo (20 °C, Kirkby, 1982) y, por otra parte, el alto contenido en el suelo de este elemento no permite observar respuesta. La firmeza relativamente alta del Tratamiento 8 en el 70% de humedad relativa y 22 días de almacenamiento).

En general, el tratamiento testigo presentó una tendencia hacia una menor firmeza durante todo el período de simulación de mercadeo, aunque estadísticamente no significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$).

La firmeza de los frutos en el momento de la cosecha inició con valores entre 35 y 46 Newtons y fueron relativamente mayores, aunque no significativos (Tukey, $\alpha_{0.05}$) en los tratamientos de dosis baja de N que en el testigo de dosis alta. Estos valores son similares a los reportados por Araiza *et al.* (1997) en híbridos de tomate de larga vida de anaquel, cosechados en el valle de Culiacán, Sinaloa. Al término del estudio de postcosecha, 22 días de simulación de mercadeo, los frutos se mantuvieron

arriba de los 5 Newtons de firmeza, valor considerado por Ojeda (1995) como no comercializables.

Al comparar los Tratamientos 1 al 9 (250 kg ha⁻¹ de N) contra el testigo (450 kg ha⁻¹ de N), este último presentó, en general, una tendencia a menor firmeza durante el estudio postcosecha. La causa probable de menor firmeza de frutos en el tratamiento testigo con más alta dosis de N, podría estar relacionado con el diámetro más grande del pedúnculo de los frutos (datos no presentados) del tratamiento testigo, lo cual puede inducir mayor respiración y pérdida de peso y firmeza (Araiza, *et al.*, 1997). No se observó una relación clara que indique un efecto, positivo o negativo, de la dosificación del Ca, K o el N-NH₄ en la firmeza de los frutos de tomate en los Tratamientos 1 al 9. Respecto a la no-respuesta en firmeza de los frutos por la dosis alta de Ca en el Tratamiento 2, puede atribuirse a que, por un lado, la aplicación fuerte se hizo en una etapa avanzada de desarrollo del cultivo, cuando las raíces de las plantas no absorben con facilidad el Ca por su edad y estar suberizándose los ápices (Clarkson y Sanderson, 1978; Mengel y estudio postcosecha no estuvo directamente relacionada con aplicaciones altas de Ca en las épocas de desarrollo de los primeros frutos (50 a 96 ddt) y en la cosecha (97 a 138 ddt), ya que en este tratamiento se aplicó relativamente poco Ca. Este mismo tratamiento tampoco tiene relación directa con dosis alta de K en las etapas de desarrollo antes indicadas (Cuadro 4), ya que hubo otros tratamientos, como el Tratamiento 3, con alta firmeza pero con menor suministro de K en estas mismas etapas de desarrollo del cultivo. Por lo anterior podemos decir que no se encontró repuesta de la aplicación de alta dosis de K en dichas etapas de desarrollo del cultivo en la firmeza del fruto, no obstante que el K puede favorecer la acumulación de sólidos totales en el fruto (Geralson, 1985). No se observó una relación directa entre dosis de Ca y firmeza del fruto, a pesar de que es bien conocido que este nutrimento mejora dicho parámetro de calidad poscosecha del fruto, al proporcionar mayor rigidez a la pared celular (Cooper and Bangerth, 1976; Marschner, 1995). Sin embargo, la falta de respuesta al K y Ca aplicado se debe a que el tipo de suelo del sitio experimental corresponde a un Vertisol Pélico (USDA-Soil Conservation Service, 1975) y presenta alta disponibilidad de K (Barber *et al.*, 1985) y Ca (Mortvedt y Cox, 1985) para las plantas.

La alta dosis de N-NH₄ en los Tratamientos 8 y 5 en las etapas de desarrollo 50 a 96 y 97 a 138 ddt no

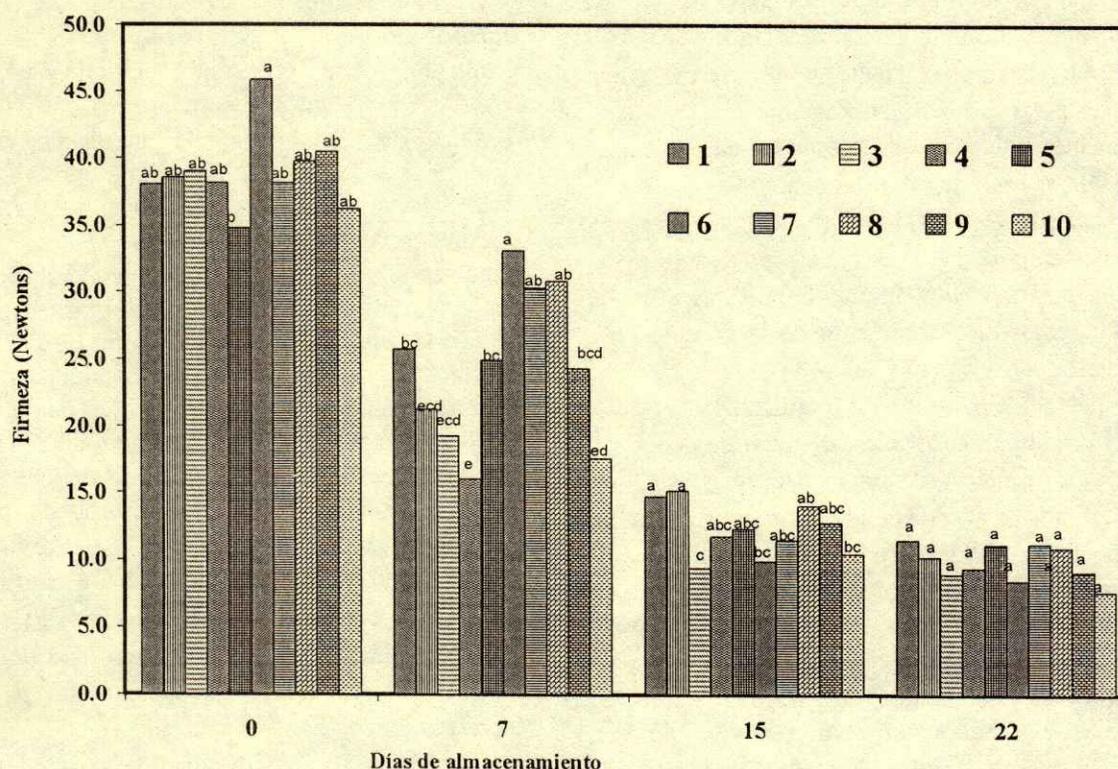


Figura 1. Firmeza de frutos de tomate verde-maduro, por tratamiento y tiempo de almacenamiento a 20 °C.

Cuadro 6. Acidez y concentración de sólidos solubles en frutos de tomate por tratamiento y tiempo de almacenamiento a 20 °C.

Tratamiento	Acidez (días de almacenamiento a 20 °C)			Sólidos solubles (días de almacenamiento a 20 °C)		
	0	15	22	0	15	22
	----- % -----					
1	0.6359 a	0.5061 a	0.3341 a	4.20 b	3.60 a	4.00 de
2	0.6263 a	0.3798 ab	0.4002 a	4.20 b	3.50 a	3.70 ef
3	0.6348 a	0.3591 b	0.3916 a	4.20 b	3.50 a	3.40 f
4	0.5500 a	0.3875 ab	0.4117 a	4.20 b	3.60 a	4.00 de
5	0.6484 a	0.4091 ab	0.3946 a	4.60 a	3.50 a	4.30 bcd
6	0.5239 a	0.3746 ab	0.3837 a	4.10 bc	3.60 a	4.70 ab
7	0.6239 a	0.4625 ab	0.3399 a	3.80 bc	3.60 a	4.70 ab
8	0.6280 a	0.4476 ab	0.3209 a	3.70 c	3.60 a	4.80 a
9	0.6710 a	0.4485 ab	0.3760 a	4.10 bc	3.60 a	4.60 abc
10	0.5701 a	0.3871 ab	0.3954 a	3.70 c	3.30 a	4.20 cd

Medias con la misma letra, en la misma columna, son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$).

incidió negativamente en la firmeza de los frutos, como podría esperarse por el antagonismo del ion NH_4^+ sobre la absorción del Ca^{2+} y K^+ (Marti y Mills, 1991). Esta situación puede atribuirse a que en el

medio radical hubo condiciones adecuadas de oxigenación, temperatura y actividad de microorganismos nitrificantes para que el proceso de

nitrificación del $N-NH_4$ se llevara a cabo en forma expedita (Liu y Shelp, 1993).

Concentración de sólidos solubles (CSS). En el Cuadro 6 se observa que la CSS promedio fue de 4.10, 3.54 y 4.20 °Brix, en el momento de la cosecha, a los 15 y 22 días postcosecha o simulación de mercadeo, respectivamente. Esta variable presentó una tendencia hacia la baja en los tratamientos con dosis relativamente alta de $N-NH_4$ en todas las etapas de desarrollo del cultivo. El Tratamiento 10, contrario a lo esperado, mostró menor o similar CSS que el resto de los tratamientos en el momento de la cosecha y a 15 y 22 días postcosecha (Cuadro 6), ya que en la solución del suelo este tratamiento presentó concentración salina relativamente alta (alrededor de 2.61 dS m^{-1} vs. 1.0 dS m^{-1} del resto de los tratamientos) por su correspondiente mayor dosis de fertilizante (Figura 3). Es conocido que alta concentración salina en la solución del suelo eleva la CSS de frutos como el tomate (Nichols *et al.*, 1995) entre otros frutos, lo cual no ocurrió en este estudio.

Acidez titulable. La acidez del fruto (Cuadro 6) detectada en el Tratamiento 10 (testigo) no fue diferente (Tukey, $\alpha = 0.05$) de la medida en el resto de los tratamientos de dosis baja de fertilización. En una investigación previa con tomate, en condiciones

similares de suelo y clima, no se encontró diferencia significativa en acidez de fruto en diferentes dosis de N y K (Villarreal *et al.*, 1999).

Pérdida de peso. La pérdida postcosecha de fruto en promedio, por este concepto, fue de 1.88, 3.09, 4.52, 5.33 y 8.65 (%), respectivamente a 3, 6, 9, 12 y 20 días de simulación de mercadeo, a 20 °C (Figura 2); la diferencia observada en pérdida de peso entre tratamientos no es significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). Valores similares de pérdida de peso se encontraron en un estudio de calidad postcosecha, realizado por Araiza *et al.* (1997) en tres híbridos, y Villarreal *et al.* (1999) en otro híbrido. Todos estos híbridos son de larga vida de anaquel y se cultivaron en condiciones similares de suelo y clima en el valle de Culiacán, Sinaloa. Por otro lado, no se observó una relación clara entre la dosificación del $N-NH_4$ y del K en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo y la pérdida de peso de fruto.

Color externo. El Tratamiento 1 presentó frutos cuyo color rojo externo fue más intenso. No se encontró una relación directa entre la intensidad del color y la dosis de K, $N-NH_4$ o la dosis total de N. Otros investigadores han encontrado efecto positivo de aplicación de K en el desarrollo del color rojo externo del fruto (Amaboe y Sinnadurai, 1977; Adams *et al.*, 1978).

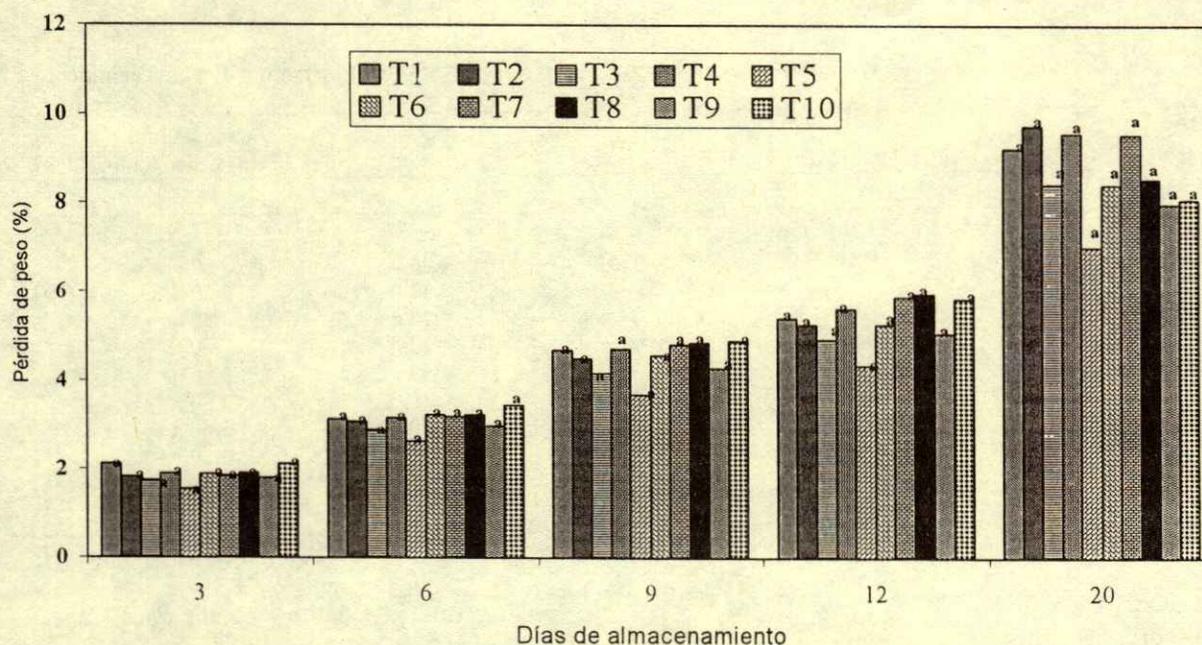


Figura 2. Pérdida de peso de frutos de tomate por tratamiento y tiempo de almacenamiento a 20 °C.

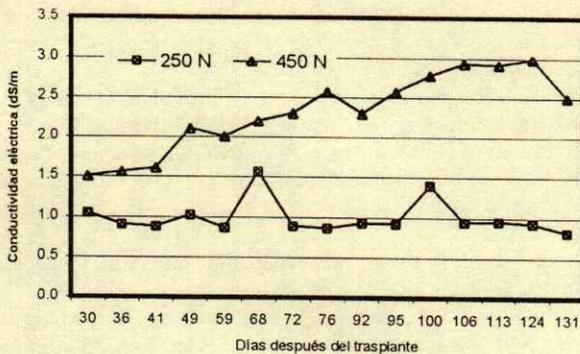


Figura 3. Concentración salina de la solución del suelo por efecto de dosis de N, durante el desarrollo del cultivo.

Concentración salina del suelo y calidad postcosecha. La concentración salina, determinada por la conductividad eléctrica (CE) de la solución del suelo, fue mayor en el tratamiento testigo (alta dosis de N, P, K) que en los Tratamientos 1 a 9 de dosis menor de dichos nutrimentos, misma que fluctuó entre 1.60 a 3.0 y 0.70 a 1.70 dS m^{-1} , para dosis alta y baja de N, P y K, respectivamente (Figura 3). Se ha encontrado que a mayor concentración salina de la solución nutritiva hay una alta concentración de sólidos solubles en el jugo de los frutos (Nichols *et al.*, 1995), sin embargo, en este estudio no ocurrió así, debido probablemente a que los valores de CE más altos (cerca de 3 dS m^{-1}) se presentaron por poco tiempo. La acidez titulable, firmeza, pérdida de peso y color de los frutos no fueron significativamente diferentes entre el testigo y los tratamientos de menor concentración salina.

CONCLUSIONES

- En el valle de Culiacán, en suelos tipo Vertisol Pélico es factible obtener altos rendimientos de fruto de tomate para exportación cuando se reducen sustancialmente la dosis de fertilización nitrogenada y las fuentes de N-NO_3 , que utilizan los productores normalmente en el cultivo de tomate. La dosis de 250 kg ha^{-1} de N fue igual en rendimiento de fruto a la de 450 kg ha^{-1} de N, sin afectar la calidad referente a tamaño, firmeza, pérdida de peso y sabor. Esta disminución en la dosis de N significa un ahorro económico considerable, además de reducir sustancialmente el uso de N-NO_3 respecto al tratamiento utilizado por los productores de la región.
- Adicionalmente, los resultados demuestran que es factible disminuir la fertilización fosfórica y potásica

sin afectar el rendimiento y la calidad postcosecha del fruto de tomate.

- Este ahorro de fertilizante impacta en los costos de producción, además de reducir la contaminación del suelo y de mantos acuíferos, sin menoscabo de la productividad del cultivo de tomate.

AGRADECIMIENTOS

A los M.C. Verónica Pérez Rubio y J. Basilio Heredia, por su colaboración en los trabajos de campo, análisis de laboratorio y estadísticos. Al Sistema de Investigación Mar de Cortez (SIMAC), por el apoyo económico brindado para el presente trabajo (Proyecto SIMAC, clave 980107028). Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Campo Experimental del Valle de Culiacán y Fundación Produce Sinaloa, por todo su apoyo logístico en materiales de campo para la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Adams, P., J.N. Davies y G.W. Windsor. 1978. Effects of nitrogen, potassium and magnesium on the quality and chemical composition of tomatoes grown in peat. *J. Hortic. Sci.* 53: 115-122.
- Amaboe, R.A. y S. Sinnadurai. 1977. The influence of potassium, calcium and irrigation treatments on tomato fruit quality. *Acta Horticulturae* 53: 165-170.
- Araiza, L.E., C.J. Siller, S.M. Báez, R.D. Muy, E.R. García, B. Heredia y V.E. Sánchez. 1997. Maduración en frutos de tomate de larga vida de anaquel. *Tecnología de Alimentos* 32: 36.
- Armenta B., A.D. 1998. Relaciones óptimas de aniones y de cationes en la solución nutritiva en riego por goteo para la producción de tomate. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Barber, S.A., R.D. Munson y W.B. Dancy. 1985. Production, marketing, and use of potassium fertilizer. pp. 377-410. In: O.P. Engelstad (ed.). *Fertilizer technology and use*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Burgueño, C.H., J. Gómez R. y I. Montoya M. 1995. La fertirrigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Folleto Técnico 2. BURASAG. Culiacán, Sinaloa, México.
- CAADES. Confederación de Asociaciones Agrícolas del Estado de Sinaloa. 1997. Avances de siembras en hortalizas por asociación. Culiacán, Sinaloa, México.
- Carballo, S.J., S.M. Blandenship y D.C. Sanders. 1994. Drip fertigation with nitrogen and potassium and postharvest susceptibility to bacterial soft rot of bell peppers. *J. Plant Nutr.* 17: 1175-1191.
- Clarkson, D.T y J. Sanderson. 1978. Sites of absorption and translocation of iron in barley roots. Tracers and microautoradiographic studies. *Plant Physiol.* 61: 731-736.
- Cooper, T. y F. Bangerth. 1976. The effects of Ca and Mg treatments on the physiology, chemical composition and

- bitter-pit development of "Cox orange" apples. *Sci. Hortic. (Amsterdam)* 5: 49-57.
- Ganmore-Newman, R. y DU. Kafkafi. 1980. Root temperature and percentage NO_3/NH_4 effect on tomato plant development: I. Morphology and Growth. *Agron. J.* 72: 758-761.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF.
- Geralson, C.M. 1985. Potassium nutrition of vegetable crops. pp. 915-927. *In:* R.E. Munson (ed.). Potassium in agriculture. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.
- Hageman, R.H. 1984. Ammonium versus nitrate nutrition of higher plants. pp. 67-85. *In:* R.D. Hauck (ed.). Nitrogen in crop production. ASA, CSSA, SSSA. Madison, WI.
- Hagin, J., S.R. Olsen y A. Shaviv. 1990. Review of interaction of ammonium-nitrate and potassium nutrition of crops. *J. Plant Nutr.* 13: 1211-1226.
- Hartman, P.L., H.A. Mills y J.B. Jones. 1986. The influence of nitrate:ammonium ratios on growth, fruit development, and element concentration in "floradel" tomato plants. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 111: 487-490.
- Hochmuth, G.J. y G.A. Clark. 1991. Fertilizer application and management for micro (or drip) irrigated vegetables in Florida. Special Series Report SS-VEG-45. Fla. Cooperative Extension. University of Florida. Gainesville, FL.
- INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. 1997. pp. 10-12. *In:* Registro de observaciones climatológicas diarias. Estación meteorológica, Campo Experimental del Valle de Culiacán. Culiacán, Sin., México.
- Lips, S.H., E.O. Leidi, M. Silberbush, M.I.M. Soares y O.E.M. Lewis. 1990. Physiological aspects of ammonium and nitrate fertilization. *J. Plant Nutr.* 13: 1271-1289.
- Liu, L. y B.J. Shelp. 1993. Nitrogen partitioning in greenhouse-grown broccoli in response to varying NH_4/NO_3 ratios. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24: 45-60.
- Luo, J., Z. Lion y X. Yan. 1993. Urea transformation and the adaptability of three leafy vegetables to urea as a source of nitrogen in hydroponic culture. *J. Plant Nutr.* 16: 797-812.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition in higher plants. 2nd ed. Academic Press. London, UK.
- Marti, H.R. y H.A. Mills. 1991. Nutrient uptake and yield of sweet pepper as affected by stage of development and N form. *J. Plant Nutr.* 14(11): 1165-1175.
- Mengel, K. y E.A. Kirkby. 1982. Principles of plant nutrition. 2nd ed. International Potash Institute. Bern, Switzerland.
- Merkel, D. 1973. The influence of the relation between NO_3 and NH_4 in the nutrient solution on yield and organic and inorganic contents of tomato plants. *Z. Pflanz. Bodenkd.* 134:236-246.
- Mortvedt, J.J. y F.R. Cox. 1985. Production, marketing, and use of calcium, magnesium and micronutrient fertilizers. pp. 455-481. *In:* O.P. Engelstad (ed.). Fertilizer technology and use. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Nichols, M.A., E.F. Fadaljan, K.J. Fisher y L.M. Morgan. 1995. The effect of osmotic stress on the yield and quality of tomatoes. *Acta Horticulturae* 379: 105-111.
- Ojeda C., A.J. 1995. Evaluación del manejo poscosecha de tomate para la obtención de modelos de predicción de pérdidas cualitativas y cuantitativas. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Hermosillo, Son., México.
- Ramírez V., J. 1998. Enfermedades de la raíz del tomate. pp. 29-49. *In:* J. Cruz O., R. Estrada G. y A. Carrollo F. (eds.). Enfermedades de las hortalizas. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.
- USDA-Soil Conservation Service. 1975. Soil Taxonomy: A basic system for soil classification for making and interpreting surveys. Agriculture Handbook 436. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- USDA. 1992. Standards for grades of fresh tomatoes. United States Department of Agriculture. Washington, DC.
- Villarreal-Romero, M., V. Pérez Rubio y J.H. Siller Cepeda. 1999. Fertirrigación nitrogenada y potásica, y su efecto en la producción y calidad de tomate, en valle de Culiacán, Sinaloa. *Hort. Mex.* 7: 358-367.
- Wilcox, G.E., J.E. Hoff y C.M. Jones. 1973. Ammonium reduction of calcium and magnesium content on incidence of blossom-end rot of tomato fruit. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 98: 86-89.
- Wilcox, G.E., C.A. Mitchell y G.E. Hoff. 1977. Influence of nitrogen form on exudate rate, and ammonium, amide and cation composition of xylem exudate in tomato. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 102: 192-196.

PRODUCCION DE ALGODONERO TRANSGENICO FERTILIZADO CON ABONOS ORGANICOS Y CONTROL DE PLAGAS

Yield of Transgenic Cotton Fertilized with Organic Manure and Pest Control

José Dimas López-Martínez¹, Miguel Gallegos Robles¹, J. Santos Serrato C.¹, Ricardo D. Valdez Cepeda² y Enrique Martínez-Rubín³

RESUMEN

La Comarca Lagunera es una región donde cada año se producen 560 935 Mg de estiércol, lo cual plantea la posibilidad de su utilización en la agricultura. El sistema actual de producción del algodón se caracteriza por usar gran cantidad de insumos, agua, fertilizantes e insecticidas. El algodón transgénico posee una proteína (endotoxina), la cual es tóxica a las principales plagas del algodón (complejo gusano bellotero y gusano rosado), su uso podría reducir la aplicación de insecticidas. Sin embargo, la síntesis de esta proteína depende, principalmente, de la fertilización nitrogenada. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del tipo y dosis de abono orgánico que induzca el mejor rendimiento y contenido de proteína para el control de insectos. El trabajo se desarrolló en el verano de 1999 en el ejido Venecia, Durango, México. Se usó la variedad de algodón transgénico NuCOTN 35B, se emplearon nueve tratamientos como fuente de nitrógeno orgánico y un testigo (fertilización inorgánica). Las variables evaluadas fueron: contenido de proteína en planta, daño en cuadros y bellotas, y rendimiento. El experimento se estableció con un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se utilizó análisis de varianza, contrastes ortogonales y comparación de medias (Duncan) para el análisis estadístico. Los resultados indicaron que es mejor la fertilización con abono de bovino, el cual permitió obtener mejores

rendimientos, ya que con dosis de aplicación de 77 y 56 Mg ha⁻¹ se obtuvo un rendimiento de fibra de 7.08 y 5.75 Mg ha⁻¹, respectivamente. Para el caso de contenido de proteína, los resultados indicaron diferencia no significativa ($P > 0.05$). Se concluye que las diferencias en las fuentes de fertilizante, así como las dosis utilizadas, tienen un efecto diferente sobre la expresión de caracteres en algodón transgénico.

Palabras clave: Endotoxina, contrastes ortogonales, síntesis de proteína.

SUMMARY

In Mexico, the Comarca Lagunera is a region where 560 935 Mg of manure are generated every year, raising the possibility of its use in agriculture. The current cotton production system is characterized by the use of a large quantity of inputs, water, fertilizers, and insecticides. Transgenic cotton possesses a protein (endotoxin), which is toxic to the principal cotton pests (acorn worm and pink worm complex); the use of transgenic cotton could reduce insecticide application. However, the synthesis of this protein depends mainly on nitrogen fertilization. The objective of this work was to evaluate the effect of different types and dosages of organic fertilizers on yield and protein content for pest control. The experiment was done in the summer of 1999 at the 'ejido' Venecia, Durango, Mexico. The transgenic cotton variety NuCOTN 35B was used. Nine treatments of organic nitrogen and a control (inorganic fertilization) were assessed. Plant protein content, cotton ball damage and yield were evaluated. The experiment was established using a completely randomized block design with three replications. Analysis of variance, orthogonal contrasts and a test of comparison of means (Duncan) were performed for the statistical analysis. Results indicated that fertilization with cow manure resulted in the highest yields, since applications of 77 and 56 Mg ha⁻¹ produced 7.08 and 5.75 Mg ha⁻¹ fiber, respectively. Protein content was not significantly different

¹ Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango. Apartado Postal 142, 35000 Gómez Palacio, Durango, México. jose_dimaslopez@hotmail.com

² Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Centro Norte. Apartado Postal 196, 98000 Zacatecas, Zac., México.

³ Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10, Centro de Investigación y Graduados Agropecuarios. km 7.5 Carretera Torreón-San Pedro, Apartado Postal 3-F, 27000 Torreón, Coahuila, México.

($P > 0.05$). We concluded that different sources of organic fertilizers as well as the dosages used affect the expression of traits in transgenic cotton.

Index words: Endotoxin, orthogonal contrasts, protein synthesis.

INTRODUCCION

La Comarca Lagunera es una región donde existe una gran actividad pecuaria, cada año se producen 560 935 Mg de estiércol (Castellanos, 1982); esto plantea la posibilidad de su utilización en la agricultura. De acuerdo con el citado autor, 200 t de estiércol de bovino lechero pueden proporcionar, en promedio, 423 kg de N, y 2960 kg de N si la fuente es gallinaza.

En México, la agricultura orgánica se realiza en algunas áreas con cultivos específicos; el algodónero (*Gossypium hirsutum* L.) transgénico es uno de ellos. En la Comarca Lagunera, este cultivo es importante como productor de fibra y factor determinante en la generación de ingresos en todas las áreas relacionadas con la industria textil. En 1998, el cultivo del algodónero ocupó el tercer lugar en superficie cosechada con 17 759 ha y el primer lugar en valor de producción con 348 147 800 pesos mexicanos que equivalió a 38% del valor total de producción de los cultivos anuales de ciclo primavera-verano (P-V). Esta especie posee un gene que se obtiene de una bacteria llamada *Bacillus thuringiensis* (Bt), que produce una proteína (endotoxina) la cual es tóxica a las principales plagas del algodónero-complejo gusano bellotero y gusano rosado, por lo que no hay necesidad de hacer aplicaciones de insecticidas contra esas plagas (Gasser y Fraley, 1989; Gill *et al.*, 1992). Sin embargo, la producción de esta toxina depende de la fertilización nitrogenada (Carlson, 1990). Esta endotoxina es codificada por un gene mayor o de herencia simple, lo que significa que siempre se va a expresar. Por otro lado, la endotoxina es una proteína (Gill *et al.*, 1992) y como toda proteína, su síntesis y contenido depende de la edad de la planta (Greenplate *et al.*, 1998), es mayor su contenido durante las etapas fenológicas fisiológicamente activas que al final del ciclo del cultivo.

Por lo anterior, se considera que una deficiencia de nitrógeno se traduce en una baja producción de proteínas, incluida la endotoxina que codifica Bt y, por lo tanto, en un escaso control de insectos. Es

importante mencionar que el sistema actual de producción del algodón se caracteriza por hacer uso de una gran cantidad de insumos, agua, fertilizantes e insecticidas; la importancia entonces del algodónero transgénico radica en el hecho de que contribuye a que el sistema de producción del algodónero sea sustentable, al menos en la parcial o total reducción de la aplicación de insecticidas (McBride, 1998).

Por otro lado, el uso indiscriminado de los fertilizantes minerales ha tenido como consecuencia el deterioro de propiedades físicas, químicas y biológicas de muchos suelos, reducción en el contenido de materia orgánica, además de la obtención de productos agrícolas con cantidades excesivas de nitratos debido a las concentraciones altas de nitrógeno aplicadas en muchos casos (Castellanos *et al.*, 1996).

En la actualidad, la producción de cultivos ha disminuido de manera considerable en los últimos años. Una de las maneras de mejorar estas condiciones es añadirle al suelo nutrimentos en forma natural para incrementar la productividad, mediante la aplicación de abonos orgánicos (Santamaría *et al.*, 2001). Esto implica que la fertilización orgánica es considerada como una alternativa para reducir el uso de agroquímicos, entre ellos los fertilizantes (Romero *et al.*, 2000).

El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto del tipo y dosis de abono orgánico que induzca el mejor rendimiento y cantidad de proteína producida para el control de insectos plaga.

MATERIALES Y METODOS

Localización del Area Experimental

El trabajo se desarrolló en el verano de 1999 en el Campo Agrícola Experimental de la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango, ubicada en el km 30 de la carretera Gómez Palacio-Tlahualilo, en el ejido Venecia, municipio de Gómez Palacio, Durango, México.

Esta área se ubica entre los paralelos 24°22' y 26°23' N y los meridianos 102°00' y 104°47' O, con una altitud de 1110 m. Esta región conforma el distrito de riego No. 17 cuya superficie con cultivo es de 248 715 hectáreas, de las cuales 218 090 son regadas con agua de gravedad del río Nazas, y 30 625 con agua del subsuelo.

Características Climáticas

Según la clasificación de Köppen, modificada por García (1973), el clima es de tipo seco desértico con precipitación media anual de 242.8 mm, la temperatura media anual es de 20.9 °C. El lapso comprendido entre mayo y agosto es el más caluroso del año y los meses de diciembre y enero los más fríos. El promedio de heladas es de 24 en un año; la primera se presenta en noviembre o diciembre y la última en febrero o marzo con un periodo libre de heladas de abril a octubre, por lo cual se considera que la atmósfera de la región es relativamente seca.

Características Edáficas

En la Región Lagunera se reconocen once series de suelo (Ramírez, 1976) que derivan su nombre de la localidad donde primero se encontraron; las series de mayor importancia son: Coyote, San Ignacio, San Pedro, Concordia y la Santiago. La serie Coyote es la más importante en la región, tanto por la superficie que cubre (98 218 ha), como por sus características físico-químicas.

En importancia siguen a la serie Coyote, la Zaragoza (68 000 ha), San Pedro (65 000 ha), San Ignacio (56 000 ha) y Tlahualilo (20 000 ha); existen otras series cuya superficie no llega a 20 000 ha, como son Noé, Gómez Palacio, Concordia y Santiago (Martínez, 1997). Estos suelos varían en su textura desde arcillosa en la serie Zaragoza, migajón arcilloso en la Coyote, hasta migajón-arenoso y arenoso en la serie San Pedro. En consecuencia, ello incide en una variabilidad en la retención de agua y disponibilidad de nutrientes.

Conducción del Experimento

Siembra. La fecha de siembra fue el 16 de abril con una densidad de población de 87 500 plantas por hectárea. Se utilizó la variedad de algodón transgénico NuCOTN 35B. Se realizaron labores culturales acordes con lo recomendado por el Centro de Investigación Agrícola del Norte-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Laguna en la región para este cultivo.

Preparación del terreno. Se realizaron: barbecho, cruza, incorporación de estiércol, rastreo en seco,

formación de cama, pega de bordos, rastreo en húmedo.

Riego. Se aplicó un riego de presembrado en la última semana de marzo y se proporcionaron cuatro riegos de auxilio a 38, 64, 84 y 108 días después de la siembra.

Tratamientos. Los tratamientos fueron: dosis de fertilización nitrogenada de 164, 140, 120 y 80 kg, suplementado con estiércol de bovino y gallinaza, además una de 180 kg para este último abono, más el testigo (164 kg de N con base en fertilizante inorgánico); en total diez tratamientos (Cuadro 1).

Variables Evaluadas

Las variables evaluadas fueron: contenido de proteína (%) mediante la técnica de Kjeldahl, en cuadros y bellotas (%), daño en cuadros y bellotas por gusano rosado (*Pectinophora gossypiella*) y gusano bellotero (*Heliothis virescens* y *Heliothis zea*) (%), días a primeros cuadros (DPC), días a inicio de floración (DIF), días a primeras bellotas (DPB), peso de bellotas (PB), número de frutos (NF), número de nudos en el tallo principal (NNTP), altura de planta (AP), peso de capullos (PC) o producción de fibra (Rend).

Análisis Estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones para cada tratamiento. Adicionalmente, se realizaron una comparación de medias por contrastes ortogonales (Olivares, 1996), para evaluar diferencias entre los tratamientos orgánicos e inorgánico, y una prueba de medias (Duncan) para seleccionar el tratamiento y fuente de nitrógeno más eficiente.

Cuadro 1. Abono orgánico e inorgánico aplicado por tratamiento. Venecia, Durango, México, 1999.

Gallinaza		Bovino	
Tratamiento	Dosis	Tratamiento	Dosis
kg N ha ⁻¹	t ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	t ha ⁻¹
164 T1	11.08	80 T6	37
140 T2	9.45	120 T7	56
120 T3	8.10	140 T8	66
80 T4	5.40	164 T9	77
180 T5	12.16		
164 T10 [†]			

[†] Fertilización inorgánica con la dosis de 164-60-00, suplementada con urea y fosfato diamónico.

Cuadro 2. Contenido de proteína y rendimiento de fibra. Venecia, Durango, México. 1999.

		Gallinaza				Abono de bovino				Inorgánico
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	
Rendimiento de fibra (Mg ha ⁻¹)										
2.4	3.8	5.5	4.5	5.2	7.0	6.2	5.2	7.5	4.5	
2.3	2.1	2.6	4.7	3.5	4.8	5.5	5.5	8.5	6.0	
1.4	2.2	2.8	4.5	7.0	5.0	5.5	6.1	5.2	5.5	
Contenido de proteína (%)										
25.8	26.2	29.7	26.2	25.3	26.2	25.0	28.0	28.0	24.5	
27.1	25.3	30.1	28.4	27.1	25.3	25.3	27.7	26.2	27.5	
26.4	18.3	17.2	30.0	27.1	26.2	26.2	27.5	28.8	28.0	

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 2, se presentan los valores de las variables consideradas más importantes de acuerdo con el objetivo planteado, a partir de las cuales se efectuaron los análisis de varianza. Estos datos representan información de rendimiento a la cosecha y contenido de proteína al primer corte (40 días).

Componentes Fenológicos

En el Cuadro 3, se presenta el resumen del análisis de varianza de las variables (DPC, DIF, DPB, PB, NF, NNTP, AP, PC), los resultados mostraron diferencias en altura de planta (AP), ($P < 0.05$), días a inicio de floración (DIF), días a primeras bellotas (DPB), y peso de capullos (PC), ($P < 0.01$). Lo anterior indica respuesta diferente de la variedad a la dosis de fertilizante nitrogenada aplicada, lo cual señala que existen diferencias entre los componentes fenológicos.

Contenido de Proteína

Los resultados para este carácter (Cuadro 4) indican que el contenido de proteína (%) presentó un efecto similar en todos los tratamientos (igual respuesta). Esto demuestra que la dosis de nitrógeno que se aplicó en los diferentes tratamientos y tipos de

fertilizante fue lo suficiente para que la proteína tóxica codificada por el gene, proveniente de *Bacillus thuringiensis*, tuviera las condiciones para sintetizarse y produjera un valor adecuado para matar larvas de gusano rosado y bellotero. Lo anterior señala que, al no existir diferencia significativa, se tuvo los mismos efectos positivos en producción de proteína con los tratamientos de abono de bovino (T6-T9), gallinaza (T1-T5) y fertilización inorgánica (T10).

Daño por Gusano Rosado y Bellotero

En todos los tratamientos hubo ovoposición, eclosión, alimentación de terminales y entrada de larvas a las bellotas en formación, principalmente de gusano rosado (casi no hubo infestación de complejo bellotero); en ningún tratamiento hubo salida de larvas de último instar (L4), ya que las larvas morían en el instar L1. Un instar es un estadio o periodo de crecimiento donde el insecto entra en mudas sucesivas (Chapman, 1998), lo que indica una buena formación de proteína tóxica en la planta, lo que explica el buen control observado sobre las dos plagas y el cero daño al cultivo.

Se aprecia entonces que los tratamientos con fuente de nitrógeno orgánico (estiércol de bovino y gallinaza) y la fertilización inorgánica aportan el nitrógeno suficiente para la formación de la proteína y

Cuadro 3. Cuadrados medios para diferentes características agronómicas en algodónero transgénico (Bt), variedad NuCOTN 35B, evaluado en el campo experimental de la FAZ-UJED ciclo P-V. Venecia, Durango, México. 1999.

F.V.	DPC [†]	DIF	DPB	PB	NF	NNTP	AP	PC
Rep.	1.233	2.133	1.233	2.593	47.04	16.42	230.5	0.92
Tratamiento	1.941 ns	4.463**	3.985**	4.749 ns	107.3 ns	4.71 ns	354.2 *	5.15**
Error	1.085	1.096	0.641	4.811	47.5	2.65	139.4	1.09
C.V. (%)	2.70	1.83	1.23	26.49	26.65	8.53	11.96	16.14

* = $P < 0.05$, ** = $P < 0.01$, ns = no significativo.

[†] DPC = días a primeros cuadros, DIF = días a inicio de floración, DPB = días a primeras bellotas, PB = peso de bellotas, NF = número de frutos, NNTP = número de nudos en el tallo principal, AP = altura de planta, PC = peso de capullos.

Cuadro 4. Análisis de varianza para contenido de proteína y rendimiento, en función de tratamientos de fertilización inorgánica-orgánica. Venecia, Durango, México. 1999.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Pr > F
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)					
Tratamientos	9	64.12987000	7.12554111	5.99	0.0006**
Bloques	2	2.85536000	1.42768000	1.20	0.3244
Error	18	21.42924000	1.19051333		
Contenido de proteína (%) Primer corte					
Tratamientos	9	54.64800000	6.07200000	0.70	0.7022 ns
Bloques	2	10.82066667	5.41033333	0.62	0.5476
Error	18	156.38600000	8.68811111		

** diferencia significativa al menos entre dos tratamientos a $P < 0.01$. ns = no significancia.

R-cuadrada = 0.75; CV = 22.92.

producción de la endotoxina que favorece el control del complejo gusano rosado-bellotero. Estos resultados concuerdan con la no significancia obtenida en contenido de proteína (%).

Rendimiento (Producción de Fibra)

El análisis de varianza del Cuadro 4 muestra diferencia significativa entre los tratamientos de fertilización. Se observa, en el Cuadro 5, la comparación de medias (contrastes ortogonales) que señalan diferencia significativa ($P < 0.05$) entre el tratamiento de fertilización inorgánica (T10 = 164 kg) y los tratamientos con fuente de nitrógeno (gallinaza), que fueron de T1 a T5 con 164, 140, 120, 80 y 180 kg N ha⁻¹, respectivamente. En la tercera comparación también hubo diferencias significativas ($P < 0.01$) entre los tratamientos con fuente de nitrógeno gallinaza (T1, T2, T3, T4, T5) y los tratamientos con fuente de nitrógeno bovino (T6, T7, T8, T9). Existen diferencias significativas ($P < 0.01$) entre el Tratamiento 1 (gallinaza) y el Tratamiento 9 (bovino), con respecto de 164 kg. Diferencias significativas ($P < 0.05$) entre el Tratamiento 2

(gallinaza) y Tratamiento 8 (bovino), con respecto de 140 kg, no existiendo diferencias entre los contrastes realizados para los otros tratamientos a $P > 0.05$.

Estos resultados señalan que el tratamiento con fertilización inorgánica (164 kg) fue más eficiente en producción de fibra que la fertilización con fuente de nitrógeno gallinaza (T1 a T5) (Cuadro 6). No sucedió lo mismo entre los tratamientos de fertilización con bovino que gallinaza. En este caso fue más eficiente la fuente de bovino (T6 a T9). Lo anterior puede explicarse como un efecto positivo de la menor cantidad de sales que contiene el estiércol bovino en comparación con la gallinaza, y al proceso de la mineralización más lento en el estiércol bovino, debido al tipo de compuestos que posee (Castellanos *et al.*, 1996).

Estos resultados también coinciden con Magdoff (1978), quien indicó que estiércoles de distintas especies y contenido se descomponen en diferentes rangos de tiempo. Pratt *et al.* (1973) reforzaron lo anterior y señalaron que los desechos orgánicos se mineralizan de 50 a 60% en el primer año y la mineralización decrece en los años subsecuentes; este proceso dura aproximadamente cinco años y su efecto

Cuadro 5. Contrastes ortogonales para los tratamientos de fertilización inorgánica-orgánica en rendimiento de fibra. Venecia, Durango, México. 1999.

Contraste	GL	Contraste SC	Cuadrados medios	Valor F	Pr > F
T10 = T1 T2 T3 T4 T5	1	7.16844444	7.16844444	6.02	0.0245 *
T10 = T6 T7 T8 T9	1	1.11248167	1.11248167	0.93	0.3465 ns
T1 - T5 = T6 - T9	1	46.25926667	46.25926667	38.86	0.0001 **
T1 = T9	1	38.25375000	38.25375000	32.13	0.0001 **
T2 = T8	1	12.81881667	12.81881667	10.77	0.0041 *
T3 = T7	1	6.72041667	6.72041667	5.64	0.0288 ns
T4 = T6	1	1.55041667	1.55041667	1.30	0.2687 ns
T7 = T9	1	2.66666667	2.66666667	2.24	0.1518 ns

* = diferencia significativa $P < 0.05$, ** = altamente significativo $P < 0.01$, ns = no significativo.

Cuadro 6. Comparación de medias por Duncan para tratamientos de fertilización inorgánica-orgánica en rendimiento. Venecia, Durango, México. 1999.

	Medias*	Tratamiento
	t ha ⁻¹	
A	7.0833	9
B A	5.7500	7
B A C	5.6233	8
B A C	5.6000	6
B A C	5.3333	10
B A C	5.2500	5
B D C	4.5833	4
E D C	3.6333	3
E D	2.7000	2
E	2.0333	1

*medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes.

en el suelo se observa a partir del primer año de aplicación independiente del abono orgánico de que se trate.

Sin embargo, en este trabajo la gallinaza se mineralizó más rápido, lo que provocó que el N-NO₃⁻ se inmovilizara, lixiviara o desnitrificara (Bartolini, 1988; Lutens y Salazar, 2000), de tal forma, que el N-NO₃⁻ no estuvo presente en cantidades adecuadas durante las etapas críticas de desarrollo del cultivo. Esto coincide con Barber *et al.* (1992), quienes reportaron estudios en los que el mantener una alta proporción NH₄⁺/NO₃⁻ durante las etapas reproductivas, ciertos genotipos de maíz (*Zea mays* L.) tienen un mayor potencial de rendimiento.

En relación con el testigo (fertilización inorgánica), los tratamientos de estiércol bovino durante el ciclo proveyeron nutrimentos a la planta dándole la característica de superioridad sobre el fertilizante inorgánico. Los resultados incluidos en el Cuadro 6 corroboran que el Tratamiento 9 (164 kg) con fuente de nitrógeno bovino de 77 Mg ha⁻¹ presentó el mayor rendimiento (7.08 Mg ha⁻¹), seguido de los Tratamientos 7 y 8 (120 y 140 kg, y con fuente de estiércol de bovino de 56 y 66 Mg ha⁻¹, respectivamente, y rendimientos de 5.75 y 5.62 Mg ha⁻¹. Es importante destacar que este tratamiento de abono de bovino (T9) fue superior al tratamiento de fertilización inorgánica (T10) y al de gallinaza (T5) en 1.75 y 1.83 Mg ha⁻¹, respectivamente. Además, también debe considerarse que el Tratamiento 9 (164 kg) fue superior al rendimiento promedio en la región de 5 Mg ha⁻¹. Rendimiento de fibra que también se obtuvo con el Tratamiento 10 (fertilización inorgánica). Lo anterior vislumbra buenas

perspectivas para este cultivo en la región con el uso de abono orgánico de bovino.

Estos resultados son similares con lo mostrado en la Figura 1, en la cual se aprecia el mismo comportamiento; esto coincide parcialmente con los resultados obtenidos por Castellanos *et al.* (1996) en el sentido de que dosis bajas de estiércol aplicadas frecuentemente son más eficientes para incrementar rendimiento, que dosis altas aplicadas menos frecuentemente, ya que estos autores encontraron que dosis de 30 y 60 Mg ha⁻¹ produjeron rendimientos acumulados (cinco años) de 22 y 33% superiores al tratamiento testigo (sin abono orgánico).

Además, Romero (1989) mencionó que la dosis de aplicación de estiércoles y composta depende del tipo de suelo, cultivo y características del abono orgánico, y señaló que para maíz las dosis varían de 30 a 50 Mg ha⁻¹ para estiércol bovino y de 5 a 8 Mg ha⁻¹ para gallinaza. Estos resultados coinciden parcialmente con los de este trabajo en cuanto a las fuentes de bovino. Esto se asemeja también a lo reportado por Wade (1983), quien en cinco tratamientos con especies forrajeras (kudzu, pastos mulch de kudzu, mulch de pastos y fertilización inorgánica) encontró que la incorporación de abonos orgánicos y cubiertas (mulch) de Kudzu y pastos alcanzaron rendimientos de 90 y 81% en comparación con lo obtenido en tratamientos fertilizados.

Estos resultados son importantes si se considera que algunos productores aplican en ocasiones hasta 200 Mg ha⁻¹, las cuales si son de gallinaza significa que se aplican 2960 kg, mientras que si son de estiércol bovino sería igual a aplicar 423 kg (Castellanos, 1982), lo cual, además de ser un

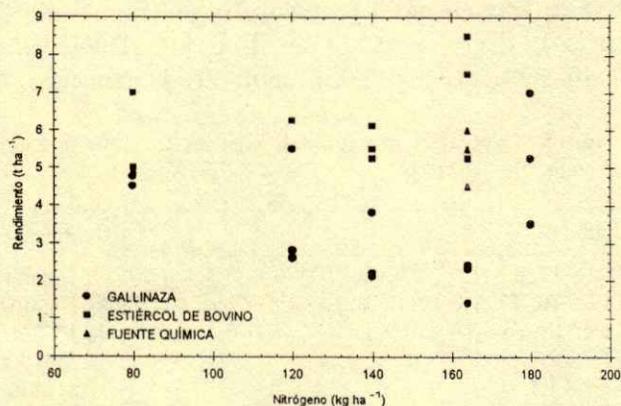


Figura 1. Rendimiento de fibra de algodón con tratamientos de fertilización inorgánica-orgánica. Venecia, Durango, México. 1999.

desperdicio de recursos, trae consigo disturbios al medio ambiente. Lo anterior también muestra que los abonos orgánicos son una alternativa para sustituir la fertilización inorgánica.

CONCLUSIONES

- Las fuentes de fertilizante, así como las dosis utilizadas, tienen un efecto diferente sobre la expresión de caracteres en algodón transgénico.
- Los tratamientos con fuente de nitrógeno (bovino) fueron mejores que los tratamientos con fuente de nitrógeno (gallinaza) y el fertilizante inorgánico, ya que fue en éstos donde se observaron los mejores rendimientos.
- La cantidad de 164 kg (77 Mg ha⁻¹) y de 120 kg (56 Mg ha⁻¹) con fuente de nitrógeno de estiércol de bovino (Tratamiento 9 y 7, respectivamente), pueden señalarse como las dosis adecuadas para rendimiento de fibra.

LITERATURA CITADA

- Barber, K.L., L.D. Maddux, D.E. Kissel, G.M. Pierzynski y B.R. Bock. 1992. Corn responses to ammonium and nitrate-nitrogen fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1166-1171.
- Bartolini, C. 1988. La fertilidad de los suelos. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Carlson, P.S. 1990. Biología de la productividad de los cultivos. AGT Editors. México, DF.
- Castellanos, J.Z. 1982. La utilización de los estiércoles en la Comarca Lagunera. Ingenieros Agrónomos del Tecnológico de Monterrey (IATEM). pp. 11-19. Torreón, Coahuila, México.
- Castellanos, J.Z., J.J. Marques O., J. Etchevers B., A. Aguilar S. y J.R. Salinas. 1996. Efecto a largo plazo de la aplicación de estiércol de ganado lechero sobre el rendimiento de forrajes y las propiedades del suelo en una región árida irrigada del norte de México. *Terra* 14: 151-158.
- Chapman, R.F. 1998. *The insects, structure and function*. 4th ed. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF.
- Gasser, C.S. y R.T. Fraley. 1989. Genetically engineering plants for crop improvement. *Science* 244: 1293-1299.
- Gill, S.S., E.A. Cowles y P.V. Pietrantonio. 1992. The mode of action of *Bacillus thuringiensis* endotoxins. *Annu. Rev. Entomol.* 37: 615-636.
- Greenplate, J.T., G.P. Head, S.R. Peen y V.T. Kabuye. 1998. Factors potentially influencing the survival of *Helicoverpa zea* on bollgard cotton. *Proceedings Beltwide Cotton Conferences*. National Cotton Council of America. Memphis, TN.
- Luters, A. y P.J.C. Salazar L. 2000. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Instituto de Suelos CRN-CNIA-INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Magdoff, F.R. 1978. Influence of manure application rates and continuous corn on soil-N. *Agron. J.* 70: 629-632.
- Martínez R., E. 1997. Comportamiento de un suelo Xerosol háplico ante la acción de los implementos de labranza. *Disertación Doctoral*. Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, Nuevo León, México.
- McBride, M. 1998. *Genética en el jardín*. Discover United Editors de México. México, DF.
- Olivares, S.E. 1996. Diseños experimentales con aplicación a la experimentación agrícola y pecuaria. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, Nuevo León, México.
- Pratt, P.F., F.E. Broadbert y J.P. Martin. 1973. Using organic wastes as nitrogen fertilizer. *Calif. Agric.* 27: 10-13.
- Ramírez, C.J. 1976. Características generales de las series de suelos en la Región Lagunera (Coahuila-Durango). Secretaría de Recursos Hidráulicos. Distrito de Riego 17. Torreón, Coahuila, México.
- Romero F., E. 1989. Efecto de los estiércoles sobre la calidad del agua y del suelo. p. 270. Volumen 6(12). *Seminarios Técnicos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos*. Torreón, Coahuila, México.
- Romero L., María del R., A. Trinidad S., R. García E. y R. Ferrera C. 2000. Producción de papa y biomasa microbiana en suelo con abonos orgánicos y minerales. *Agrociencia* 3: 261-269.
- Santamaría, R.S., R. Ferrera C., J.J. Almaraz S., A. Galvis S. e I. Barois B. 2001. Dinámica y relaciones de microorganismos, C-orgánico y N-total durante el composteo y vermicomposteo. *Agrociencia* 4: 377-384.
- Wade, M.K. 1983. Mulching and green manure applications for continuous crop production in the Amazon basin. *Agron. J.* 75: 39-45.

APLICACION DE LAVADO Y ESTIERCOL PARA RECUPERAR SUELOS SALINOS EN LA COMARCA LAGUNERA, MEXICO

Leaching and Manure Treatments to Reclaim Salty Soils in Comarca Lagunera, Mexico

Raúl Serrato Sánchez¹, Alvaro Ortíz Arellano², José Dimas López¹
y Salvador Berúmen Padilla¹

RESUMEN

La superficie irrigable en la Comarca Lagunera es de aproximadamente 150 000 ha, de las cuales más de 12% están afectadas en diversos grados por salinidad o sodicidad. Un caso es el de las tierras del norte del municipio de Gómez Palacio, Durango, donde se realizó este estudio con el objetivo de evaluar la recuperación de suelos salinos mediante la aplicación separada de varios niveles de láminas de agua y distintas dosis de materia orgánica, utilizando como referencia la producción de zacate ryegrass anual (*Lolium multiflorum* Lam.). La investigación comprendió dos experimentos en forma independiente: en el primero, se aplicó lavado de suelo con 0.9, 1.2 y 1.5 m de lámina de agua con 0 lámina de agua como testigo y, en el segundo, se aplicaron cantidades de estiércol de bovino: 20, 40, y 60 Mg ha⁻¹ con 0 estiércol como testigo. El diseño experimental utilizado fue un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. En cada tratamiento, se determinó la producción de materia seca, tomando muestras de 0.25 m² al centro de la parcela. La relación beneficio-costos se obtuvo para cada tratamiento. La producción de materia seca, para los tratamientos de lavado, mostró diferencia no significativa y sólo en el testigo se encontró una relación beneficio-costos positiva. A la aplicación de 60 Mg ha⁻¹ de estiércol correspondió el rendimiento más alto (11.0 Mg ha⁻¹) y la mayor recuperación económica, aunque no hubo diferencia significativa entre tratamientos y testigo.

Palabras clave: Lámina de riego, materia orgánica, zacate ryegrass anual, *Lolium multiflorum*.

SUMMARY

Twelve percent of the 150 000 ha of irrigated land in the Comarca Lagunera is affected by different levels of salinity and sodicity. Such is the case of the north of Gomez Palacio, Durango, Mexico, where this study was conducted. The objective of this experiment was to evaluate reclamation of saline soils by using different leaching levels or organic matter. Ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) was the reference crop. This study was conducted in an area located at 18.5 km north of Gomez Palacio, Dgo., where alfalfa and corn yields range from 20 to 40% below the regional yield average. This research consisted of two independent experiments. The first consisted of the application of leaching with 0, 0.9, 1.2, and 1.5 m lamina of water, with 0 water as a control, and the second of amendments of manure using 0, 20, 40, and 60 Mg ha⁻¹, with 0 manure as a control. Manure was incorporated to the soil at a depth of 30 cm. A complete randomized block design with four replications was used for statistical analysis. Ryegrass was established and managed as recommended by BANRURAL (1979). To evaluate yield of dry matter, samples were taken within a circle with a diameter of 0.25 m diameter at the center of the plot. The dry matter of three sampling dates were added to obtain total yield that was used for statistical analysis. Economic analysis was performed to determine benefit-cost ratio. Dry matter yield of leaching treatments was higher than control, but only the control had a positive benefit-cost ratio. All leaching treatments, using water from the irrigation district, had higher benefit than cost. With the manure as soil amendment, both dry matter yield and benefit-cost ratio were greater than 1 for all treatments. However, the treatment of 60 Mg ha⁻¹ of manure resulted in the highest yield (11.0 Mg ha⁻¹) and the highest investment recovery, even though no statistical

¹ Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango. (rserrras@yahoo.com)

² Dirección General de Enseñanza Tecnológica Agropecuaria. Torreón, Coahuila, México.

difference for dry matter production between treatments and control was detected.

Index words: Depth of applied water, organic matter, ryegrass, *Lolium multiflorum*.

INTRODUCCION

Las áreas de suelo afectadas por problemas de sales y sodio están ampliamente distribuidas en el mundo, pero cobran mayor importancia, para el hombre, en aquellas superficies de las zonas áridas y semiáridas que se han abierto a la agricultura intensiva (Russo, 1985; Crescimanno *et al.*, 1995).

En México, el problema de la salinidad se presenta fundamentalmente en las zonas áridas con riego y a lo largo de la costa. Los lugares donde se observa con más frecuencia son las cuencas cerradas que, a través de miles de años, han acumulado paulatinamente sales en el perfil del suelo. Se estima que la superficie afectada es del orden de 1 millón de ha (Fernández, 1990).

La superficie irrigable en la Comarca Lagunera es de aproximadamente 150 000 ha de las cuales más de 12% están afectadas en diversos grados por sales o sodio, ya que en ella convergen: presencia de material aluvial original rico en sales, uso de agua de riego de mala calidad que aportan una gran cantidad de sales, uso de suelos arcillosos sensibles al ensaltramiento y fuerte intensidad de explotación de agua y suelo durante todo el año (Cepeda, 1985).

Para recuperar los suelos con problemas de sales o sodio intercambiable existen los siguientes métodos: físico: lo constituyen el barbecho profundo, el subsuelo y la adición de arena o inversión del perfil; biológico: consiste en incorporar estiércol, abonos verdes y establecimiento de cultivos tolerantes a las sales; eléctrico: se logra haciendo pasar una corriente directa a un volumen dado de suelo; hidrotécnico: o sea, el lavado y el drenaje; y químico: se basa en el intercambio de sodio por calcio mediante el uso de las sales cálcicas de alta solubilidad, así como de ácidos y sustancias formadas de ácido, cuando el suelo contiene calcio en forma precipitada (Aceves, 1976).

El método más utilizado para la recuperación de suelos salinos es el lavado o la lixiviación de las sales solubles con agua de baja salinidad; este método consiste básicamente en aplicar una lámina grande de agua para disolver las sales y removerlas de la zona radical del cultivo. Aunque para lavar un suelo salino es indispensable que éste sea permeable y que exista

una salida para el agua de drenaje, pero también la tolerancia del cultivo a establecer es importante (Keren y Miyamoto, 1990).

Aceves (1979) mencionó que el método hidrotécnico consiste en manejar la cantidad y calidad química de las aguas disponibles para mantener las sales solubles y las intercambiables a un nivel que no afecten, directa o indirectamente, el desarrollo de los cultivos y, según Richards (1980), es el procedimiento más efectivo para eliminar el exceso de sales solubles del suelo.

En un estudio realizado con láminas de agua (LA) de 30, 60 y 80 cm para medir el incremento en la producción de maíz, el aumento en la eficiencia del N y la disminución en la pérdida de NO_3 , Drury *et al.* (1997) encontraron que la mayor pérdida de NO_3 se dio a la menor LA (30 cm), pero se vio reducida en 54% con 60 cm de LA y aun fue menor con 80 cm. Sin embargo, la producción de maíz fue mayor al aplicar 60 cm de LA considerando que 80 cm de LA produjo estrés en la planta que limitó su crecimiento. A pesar de que estos autores hicieron este trabajo en laboratorio y fueron conscientes de que en el campo existen condiciones que no se pueden controlar, sugirieron que esa información puede usarse para seleccionar tratamientos clave para posteriores estudios en el campo.

González *et al.* (1985) realizaron un experimento en columnas de suelo para obtener las láminas de lavado adecuadas para suelos de textura ligera, media y pesada, con diferentes tipos de salinidad. Encontraron que para un suelo de textura media, la lámina de lavado por esta metodología de columnas fue de 62 cm, independientemente del tipo de salinidad presente.

Dado que el estiércol contiene grandes cantidades de compuestos orgánicos de fácil descomposición, la adición de estiércol al suelo casi siempre resulta en un aumento en la actividad biológica. En general, esto incrementa la disponibilidad de muchos nutrientes para las plantas, así como la velocidad de infiltración, la conductividad hidráulica y la retención de agua en tanto que la densidad aparente se disminuye (Castellanos, 1985).

Castellanos *et al.* (1996) realizaron un estudio para observar el efecto de la aplicación de estiércol de ganado lechero sobre la producción de forraje de ryegrass anual (*Lolium multiflorum* Lam.) y de maíz forrajero sobre las propiedades de un suelo migajón arcilloso del norte de México. Los tratamientos fueron: 30, 60, y 120 Mg ha⁻¹ año⁻¹, y una sola dosis

de 240 Mg ha⁻¹ en 1981. El ryegrass anual se estableció durante el invierno y maíz forrajero durante el verano. Encontraron que la producción de ryegrass para los tratamientos de 30 y 60 Mg ha⁻¹ año⁻¹ fueron 22 y 33% más altos, respectivamente, que la no-aplicación de estiércol. Estos autores concluyeron que la aplicación de estiércol tuvo efectos significativos positivos sobre el rendimiento de ryegrass anual durante todos los años y cortes, pero sólo durante algunos años en el maíz.

El predio en el cual se realizó este trabajo de investigación cuenta con 95 ha que tradicionalmente se siembran con alfalfa (*Medicago sativa* L.), maíz forrajero (*Zea mays* L.), avena (*Avena fatua* L.) y zacate ryegrass anual (*Lolium multiflorum* Lam.), cuyos registros de producción indican producciones que varían de 20 a 40% por debajo de la media regional que es de 13 Mg año⁻¹ de materia seca (CIAN, 1994). Los propietarios culpan de ello al tipo de suelo presente, en el cual afloran visiblemente, en algunas partes más que en otras, sales.

Hasta ahora, la estrategia que han implementado los dueños es no sembrar en las partes más dañadas por lo que se permitió establecer el presente experimento en esos terrenos con el objetivo de investigar su recuperación mediante la aplicación separada de varios niveles de láminas de agua y distintas dosis de materia orgánica, utilizando como referencia la producción de zacate ryegrass anual.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo se llevó a cabo en un predio que se localiza a 18.5 km al norte de Gómez Palacio, por la carretera hacia Bermejillo, Durango. Las coordenadas son: 25° 47' 21" N y 103° 32' 54" O (SPP, 1978). El clima es del tipo Bwhw(e); esto es: seco, árido y semicálido (CETENAL-UNAM, 1970). La temperatura máxima promedio en los meses del estudio fue de 31.6 °C, la temperatura mínima promedio fue de 15.7 °C y la temperatura media de 23.65 °C. La precipitación total fue de 93 mm.

De acuerdo con la carta edafológica (INEGI, 1971), los suelos del predio en estudio corresponden a los Typic natrargid (Soil Survey Staff, 1998), con profundidad mayor que 1.2 m. El pH oscila entre 7.69 y 8.28. El porcentaje de materia orgánica está entre 1.31 y 1.65 y se clasifica en medianamente pobre. Tiene 7.14% de carbonatos totales (CO₃). Cuenta con una conductividad eléctrica de 4.09 a 5.67 dS m⁻¹ por lo que, de acuerdo con Aceves (1976) y Castellanos et

al. (2000), se clasifica como salino. Cuenta con una capacidad de intercambio catiónico de 21.85 cmol y un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) menor que 13.22%.

Para tener una referencia más actual, se realizaron análisis químicos del agua de riego y del estiércol, provenientes ambos del pozo profundo y del establo lechero de la granja en estudio, en el laboratorio de la Cooperativa Agropecuaria de la Comarca Lagunera. También se realizaron análisis físico y químico del suelo antes y después de aplicados los tratamientos, así como del agua de gravedad proveniente del Río Nazas, en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

La investigación se desarrolló de mayo de 1998 a junio de 1999. Comprendió dos experimentos en forma independiente: Experimento 1, se aplicó lavado de suelo con 0.9, 1.2, y 1.5 m de lámina de riego, con 0 m de lámina de agua como testigo; y Experimento 2, se aplicaron tres dosis de estiércol de bovino lechero: 20, 40, y 60 Mg ha⁻¹, con 0 Mg ha⁻¹ de estiércol como testigo. Cinco meses antes de la siembra, el estiércol se incorporó al suelo con una rastra de discos.

En este trabajo, debido a la incredulidad de los productores sobre la bondad de los tratamientos aplicados, se prefirió usar, como referencia, la producción de materia seca del zacate ryegrass anual en lugar de los cambios en el suelo de: textura, estructura, pH, MO y CIC, mencionados por Primo y Carrasco (1987). Zacate ryegrass anual es una especie que presenta un intervalo amplio de adaptación a los suelos, siendo tolerante a suelos ácidos y alcalinos (pH de 5.0 a 7.8; Oregon State University, 1999), además de ser considerado, nutricionalmente, como uno de los mejores zacates para la alimentación de ganado bovino (Minson, 1990).

Para el Experimento 1, el tamaño de las parcelas fue de 10 x 10 m, con una separación entre ellas de 1 m. Se cavó una zanja de aproximadamente 1.5 m de profundidad inmediatamente al lado del lote experimental para observar la presencia de agua percolada. En mayo, se aplicaron las láminas de agua en cantidades sucesivas de 0.3 m cada una con un intervalo de 15 días hasta completar el tratamiento respectivo, esperando cumplir el objetivo de lavar el suelo antes de la siembra.

Para el Experimento 2, el tamaño de las parcelas fue de 3 x 3 m con 1 m de separación entre parcelas.

El arreglo de las parcelas fue de acuerdo con el diseño bloques al azar, con cuatro repeticiones.

Para validar los tratamientos se usó el programa de manejo recomendado por el BANRURAL (BANRURAL, 1979). La preparación del terreno consistió en barbecho, a una profundidad de 0.3 m, rastreo con rastra doble y trazo de riego construyendo los bordos con 0.5 m de altura. Se sembró dentro del período óptimo recomendado que es del 15 de septiembre al 31 de octubre. Se usó la cantidad recomendada de 30 kg de semilla ha⁻¹. Se sembró en plano, en seco, con sembradora triguera a una profundidad de siembra de 0.1 a 0.15 m. Se usó la variedad Oregon común. Se aplicaron 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ más 40 kg de N a la siembra y, en la etapa productiva, 60 kg de N entre cortes. Se regó para sembrar a tierra venida y, posteriormente, se dio un riego entre cortes con una lámina promedio de 0.15 m por riego. Se siguió la recomendación de hacer el primer corte 70 días después de la siembra y dejar 25 a 30 días de intervalo entre cortes.

La producción en cada lote se cuantificó mediante el corte de una muestra circular de 0.25 m² en el centro de la parcela. Esto se repitió tres veces y la suma de estos tres cortes se utilizó para hacer el análisis estadístico de los datos con el paquete de diseños experimentales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Olivares, 1994).

Para todos los tratamientos, en ambos experimentos, se obtuvo la relación beneficio-costos (Anderson, 1981).

RESULTADOS Y DISCUSION

La conductividad eléctrica (CE) del agua de riego usada (3.18 dS m⁻¹), según las directrices de Ayers y Westcot (1987), no tiene restricción para ser usada en los cultivos del predio en estudio aunque la cantidad de sólidos totales presentes en la muestra (2985 mg L⁻¹) es superior a 2000 mg L⁻¹ que estos mismos investigadores señalaron para una restricción de uso severo (Cuadro 1). Resultados similares se encontraron en el análisis del agua de riego en el cual, incluso, la CE fue menor (0.54 dS m⁻¹) (Cuadro 2).

El análisis químico del estiércol usado permitió conocer la cantidad de nutrimentos principales y de sales solubles que se incorporaron al suelo (Cuadro 3). En general, el contenido de N y P estuvo dentro del promedio encontrado por Castellanos (1987), aunque el contenido de ceniza, tomado como indicador de la calidad del estiércol, fue menor que el mínimo señalado por este autor, quizás porque el estiércol usado en esta investigación se tomó cuando aun no

Cuadro 1. Análisis del agua de riego usada en el lavado del suelo de la Granja Hidalgo, municipio de Gómez Palacio, Durango. (Laboratorio Agropecuario Regional de la Comarca Lagunera). 1998.

Descripción [†]	Unidad	Cantidad	Parámetro [‡]
pH		7.37	6.5-8.5
CE	dS m ⁻¹	3.18	
Ca	meq L ⁻¹	13.31	200
Mg	meq L ⁻¹	6.72	125
Na	meq L ⁻¹	13.6	1000
K	meq L ⁻¹	0.16	
RAS	(meq L ⁻¹) ^{1/2}	4.29	
CO ₃	meq L ⁻¹	0.0	
HCO ₃	meq L ⁻¹	4.14	
Cl	meq L ⁻¹	3.41	250
SO ₄	meq L ⁻¹	23.67	500
NO ₃	mg L ⁻¹	0.18	
Dureza total	mg L ⁻¹	1001.5	500
Alcalinidad total	mg L ⁻¹	207.0	400
Sólidos totales	mg L ⁻¹	2985.0	1000

[†]CE = conductividad eléctrica. RAS = relación de adsorción de sodio.

[‡]Máximo permitido por la norma oficial mexicana: NOM-127-SSA1-1994, en mg L⁻¹.

presentaba signos muy visibles de descomposición por la acción microbiana.

Experimento 1: Lavado del Suelo

En general, la concentración de nutrimentos en el suelo antes y después de aplicar los tratamientos de lavado del suelo no tuvo cambios que presentaran alguna lógica. Sin embargo, se resalta el comportamiento del pH y de la CE que aumentaron

Cuadro 2. Análisis del agua de gravedad proveniente del río Nazas. Comarca Lagunera. 1998.

Descripción [†]	Unidades	Cantidad	Clasificación
pH		7.54	6.5-8.5
CE	dS m ⁻¹	0.54	
Ca	meq L ⁻¹	3.4	
Mg	meq L ⁻¹	2.0	
Na	meq L ⁻¹	0.36	
K	meq L ⁻¹	0.0	
RAS	(meq L ⁻¹) ^{1/2}	0.21	
CO ₃	meq L ⁻¹	0.0	
HCO ₃	meq L ⁻¹	4.8	
Cl	meq L ⁻¹	0.88	
SO ₄	meq L ⁻¹	2.3	
CSR	meq L ⁻¹	0.6	Buena clase
PSP	meq L ⁻¹	14.93	Buena clase
Salinidad efectiva	meq L ⁻¹	2.41	Buena clase
Salinidad potencial	meq L ⁻¹	2.03	Buena clase

[†]CE = conductividad eléctrica. RAS = relación de adsorción de sodio. CSR = contenido de sodio residual. PSP = porcentaje de sodio posible.

Cuadro 3. Análisis químico del estiércol de bovino lechero de la Granja Hidalgo, municipio de Gómez Palacio, Durango, 1998.

N	P	K	Ca	Mg	Na	Sales solubles	Relación C/N	Ceniza
----- kg Mg ⁻¹ -----								
1.69	0.48	3.8	3.72	0.65	0.58	6.0	16	35.4

ligeramente en cada uno de los tratamientos (Cuadro 4). El contenido de NO₃ se disminuyó principalmente con el lavado de menor lámina de agua (40.0 a 10.0 meq L⁻¹), lo cual coincide con los resultados encontrados por Drury *et al.* (1997) al probar tratamientos de 30, 60 y 80 cm de lavado de suelo.

El análisis de varianza de la producción de zacate ryegrass anual con diferentes láminas de riego no indicó diferencia significativa entre tratamientos (Cuadro 5), por lo que se realizó un análisis económico para obtener la relación beneficio-costo de cada tratamiento.

La mayor producción de materia seca (11.23 Mg ha⁻¹) se obtuvo con la aplicación de 1.5 m de lámina de agua, seguida por 10.48 Mg ha⁻¹ obtenida al aplicar 0.9 m de agua y por 10.31 Mg ha⁻¹ resultante de aplicar 1.2 m de agua. La producción de materia seca más baja (8.4 Mg ha⁻¹) se observó en el testigo, o sea, sin aplicación de lavado del suelo (Cuadro 5).

Para la Comarca Lagunera, el CIAN (1994) reportó un promedio de producción de 13 Mg ha⁻¹ en ryegrass anual; sin embargo, en este estudio, la mejor producción no alcanzó ese promedio, quizás porque el

pH del suelo no bajó al rango de 5.5 a 7.5 en que ocurre el mejor crecimiento de ese zacate (Oregon State University, 1999).

A pesar de que el mayor rendimiento total obtenido en esta investigación fue menor que el reportado por Quiroga y Farías (16.87 Mg ha⁻¹) en 1994, esta cifra se considera aceptable por que estos autores reportaron cuatro cortes al ryegrass anual con un promedio de 3.73 Mg ha⁻¹ por corte y en este trabajo se obtuvieron 3.7 Mg ha⁻¹ en promedio de los tres cortes (Cuadro 5).

El mejoramiento en la producción con el lavado de suelo pudo deberse a que se incrementó la humedad disponible para la planta y un desplazamiento de las sales hacia abajo, lo que disminuyó la presión osmótica del suelo y permitió a la planta un mejor aprovechamiento de agua y nutrientes (Aceves, 1979).

La mayor producción obtenida en ryegrass con la mayor lámina de riego concuerda con los resultados obtenidos por Drury *et al.* (1997); aunque estos autores trabajaron con maíz, los tratamientos aplicados fueron menores (30, 60 y 80 cm de lámina de agua) y las condiciones completamente controladas.

Cuadro 4. Análisis químico y del suelo de la Granja Hidalgo, municipio de Gómez Palacio, Durango, antes y después de aplicar los tratamientos de lavado. 1998.

Nutrimiento	Lavado antes de tratamientos			Lavado después de tratamientos			Testigo
	----- m -----			----- m -----			
	0.9	1.2	1.5	0.9	1.2	1.5	
pH	7.61	7.97	8.03	8.18	8.18	8.24	8.04
MO [†]	1.44	1.38	1.38	1.38	1.51	1.72	1.51
CO ₃ insoluble	7.32	7.15	7.32	5.81	5.97	5.5	6.79
CE [‡]	4.1	4.47	5.67	4.74	4.97	6.42	4.31
Ca	12.0	18.0	19.6	28.4	24.4	25.2	18.0
Mg	4.8	3.2	10.4	8.0	5.6	9.2	2.8
Na	37.4	41.0	49.3	38.7	35.6	32.3	36.8
K	1.0	0.8	1.17	1.3	1.2	1.5	1.2
CO ₃	0	1.2	2.0	0	0	0	1.2
HCO ₃	8.4	5.6	5.2	5.2	4.0	12.4	5.2
SO ₄	40.8	37.8	44.4	52.8	61.2	64.0	38.8
Cl	4.7	8.5	5.1	4.4	3.4	10.6	4.7
NO ₃	40.0	23.5	31.0	10	21.9	13.0	38.0
P	5.5	4.0	5.5	6.0	4.2	5.3	4.5

[†]MO = materia orgánica. [‡]CE = conductividad eléctrica.

Cuadro 5. Rendimiento de materia seca (Mg ha^{-1}) en suelos lavados con diferentes láminas de agua. Comarca Lagunera. 1998-1999.

Tratamiento	Lámina de agua	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Total	Promedio	R B-C (1) [†]	R B-C (2)
	m							
3	1.5	2.0	4.5	4.6	11.1	3.7 a [†]	0.8	1.4
2	1.2	2.2	3.7	4.4	10.3	3.4 a	0.7	1.3
1	0.9	1.9	3.7	4.8	10.4	3.4 a	0.9	1.3
Testigo	0	1.8	3.5	3.1	8.4	2.8 a	1.2	1.2
CV = 33.16%								

[†] Letras iguales indican diferencia no significativa.

[†] R B-C (1) = Relación beneficio-costos con agua de bombeo. R B-C (2) = Relación beneficio-costos con agua de gravedad.

Caballero *et al.* (2001) establecieron que cuando el agua aplicada se incrementa y la humedad del suelo excede la capacidad de campo, el drenaje y el escurrimiento de las sales se inician, por lo que en este trabajo se esperaba que hubiera percolación en alguno de los tratamientos, pero esto no sucedió, quizás, por falta de pendiente, poca profundidad del drenaje construido, alta permeabilidad o suelo muy profundo lo que no permitió el drenaje horizontal. En este aspecto no hubo coincidencia con lo encontrado por Drury *et al.* (1997) quienes observaron escurrimiento de agua a 30 cm de lámina aplicada.

Debido a que en el lavado del suelo se usó agua de bombeo, la relación beneficio-costos fue menor que 1 en todos los tratamientos, salvo el testigo (Cuadro 5). Con esto se confirma lo expuesto por Jameson *et al.* (1974), quienes sugirieron que en investigaciones donde se plantea la introducción de cambios, siempre debe existir un tratamiento que signifique "no hacer nada nuevo", ya que en ocasiones, como la del presente trabajo, es mejor no aplicar ningún tratamiento. Los elevados costos de producción obtenidos con el uso de agua de bombeo en este trabajo fueron similares a los que se presentan en otros distritos de riego del mundo donde se impulsa a los agricultores a buscar otras alternativas más baratas, como el uso de riego superficial o de aguas negras (Mace y Amrhein, 2001).

Sin embargo, de acuerdo con Aceves (1979), el lavado de los suelos puede ser una alternativa aceptable en aquellos lugares donde se cuente con agua de gravedad, la cual puede tener un costo hasta seis veces menor que el agua de bombeo. En este trabajo la relación beneficio-costos fue mayor que 1 en todos los tratamientos (Cuadro 5) cuando se consideraron los costos del agua proveniente del río Nazas.

Experimento 2: Aplicación de Estiércol Vacuno

La concentración de nutrientes en el suelo en estudio antes y después de aplicar los tratamientos de estiércol, en general, aumentó, aunque en el caso del Mg sucedió lo contrario en todos los niveles de estiércol. NO_3 fue el nutriente que aumentó su concentración con la aplicación de estiércol, aunque fue más notable con la dosis de 20 Mg ha^{-1} (Cuadro 6).

Con la aplicación de 60 Mg ha^{-1} de estiércol se obtuvieron 11.0 Mg ha^{-1} de materia seca de ryegrass anual en tres cortes, en tanto que con la aplicación de 40 Mg ha^{-1} de estiércol la producción de materia seca fue de 10.1 Mg ha^{-1} . Con 20 Mg ha^{-1} de estiércol de bovino lechero la producción total de materia seca fue de 9.3 Mg ha^{-1} y, finalmente, al no aplicar ninguna cantidad de estiércol de bovino lechero se obtuvo la producción de materia seca de ryegrass anual más baja de 8.8 Mg ha^{-1} (Cuadro 7).

El incremento obtenido en la producción de materia seca del ryegrass anual a medida que se aumentó la cantidad aplicada de estiércol de bovino lechero fue un reflejo del mejoramiento de las propiedades del suelo, pues de acuerdo con Díaz *et al.* (1993), la principal utilidad de la incorporación de materia orgánica en suelos agrícolas está en el mejoramiento de la estructura del suelo. Además, con el estiércol se añadieron al suelo diversas cantidades de nutrientes (Cuadro 6) que mejoraron la fertilidad del suelo.

Paul y Clark (1989) explicaron que en el proceso de descomposición de la MO, los microorganismos del suelo liberan CO_2 , el cual, al combinarse con el agua, forma ácido carbónico que puede hacer solubles a sales de calcio precipitadas en el suelo; además, esos abonos orgánicos juegan un papel muy importante en la oxidación y reducción de los elementos esenciales

Cuadro 6. Análisis químico del suelo de la Granja Hidalgo, municipio de Gómez Palacio, Durango, antes y después de aplicados los tratamientos de estiércol. 1998.

Nutrimento	Antes de aplicación de estiércol			Después de aplicación de estiércol			Testigo
	Mg ha ⁻¹						
pH	20	40	60	20	40	60	8.04
MO [†]	7.87	7.97	8.1	8.18	8.17	8.21	1.51
CO ₃ insoluble	1.51	1.65	1.38	2.07	2.65	2.2	6.79
CE [‡]	7.15	1.5	6.19	4.87	4.55	5.5	4.31
Ca	4.3	4.59	4.69	5.11	4.97	5.79	18.0
Mg	16.4	17.6	18.4	27.2	23.6	26.4	2.8
Na	12.4	13.2	11.2	7.2	6.4	8.0	36.8
K	35.3	35.4	29.91	43.6	35.6	26.0	1.2
CO ₃	1.1	0.8	1.1	1.9	1.5	2.6	5.2
HCO ₃	0	0.8	1.2	0	0	0	38.8
SO ₄	5.2	5.6	5.6	17.2	5.2	2.6	4.7
Cl	44.4	42.4	40.0	52.8	61.2	65.8	38.0
NO ₃	6.4	7.5	5.4	14.7	3.4	8.2	4.5
P	26.5	9.5	56.0	62.0	11.0	44.5	
	3.7	10.0	8.5	3.9	10.2	8.9	

[†] MO = materia orgánica. [‡] CE = conductividad eléctrica.

haciéndolos más aprovechables por las plantas. Estos principios se manifestaron en estos resultados, obteniendo mayor producción de forraje a mayor cantidad de estiércol aplicado al suelo.

Estos resultados también están de acuerdo con los reportados por Meek *et al.* (1982), quienes encontraron que el incremento de materia orgánica en el suelo por la aplicación de estiércol en las regiones áridas se asoció al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo.

La aplicación de 60 Mg ha⁻¹ de estiércol de bovino lechero tuvo una producción mayor que 2.2 Mg ha⁻¹ comparada con el testigo (Cuadro 7), lo cual concuerda con lo obtenido por Castellanos *et al.* (1996), quienes realizaron, de 1981 a 1987, un trabajo el cual consistió en cuatro tratamientos con aplicación de estiércol de bovino lechero en dosis de 0, 30, 60, 120 y 240 Mg ha⁻¹ año⁻¹, en un suelo similar al del presente estudio. Estos autores reportaron que con la aplicación de 60 Mg ha⁻¹ en el primer año obtuvieron 12.7 Mg ha⁻¹ de materia seca, cantidad muy parecida a

la obtenida en esta investigación con la aplicación de la misma cantidad de estiércol (11.7 Mg ha⁻¹ con 60 Mg ha⁻¹), lo cual es indicativo de que el suelo está en proceso de recuperación.

La relación beneficio-costo es positiva en todos los tratamientos (Cuadro 7), incluso se esperaría que, debido a la degradación paulatina del estiércol en el suelo, la producción de los cultivos que posteriormente sean establecidos sea mayor, con lo que la recuperación económica sería mayor.

Los resultados aquí obtenidos indican la importancia de aplicar cualquiera de los dos tratamientos, ya sea lavado de suelo o aplicación de estiércol de bovino lechero para mejorar la producción de los cultivos establecidos en suelos salinos. Sin embargo, por la disponibilidad de estiércol y la facilidad que representa aplicarlo, se recomendaría el uso de esta práctica, pero con el cuidado de no sobrepasar 60 Mg ha⁻¹ para no provocar problemas posteriores con las sales y nitratos que ese material contiene.

Cuadro 7. Rendimiento total de materia seca (Mg ha⁻¹) obtenido con aplicación de diferentes dosis de estiércol de bovino lechero. Comarca Lagunera. 1998-99.

Tratamiento	Estiércol	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Total	Promedio	R B-C [†]
	Mg ha ⁻¹						
3	60	2.4	4.1	4.5	11.0	3.6 a	1.39
2	40	2.3	3.8	4.0	10.1	3.3 a	1.31
1	20	2.1	3.5	3.6	9.3	3.1 a	1.22
Testigo	0	2.2	3.4	3.1	8.8	2.9 a	1.28
CV = 21.11%							

a = Letras iguales indican diferencia no significativa. [†] Relación beneficio-costo.

CONCLUSIONES

- La producción de materia seca del zacate ryegrass anual fue mayor en todos los tratamientos sobre el testigo, aunque, para que sea económicamente costeable en el lavado del suelo, se debe usar agua de gravedad.

- La dosis de estiércol que generó la más alta producción de materia seca y mayor beneficio económico fue la de 60 Mg ha⁻¹ aunque no hubo diferencia significativa, en producción de materia seca, con los demás tratamientos, pero se esperaría que en los próximos tres años la recuperación económica sea mayor.

LITERATURA CITADA

- Aceves, L.A. 1976. Los terrenos ensalitrados y los métodos para su recuperación. Ediciones PATENA. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Aceves, N.E. 1979. El ensalitrado de los suelos bajo riego. Identificación, control, combate y adaptación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Anderson, L.G. 1981. Guía práctica para el análisis beneficio-coste. Diana. México, D.F.
- Ayers, R.S. y D.W. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 20. FAO. Roma, Italia.
- BANRURAL. 1979. Paquete tecnológico para los principales cultivos de la Comarca Lagunera. BANRURAL Centro Norte. Torreón, Coahuila.
- Caballero, R., A. Bustos y R. Román. 2001. Soil salinity under traditional and improved irrigation schedules in central Spain. *Soil Sci. Am. J.* 65: 1210-1218.
- Castellanos R., J.Z. 1985. El medio ambiente físico del suelo y su modificación mediante la aplicación de materia orgánica. Temas didácticos. Publicación 2. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Delegación Laguna. Matamoros, Coahuila, México.
- Castellanos, J.Z. 1987. Características de los estiércoles de bovino y gallinaza en la Comarca Lagunera. pp. 79-89. *In*: Informe de investigación agrícola en forrajes. SARH-INIFAP-CIAN-Campo Agrícola Experimental de la Laguna. Matamoros, Coahuila.
- Castellanos, J.Z., J.J. Márquez-Ortiz, J.D. Etchevers, A. Aguilar-Santelises y J.R. Salinas. 1996. Long-term effect of dairy manure on forage yields and soil properties in an arid irrigated region of Northern Mexico. *Terra* 14: 151-158.
- Castellanos, J.Z., J.X. Uvalle y A. Aguilar. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelo y agua. Segunda edición. Instituto Nacional de Capacitación (INCAPA). Celaya, Gto. México.
- Cepeda, D.J.M. 1985. Química de suelos. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- CETENAL-UNAM. Comisión de Estudios del Territorio Nacional-Universidad Nacional Autónoma de México. 1970. Carta de climas Clave 13 R, VIII. Durango. México, D.F.
- CIAN. Centro de Investigaciones Agrícolas del Norte. 1994. Guía técnica de los cultivos de la Comarca Lagunera. Centro de Investigaciones Agrícolas del Norte-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Matamoros, Coahuila. México.
- Crescimanno, G., M. Iovino y G. Provenzano. 1995. Influence of salinity on soil structural and hydraulic characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1701-1708.
- Díaz, L.F., G.F. Savage, L.L. Eggerth y C.G. Golueke. 1993. Composting and recycling municipal solid waste. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.
- Drury, C.F., C.S. Tan, J.D. Gaynor, T.O. Oloya, I.J. van Wesenbeeck y D.J. McKenney. 1997. Optimizing corn production and reducing nitrate losses with water table control-subirrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 889-895.
- Fernández, G.R. 1990. Algunas experiencias y proposiciones sobre recuperación de suelos con problemas de sales en México. *Terra* 8: 226-240.
- González, R. del C., M. Ortega, C. Ramírez y J.L. Rone. 1985. Establecimiento de relaciones funcionales entre láminas de lavado, sales desplazadas y sales residuales en suelos salinos. *Agrociencia* 59: 131-147.
- Jameson, D.A., S.A. D'Aquino y E.T. Bartlett. 1974. Economics and management planning of range ecosystems. A.A. Balkema. Rotterdam, The Netherlands.
- Keren, R. y S. Miyamoto. 1990. Reclamation of saline, sodic, and boron affected soils. *In*: K.K. Tanji (ed.). Agricultural salinity assessment and management. ASCE manuals and reports on engineering practice 71. New York.
- Mace, J.E. y C. Amrhein. 2001. Leaching and reclamation of soil irrigated with moderate SAR waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 199-204.
- Meek, B., L. Graham y T. Donovan. 1982. Longterm effects of manure on water infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1014-1019.
- Minson, D.J. 1990. Forage in ruminant nutrition. Academic Press. San Diego, CA.
- Olivares, S.E. 1994. Paquete de diseños experimentales. Versión 2.5. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, Nuevo León, México.
- Oregon State University. 1999. Forages management guide. Extension & Station Communication. PNW 501. Oregon State University. Corvallis, OR.
- Paul, E.A. y F.E. Clark. 1989. Soil microbiology and biochemistry. Academic Press. San Diego, CA.
- Primo, Y.E. y J.M. Carrasco. 1987. Química agrícola y fertilizantes. Alhambra Mexicana. México, D.F.
- Quiroga, G.H.M. y J.M. Fariás F. 1994. Cultivos forrajeros de invierno. Parcela de validación. Informe de Investigaciones en Forrajes. Centro de Investigaciones Agrícolas del Norte-Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México.
- Richards, L.A. 1980. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. LIMUSA. México, D.F.
- Russo, D. 1985. Leaching and water requirement studies in a gypsiferous desert soil. *J. Soil Sci.* 49: 432-436.
- Soil Survey Staff. 1998. Keys to soil taxonomy. US Department of Agriculture & Natural Resources Conservation Service. 8ava ed. Washington, DC.
- SPP. Secretaría de Programación y Presupuesto. 1978. Carta edafológica G13D15 Bermejillo. Dirección General de Estudios del Territorio Nacional. México, D.F.

EVALUACION DE MEJORADORES DEL SUELO EN LIMON MEXICANO

Evaluation of Soil Amendments for Mexican Lime

Octavio Pérez Zamora¹

RESUMEN

Dos terceras partes de los suelos de la Llanura Costera de Tecomán, Colima, son calcimórficos; esto afecta negativamente el establecimiento, el desarrollo y la producción de limón mexicano [*Citrus aurantifolia* (Christm) Swingle]. Durante 1998 y 1999, se evaluaron seis mejoradores químicos aplicados al suelo: azufre (A), ácido sulfúrico (AS), tiosulfatos de amonio y potasio (THIO y KTS, respectivamente) polisulfuro de potasio (KSUL), nitrosul (NITRO) y testigo (sin aplicar). Todos los mejoradores aumentaron el rendimiento de fruta (29 a 42%) con respecto al testigo. Azufre y KSUL incrementaron altura, diámetro de tronco del árbol, calidad de fruta (volumen de jugo), número de frutos producidos y eficiencia de producción del árbol. Además, la aplicación de mejoradores evitó la concentración de producción de fruta en una determinada época de cosecha. La mayor relación beneficio/costo (B/C), tanto directa como incremental se obtuvo con Azufre.

Palabras clave: Limón mexicano, azufre, eficiencia en producción, época de cosecha.

SUMMARY

Two thirds of the coastal plains of Tecoman, Colima, have calcareous soils; this has a negative effect on the establishment, growth and yield of Mexican lime [*Citrus aurantifolia* (Christm) Swingle]. Six chemical soil amendments were evaluated during 1998 and 1999: Sulfur (A), sulfuric acid (AS), ammonium and potassium thiosulfate (THIO and KTS, respectively), potassium polysulfate (KSUL), Nitrosul (NITRO), and a control (without amendments). All the

¹ Campo Experimental Tecomán. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Apartado Postal 88, 28100 Tecomán, Colima, México. (ctecoman@volcan.udc.mx)

Recibido: Junio de 2000. Aceptado: Marzo de 2002.
Publicado en Terra 20: 337-346.

amendments increased yields (29 to 42%) relative to the control. Sulfur and KSUL increased tree height, trunk diameter, fruit quality (juice volume), number of harvested fruits, and yield efficiency. In addition, soil amendments prevented the concentration of fruit production in one harvest period. Financial analysis showed that the highest beneficial/cost (B/C) ratio, both direct and incremental, was obtained with sulfur.

Index words: Mexican lime, sulphur, yield efficiency, seasonal harvest.

INTRODUCCION

Dos tercios de la mejor área agrícola de la llanura costera de Tecomán, Colima, son suelos calcimórficos, cuyas propiedades reflejan predominancia e influencia de materiales madre calcáreos (alto contenido de carbonato de calcio). Esta situación afecta negativamente el establecimiento, el desarrollo y la producción de actividades agrícolas, debido a que el potencial de respuesta de limón mexicano guarda relación con las propiedades que la acumulación y el contenido de carbonato de calcio imparten a los suelos donde se establece dicho cultivo (Medina *et al.*, 1993; Pérez, 1995). Esta situación es crítica, dada la importancia nacional e internacional que el estado de Colima tiene como productor y exportador de frutas cítricas (Medina *et al.*, 1993; Orozco *et al.*, 1994). La concentración de CaCO₃ (> 15%) en el suelo genera condiciones subóptimas para el crecimiento de limón mexicano y puede causar disminución de 20 a 30% en rendimiento, reducción en calidad de fruta (10%) y eventualmente, la muerte de los árboles.

Estudios previos (Pérez, 1995) reportan que esta situación se ha abordado en una sola dirección: la evaluación de portainjertos de cítricos tolerantes a carbonato de calcio. En consecuencia, la contribución ha sido parcial, debido a que se desconoce la distribución horizontal y vertical de carbonatos de calcio; en estas circunstancias el potencial de portainjertos para limón mexicano está subutilizado.

La distribución del carbonato de calcio está relacionada con el material parental, topografía, distancia de la fuente, clima y con procesos geológicos de deposición y plegamiento de los materiales (SPP, 1981). En el inicio del Cretácico Superior, el levantamiento y plegamiento del área contribuyó con aportes terrígenos a la cuenca; esto ocasionó intercalaciones de caliza con lutita, lutita con arenisca y arenisca con conglomerados. Los afloramientos al norte y noreste constituyen los cerros de Caleras, San Miguel y Cubilete. Durante el Cuaternario se depositó, en el municipio, material de origen aluvial y rocas de origen lacustre (SPP, 1981; INEGI, 1991).

En suelos alcalinos del norte de México se han probado fertilizantes ácidos líquidos con resultados satisfactorios; estos fertilizantes atenúan la fijación y precipitación del P, y se les ha colocado en la categoría de mejoradores (California Fertilizer Association, 1975; Requejo *et al.*, 1994). Los mejoradores se prepararon con base en ácido sulfúrico, urea y ácido fosfórico; su aplicación afectó positivamente la altura de plantas, concentración foliar de P y Ca, así como la eficiencia de absorción.

La ineficiencia de uso de los fertilizantes puede deberse a varias causas, sin embargo, las más importantes de la región se relacionan con la fijación de P y Zn, utilización de fuentes inapropiadas y aplicaciones extemporáneas e inadecuadas. En Tecomán, la deficiencia de P está ampliamente diseminada; aunque se reconoce la necesidad de este elemento en la producción, el nivel de su aplicación ha disminuido durante los últimos años. Esto se agrava por el descontrol de la industria de los fertilizantes, dado los incrementos económicos de casi el doble que han tenido las fuentes fosfóricas inorgánicas. En estas condiciones los niveles de aplicación se encuentran por debajo de los necesarios para la producción satisfactoria. En consecuencia, al igual que en otras regiones subdesarrolladas del mundo, el consumo de P está en función de su disponibilidad y forma de aplicación. Sobre este particular se ha sugerido la utilización de S proveniente del gas industrial para rehabilitar los suelos alcalinos (Biederbeck, 1978; Akinremi y Cho, 1991).

En otros cultivos, como melón cantaloupe, la eficiencia de uso de N se mejoró con la aplicación de mejoradores inorgánicos. De esta manera, la producción de melón se incrementó en 1.65 y 1.44 veces con la aplicación de azufre y ácido

sulfúrico, respectivamente. El incremento en producción y calidad de fruta se relacionó con el efecto acidificante de los mejoradores: al disminuir el pH se favoreció la asimilación de P y otros nutrimentos (Pérez, 1995).

También el uso de mejoradores de suelo de tipo orgánico ha dado resultados satisfactorios en la llanura costera de Tecomán. En trabajos previos (Pérez, 1995), se mejoró la eficiencia del N aplicado con el uso de abonos verdes. El uso de abonos verdes mejoró la eficiencia de utilización del N por tonelada de fruta de exportación; esta eficiencia fue de 4.38, 4.36, 3.96 y 5.98 kg de N por tonelada de fruta de melón de exportación con la incorporación al suelo de sorgo forrajero (*Sorghum bicolor* L.), clitoria (*Clitoria ternatea* L.), crotalaria (*Crotalaria juncea* L.) y maleza espontánea, respectivamente. El objetivo del presente trabajo fue evaluar tecnologías que tienen potencial para corregir y atenuar el efecto de los carbonatos de calcio del suelo, así como incrementar rendimiento y eficiencia de producción de limón mexicano.

MATERIALES Y METODOS

El experimento se efectuó en huerto de agricultor cooperante. La edad de la plantación del limón mexicano a la fecha de establecimiento (18 de marzo de 1998) del experimento era de siete años, con distancia de plantación de 5 x 9 m; las plantas de limón estaban injertadas sobre macrofila (*C. Macrophylla* Wester, aka Alemow).

Localización

El experimento se estableció en el Rancho "Tres de Noviembre", sus coordenadas son 18° 53' 27" N y 103° 51' 21.6" O, 2 km al oriente de la ciudad de Tecomán, Colima.

Suelos

El suelo en estudio se clasificó como Kastanozem cálcico (FAO/UNESCO), con pH de 7.9, conductividad eléctrica de 1.95 dS m⁻¹, presenta horizontes mólico, cámbico y cálcico en el perfil. El suelo es calcáreo, pobre en materia orgánica, tiene alto contenido de bases intercambiables (> 95%) y es deficiente en fósforo y elementos menores (Fe, Zn y

Mn). Suelo profundo de textura franco arenosa a areno-francosa, bien drenado, con muy baja retención de humedad (75 mm m⁻¹ suelo) y plano. En el Cuadro 1 se muestran las características de un perfil del suelo en el sitio experimental.

Tratamientos y Diseño Experimental

Los tratamientos (mejoradores de suelo) en estudio fueron: 1. Testigo, T (sin mejorador, testigo absoluto); 2. Azufre, A (0.627 kg árbol⁻¹); 3. Acido sulfúrico industrial (97%), AS (7.3 kg árbol⁻¹); 4. Polisulfuro de potasio KSUL (0-0-22-23S), en dosis de 2.232 kg árbol⁻¹; 5. Tiosulfato de potasio (0-0-25-17S), KTS en dosis de 2.876 kg árbol⁻¹; 6. Tiosulfato de amonio (12-0-0-26S), THIO en dosis de 1.973 kg árbol⁻¹; 7. Nitrosul (20-0-0-45S), NITRO en dosis de 0.54 kg árbol⁻¹.

La densidad de los productos aplicados fue de 0.78, 1.65, 1.39, 1.46, 1.46 y 1.16 kg L⁻¹ para azufre, AS, KSUL, KTS, THIO y NITRO, respectivamente. La aplicación de los productos fue en cantidad equivalente a la neutralización de 2 meq Na⁺ ha⁻¹. Los mejoradores de suelo se aplicaron alrededor del árbol manualmente, en zanja excavada (0.15 m) en la proyección de la copa del árbol y, posteriormente, se taparon con azadón; las fechas de aplicación fueron: 18 de marzo de 1998 y 18 de febrero de 1999.

Cada tratamiento se repitió cuatro veces en diseño experimental de bloques al azar. La parcela total de cada tratamiento fue de cinco árboles; la parcela útil de tres árboles para asegurar competencia completa entre plantas. La superficie de cada parcela fue de 270 m²,

de cada repetición 1870 m² y la superficie total del experimento fue de 7560 m².

Manejo del Huerto

El riego se proporcionó por sistema de microaspersión, humedeciendo 100% de la superficie de goteo del árbol, a una tensión de 0.5 atm del suelo; los fertilizantes (nitrato de potasio y amonio y ácido fosfórico) a las dosis recomendadas (Medina *et al.*, 1993) se incorporaron en el sistema de riego. El control de maleza se efectuó con herbicidas y el de plagas y enfermedades con prácticas y productos agroquímicos recomendados (Medina *et al.*, 1993).

Variables Registradas

La respuesta a los mejoradores de suelo se midió mediante: 1) rendimiento (Mg ha⁻¹); 2) calidad de fruto (diámetro, peso y volumen de jugo por fruto); 3) crecimiento del árbol (altura, diámetro de copa y tronco, y volumen de copa); el volumen de copa se calculó asumiendo que la forma del árbol correspondía a una semiesfera [volumen = (4/6) . pi . Altura . radio de copa²]; 4) eficiencia de producción: el cociente de rendimiento/volumen de copa se le denominó eficiencia de producción (Roose *et al.*, 1989); y 5) análisis financiero (relación beneficio/costo, directa e incremental). La directa es el cociente del producto de ventas de cosecha entre el costo de producción del cultivo, incluyendo los costos fijos y variables, mientras que la incremental se refiere al cociente del beneficio económico que se obtiene del incremento

Cuadro 1. Características morfológicas del suelo en estudio (Kastanozem cálcico. Rancho Tres de Noviembre. Tecomán, Colima. 1998).

Horizonte	Profundidad cm	Color Húmedo Munsell	Textura de campo	Textura laboratorio A/L/R [†]	Estructura [‡] grado, tamaño y forma	Reacción a carbonatos	Consistencia seco y húmedo [§]	pH
A ₁	0-31	10 YR 3/3	Fa	58/23/9 Fa	1 mf gr	no	bl, bl	7.47
B _{1ca}	31-60	10 YR 4/3	F1	42/49/9 F1	1 mf, bksa	muy fuerte	Bl,bl	7.20
B ₁₂	60-109	10 YR 5/2	Af	84/11/5 Af	gs	no	So,so	7.26
B _{kca}	109-120	10 YR 6/2	Ext.duro	50/44/6 F1	masiva	ext.fuerte	ext.duro	7.46
C	120-130		A		gs	no	so, so	7.38

[†] Textura. A: arena, Af: arenas francas, Fa: franco arenoso, F1: franco limoso; L: limo, R: arcilla

[‡] Estructura. 1: débil 2: moderada mf: muy fina, m: media; gs: granos simples, gr: granular, bksa: bloques subangulares, lm: laminar.

[§] Consistencia en seco. so: suelta, bl: blanda, ed: extremadamente dura; [§] Consistencia en húmedo: so: suelta, bl: blanda, ext.duro: extremadamente duro.

Perfil descrito por Dr. Octavio Pérez Zamora.

logrado en producción debido al uso de mejoradores del suelo entre el costo incremental por el uso del insumo aplicado. El rendimiento se obtuvo cosechando tres árboles en cada unidad experimental; para determinar calidad, se colectaron 25 frutos en los tres árboles de la unidad experimental en cada uno de los cuatro puntos cardinales de cada árbol; las frutas se analizaron acorde con la metodología de Wardowski *et al.* (1979).

Análisis Estadístico

Las pruebas estadísticas ($P < 0.05$ y 0.01) se efectuaron mediante análisis de varianza con el paquete estadístico COHORT 3; también se realizó estimación de contrastes establecidos *a priori* y *a posteriori*. Los contrastes establecidos *a priori* fueron 6 y son: C1: Testigo *vs* mejoradores del suelo; C2: Potásicos (KSUL, KTS) *vs* amoniacales (THIO, NITRO); C3: Azufre *vs* resto de mejoradores; C4: A *vs* KTS; C5: Formadores de ácido *vs* no formadores de ácido (A, AS *vs* KSUL, KTS, THIO, NITRO); y C6: Claros *vs* oscuros (KTS, THIO *vs* KSUL, NITRO). Los contrastes *a posteriori* (no planeados) fueron: C1: Cosecha de verano *vs* cosecha de primavera; C2: Verano *vs* otoño; C3: Verano *vs* primavera + otoño; y C4: Primavera *vs* otoño en 1998; en 1999, los contrastes fueron cuatro: C1: Cosecha de verano *vs* cosecha de primavera; C2: Verano *vs* invierno;

C3: Verano *vs* primavera + invierno; y C4: Primavera *vs* invierno.

RESULTADOS Y DISCUSION

Producción de Fruta

Los resultados obtenidos durante 1998 y 1999 se muestran en el Cuadro 2 y el resumen de análisis de varianza en el Cuadro 3. La respuesta a los mejoradores de suelo fue ($P < 0.05$) estadísticamente significativa con respecto al testigo. KTS y A resultaron considerablemente superiores al testigo (Cuadro 2); los incrementos medios (dos ciclos) fueron de 41.2 y 40.4%, respectivamente. El menor incremento en producción se obtuvo con NITRO y AS (25.1%), mientras que KSUL y THIO aumentaron el rendimiento en 29.6 y 33.9%, respectivamente.

El único contraste que resultó significativo fue el No. 1 *a priori*; el incremento global con este contraste fue 27.9% mayor rendimiento que el testigo, o sea, que todos los mejoradores incrementaron el rendimiento en cada uno de los años estudiados (25.1 a 41.2%). Los mejoradores claros ocasionaron mayor (7.4%) producción que los oscuros, los potásicos (4.3%) más que los nitrogenados, el A (6.9%) más que el resto de los mejoradores, sin embargo, no alcanzaron la significancia estadística. Lo anterior puede deberse a que al aplicar dosis equimolares de productos que

Cuadro 2. Rendimiento y número de frutos de limón mexicano con tratamiento de mejoradores de suelo.

Tratamiento	1998 [†]	1999 [§]	Promedio dos ciclos	Incremento respecto al testigo	Número de frutos ha ⁻¹ x 1000 (promedio de 1998 y 1999)
	----- Mg ha ⁻¹ -----			%	
1. Testigo	29.71 c [†]	28.97 b	29.34 b	0.0	836 b
2. Azufre	39.96 ab	42.43 a	41.19 a	40.4	1240 a
3. Acido sulfúrico	32.99 bc	40.41 ab	36.70 a	25.1	1140 a
4. KSUL [†]	34.12 bc	41.93 a	38.02 a	29.6	1190 a
5. KTS	43.13 a	39.76 ab	41.44 a	41.2	1180 a
6. THIO	39.73 ab	38.87 ab	39.30 a	33.9	1120 a
7. NITRO	35.34 bc	38.10 ab	36.72 a	25.1	1110 a
CV (%)	9.14	14.82	11.58		14.8
Media Mg ha ⁻¹	36.43	38.64	37.53		1120
DMS 5 %	4.94	8.50	5.09		265

[†] KSUL = polisulfuro de potasio. THIO = tiosulfato de amonio. KTS = tiosulfato de potasio. NITRO = nitrosul.

[‡] Cosecha acumulada de ocho cortes de fruta efectuados en el año.

[§] Cosecha acumulada de 10 cortes de fruta efectuados en el año.

[†] Medias con letras diferentes en las columnas son estadísticamente diferentes entre sí.

Cuadro 3. Resumen de análisis de varianza y comparación de contrastes entre mejoradores de suelo.

Fuente de variación	gl	F	p	Significancia [†]
Bloques	3	2.84	0.066	NS
Mejoradores	6	5.68	0.001	**
Contrastes:				
C1: T vs A, AS, KSUL, KTS, THIO, NITRO [†]	1	23.39	0.000	***
C2: KSUL, KTS vs THIO, NITRO	1	1.01	0.328	NS
C3: A vs AS, KSUL, KTS, THIO, NITRO	1	2.15	0.159	NS
C4: A vs KTS	1	0.01	0.919	NS
C5: A, AS vs KSUL, KTS, THIO, NITRO	1	0.00	0.960	NS
C6: KTS, THIO vs KSUL, NITRO	1	3.06	0.097	NS
Error parcela principal	18	23.53 [§]		
Años	1	3.64	0.07	NS
Interacción mejoradores x año	6	1.90	0.127	NS
Error	21	18.89 [§]		
Model	34	2.66	0.104	*
R ² = SS Modelo/SS Total		0.81		

[†] T = testigo. A = azufre. AS = ácido sulfúrico. THIO = tiosulfato de amonio. KTS = tiosulfato de potasio. KSUL = polisulfuro de potasio. NITRO = nitrosul.

[‡] NS, *, ** y *** = no significativo, significativo a 5, 1 y 0.1 %, respectivamente.

[§] Cuadrado medio del error.

oxidan rápidamente el S⁰, el pH del suelo disminuye y los beneficios de la acidificación pueden ser inmediatos o lentos; esto depende de la velocidad de oxidación del producto empleado (Sholeh *et al.*, 1997; Slaton *et al.*, 1998).

Aunque no se observó diferencias en producción entre años (Cuadro 2), el rendimiento promedio (de todos los tratamientos) fue de 26.4 y 39% en 1998 y 1999, respectivamente; la magnitud de incremento entre años se atribuyó al uso de los mejoradores, ya que el testigo mostró reducción en rendimiento.

En 1999, todos los mejoradores incrementaron el rendimiento con respecto al testigo. La consistencia de incremento en rendimiento entre años se observó para S, AS, KSUL y NITRO; por ejemplo, S produjo 12% más en 1999 que en 1998, mientras que NITRO, AS y KSUL resultaron 12.6, 28.5 y 29.5% más efectivos en 1999 que en 1998. Estas variaciones positivas (incrementos) se atribuyen al manejo adecuado del cultivo, así como al efecto acumulativo del uso de mejoradores, ya que el testigo absoluto no incrementó su rendimiento, por el contrario disminuyó 2.5% en 1999 (Lindemann *et al.*, 1991). En contraste con el comportamiento positivo, entre años, de los anteriores mejoradores en el segundo ciclo (1999), KTS y THIO disminuyeron su efecto en 8 y 1.3%, respectivamente, con respecto a 1998. El abatimiento en rendimiento con KTS en 1999 no puede explicarse; sin embargo, si consignar que las temperaturas (Figura 1) del suelo fueron diferentes entre 1998 y 1999. Si la temperatura

del suelo tuvo efecto diferencial entre mejoradores (tiempo de respuesta), resulta difícil soportarlo. Al respecto de lo anterior, las diferencias observadas entre años para un mismo mejorador pueden atribuirse a las diferentes tasas de oxidación de los productos empleados, ya que esta tasa de oxidación depende de la fertilidad del suelo (Nor y Tabatabai, 1977; Sholeh *et al.*, 1997), de la temperatura (Jansen y Bettany, 1987), y del producto comercial empleado (Slaton *et al.*, 2001).

La apariencia visual del follaje también se mejoró con el uso de los productos aplicados; sin embargo, dicho efecto desapareció entre 250 y 275 días después de la aplicación: esto es después de realizar ocho y 10 cortes de fruta, en 1998 y 1999, respectivamente. Esto significa que el efecto de los mejoradores es temporal y se requiere continuar aplicándolos cada año para seguir teniendo incrementos en rendimiento (Lindemann *et al.*, 1991; Slaton *et al.*, 2001).

El tiempo de respuesta a la aplicación de los mejoradores resultó variable; esto debido a que dicha respuesta está en función de la humedad y temperatura del suelo (Biederbeck, 1978). El azufre mostró respuesta inicial en rendimiento más temprana en 1998 que en 1999, lo cual se relacionó con las diferencias en temperatura observadas entre años; las temperaturas iniciales fueron más calientes en 1998 que en 1999; la situación fue general para todo el estado de Colima (Figura 1).

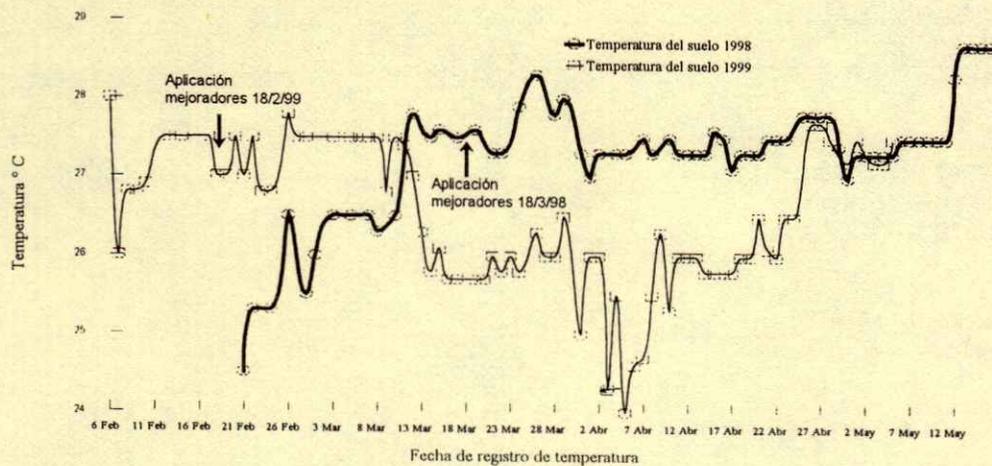


Figura 1. Temperatura (°C) del suelo a 30 cm de profundidad durante el invierno y primavera de 1998 y 1999. Rancho Tres de Noviembre, municipio de Tecomán, Colima.

El incremento en rendimiento por uso de mejoradores del suelo guardó relación con el número de frutos cosechados (Cuadro 2). Los mejoradores lograron 28.1% más frutos que el testigo. El azufre fue el tratamiento que produjo más (37.7%) frutos cosechados que el testigo; por su parte, los mejoradores potásicos y AS incrementaron en 29% el número de frutos; en contraste, los mejoradores amoniacales sólo lo incrementaron en 25%. En conclusión, el incremento en número de frutos cosechados parece ser el principal componente de rendimiento.

Crecimiento

Los registros finales de variables de crecimiento se muestran en el Cuadro 4. Todos los mejoradores incrementaron la altura del árbol con respecto al testigo; azufre y KTS fueron 6.7% más altos, mientras que en AS, KSUL y NITRO fue de 2.3%. En cuanto a diámetro de tronco, el azufre también fue el mejorador que produjo el mayor diámetro (5.7% más que el testigo); el resto de los tratamientos resultó estadísticamente igual que el testigo. Azufre y KSUL incrementaron en 4.4 y 5.1% el diámetro de copa y en 7.3 y 6.8% el volumen de copa con respecto al testigo; sin embargo, estas diferencias no alcanzaron significancia estadística.

También se efectuaron otras observaciones de crecimiento, como: número de hojas y peso de hojas

por brote y peso de tallo de brote. Los datos de estas observaciones adicionales no se muestran por que no tuvieron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, no obstante, el tamaño de la muestra colectada (10 brotes árbol⁻¹ de 1.5 meses de edad); sin embargo, se consigna que los mejoradores promediaron 98 mg más de peso de hojas/brote que el testigo. En este aspecto, Azufre y NITRO tuvieron 5.9 y 2.9% más de peso que el testigo, que equivale a 120 y 760 mg por brote, respectivamente. El azufre tuvo 12.6% más de peso de tallo que el testigo, esto representó 82 mg más por tallo.

Cuadro 4. Variables de crecimiento registradas en limón mexicano.

Tratamiento	Altura	Diámetro de tronco		Diámetro de copa	Volumen de copa
	m	cm		m	m ³
1. Testigo	3.42 b [†]	17.65 ab		4.90 a	46.03 a
2. Azufre	3.67 a	18.63 a		5.12 a	49.49 a
3. A. sulfúrico	3.50 ab	17.87 ab		5.05 a	47.75 a
4. KSUL [†]	3.52 ab	18.25 ab		5.15 a	49.07 a
5. KTS	3.65 a	17.67 ab		4.90 a	45.48 a
6. THIO	3.60 ab	17.10 ab		4.97 a	46.69 a
7. NITRO	3.52 ab	16.17 b		4.87 a	44.02 a
CV (%)	3.49			6.30	15.29
Media	3.56			4.99	46.94
DMS 5%	0.18			0.46	10.64

[†] KSUL = polisulfuro de potasio. KTS = tiosulfato de potasio. THIO = tiosulfato de amonio. NITRO = nitrosul.

[‡] Tratamientos en las columnas, con las mismas letras, son estadísticamente iguales entre sí.

Calidad de Fruta

Los diámetros y tamaños de fruto se muestran en el Cuadro 5. En ninguno de los años se observaron diferencias estadísticas en diámetro y peso promedio de fruta de limón. Los diámetros y peso de fruto registrados resultaron similares a los reportados en estudio previo, a largo plazo, de evaluación de densidades de plantación (Medina *et al.*, 1993).

El diámetro y peso de fruta fue superior en 1999 que en 1998; esto sugiere mejor manejo del experimento; el testigo tuvo 1.2 mm y 1.8 g más de diámetro y peso de fruto en 1999 que en 1998. Sin embargo, los mejoradores del suelo también mostraron efecto positivo en 1999 sobre estas variables de calidad, ya que en conjunto produjeron frutos de mayor diámetro y peso en 1999. En promedio (todo el experimento), en 1999 el incremento fue 1.27 mm y 2.2 g más de diámetro y peso de fruto que en 1998.

Respecto al volumen de jugo (Cuadro 5) se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos. Azufre fue el mejorador con el que se obtuvo el mayor porcentaje de jugo, mientras que KTS y THIO (mejoradores claros) mostraron los valores más bajos de jugo por fruto; al presente no puede establecerse porque A produce un mayor porcentaje de jugo. Por otra parte, el que KTS y THIO produjeran menos jugo que el testigo puede atribuirse a diferencias en etapas de maduración de fruto al tiempo de la cosecha, deficiencias de humedad en las parcelas experimentales

y su efecto sobre la floración de la planta (Medina *et al.*, 1993).

Eficiencia de Producción

La eficiencia de producción se muestra en el Cuadro 6. Todos los tratamientos tuvieron mayor eficiencia de producción que el testigo. En ambos ciclos de cultivo, los mejoradores del suelo mostraron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) con respecto al testigo. En 1998, la mayor eficiencia (0.939) se logró con KTS, mientras que, en 1999, se obtuvo con NITRO (0.882). Estas variaciones entre tratamientos con años pueden atribuirse a la diferente composición y tasa de oxidación de los mejoradores y su interacción con el ambiente (Jansen y Bettany, 1987; Slaton *et al.*, 2001). La eficiencia global en todos los tratamientos fue más grande en 1999 (0.832) que en 1998 (0.785), sin embargo, la diferencia fue sólo de 47 kg m⁻³ de follaje mayor en 1999 que en 1998, lo cual fue congruente con el rendimiento y diámetro y peso de fruto e indica que existió consistencia entre los resultados de ambos años que duró el estudio.

La mayor eficiencia media de los dos años de estudio se obtuvo con KTS (0.906 Mg m⁻³), seguido por NITRO, THIO y A con 0.848, 0.848 y 0.847 Mg m⁻³, respectivamente; la menor eficiencia fue con AS y KSUL (0.782 y 0.779).

En 1999, todos los tratamientos, con excepción del testigo, THIO y KTS, aumentaron la eficiencia de

Cuadro 5. Características de fruta observadas en limón mexicano por efecto de la aplicación de mejoradores .

Tratamiento	Diámetro de fruta [†]		Peso de fruto [†]		Volumen de jugo por fruto [§]
	1998	1999	1998	1999	
	----- mm -----		----- g -----		%
1. Testigo	36.7 a	37.9 a	32.3 a	34.1 a	45.31 ab
2. Azufre	36.6 a	37.2 a	32.2 a	34.8 a	47.02 a
3. A. Sulfúrico	36.6 a	38.1 a	32.1 a	33.6 a	45.38 ab
4. KSUL [†]	36.5 a	38.2 a	32.4 a	34.8 a	46.20 ab
5. KTS	36.4 a	37.4 a	31.2 a	33.1 a	44.66 b
6. THIO	36.3 a	37.8 a	31.5 a	34.1 a	44.69 b
7. NITRO	36.3 a	37.6 a	31.8 a	34.0 a	45.32 ab
CV (%)	6.18	5.7	3.6	5.2	3.11
Media	36.5	37.7	131.9	34.1	45.51
DMS 5%	10.6	10.1	1.7	2.6	2.11

[†] KSUL = polisulfuro de potasio. KTS = tiosulfato de potasio. THIO = tiosulfato de amonio. NITRO = nitrosul.

[‡] Los datos son promedio de 25 frutos muestreados en cada uno de los cortes efectuados en 1998 (8 cortes) y 1999 (10 cortes).

[§] Los datos son promedio de 18 cortes de fruta (8 en 1998 y 10 en 1999).

Cuadro 6. Efecto de mejoradores del suelo sobre eficiencia de producción de fruto.

Tratamiento	Eficiencia de producción			
	1998	1999	Eficiencia media de dos ciclos ¹	Incremento de eficiencia (1999)
	- - - - Mg m ⁻³ de follaje - - - -			
				kg m ⁻³
1. Testigo	0.661 c	0.641 b	0.651	-20
2. Azufre	0.821 abc	0.872 ab	0.847	51
3. A. Sulfúrico	0.706 bc	0.858 ab	0.782	152
4. KSUL [†]	0.698 bc	0.861 ab	0.779	163
5. KTS	0.939 a	0.872 ab	0.906	-67
6. THIO	0.857 ab	0.839 ab	0.848	-18
7. NITRO	0.814 abc	0.882 a	0.848	68
CV (%)		19.1		
Media	0.785	0.832	0.808	45
DMS 5%		0.236		

[†] KSUL = polisulfuro de potasio. KTS = tiosulfato de potasio. THIO = tiosulfato de amonio. NITRO = nitrosul.

¹ Los datos son promedio de 18 cortes de fruta efectuados (8 y 10 en 1998 y 1999, respectivamente).

producción con relación a 1998; los incrementos en eficiencia fueron de 163 (KSUL), 152 (AS), 68 (NITRO), 51 (Azufre) y 33 kg m⁻³ (THIO), respectivamente. Al comparar contrastes, los mejoradores claros fueron superiores en eficiencia que los oscuros (46.5 kg más m⁻³), los formadores de ácido tuvieron 30 kg m⁻³ más que los no formadores de ácido y Azufre 59 kg m⁻³ más que KTS. En este contexto es esencial tener conocimiento de las tasas de oxidación de S, de los productos probados, y su efecto sobre la acidificación del suelo, ya que las tasas de oxidación de S varían con el tipo de fuente, la frecuencia y época de uso, variaciones en solubilidad y tamaño de las partículas (Li y Caldwell, 1966), con el proceso de manufactura y aditivos (Lindemann *et al.*, 1991), así como con la temperatura del suelo (Jansen y Bettany, 1987) y la velocidad de oxidación del producto (Slaton *et al.*, 2001). Otros procesos que pueden influir sobre la eficiencia de producción son la forma de aplicar y la composición del producto; se sugiere aplicar los mejoradores claros en riegos presurizados o en forma foliar, sin causar daño a los equipos; mientras que los de color oscuro son corrosivos y se recomienda aplicarlos al voleo e incorporarlos con rastra, en tanto que el S es conveniente aplicarlo en banda.

Estacionalidad de la Cosecha.

La concentración de producción de fruta de limón durante una determinada época (junio a octubre) se le llama "estacionalidad de la cosecha" (Medina *et al.*, 1993). Esta estacionalidad tiene efecto sobre el tamaño, diámetro y peso de fruto y rendimiento por época de corte. En consecuencia, también tiene efecto negativo en la comercialización del producto, ya que ocurre un mayor volumen de producción en el verano y verano-otoño (80% de la producción) que en el resto del año. Al respecto, los resultados obtenidos en el presente estudio contrastaron con resultados previos (Medina *et al.*, 1993), ya que no se observaron diferencias estadísticas significativas entre épocas de cosecha para rendimiento por corte, ni para diámetro y peso de fruto. Los resultados de análisis de varianza indicaron que no existieron diferencias estadísticas para mejoradores y mejoradores x fecha de corte para la variable rendimiento en 1998 y 1999; para diámetro de fruta, sólo la interacción mejoradores x fecha de corte fue significativa ($P < 0.001$) en 1999. La interacción mejoradores x fecha de corte fue significativa estadísticamente ($P < 0.001$) en 1998 y 1999 para el peso de fruto de limón.

Las comparaciones de contrastes, *a posteriori*, para las diferentes épocas de corte efectuadas durante 1998 y 1999 no fueron significativas estadísticamente. Los resultados de los contrastes sugieren que los mejoradores de suelo atenuaron o tienden a atenuar el efecto que el clima tiene sobre la estacionalidad de producción y calidad de frutos de limón.

Análisis Financiero

El procedimiento y cálculo del análisis financiero se muestra en el Cuadro 7. La estimación de la relación beneficio/costo (B/C) mostró que resultó mejor utilizar Azufre, THIO, NITRO y KTS, como mejoradores del suelo. Todos los mejoradores tienen mayor relación B/C que el testigo. La recomendación del mejorador de suelo a utilizar está en función del beneficio económico, incremento en producción, disponibilidad en el mercado y facilidad y seguridad de aplicación. Por ejemplo, el azufre puede incorporarse, sin riesgo, directamente al suelo; otros, como KSUL y NITRO, resultaron más apropiados al incorporarlos en riegos

Cuadro 7. Análisis financiero de los mejoradores aplicados al suelo sobre la producción de limón mexicano.

Tratamiento	Rend. [†]	Costo prod [‡]	Aplicación Prod [‡]	Análisis de suelo [#]	Cost cosech increm ^{††}	Costo Incre uso produc ^{††}	Costo producción cultivo ^{§§}	Ventas de cosecha \$720/Mg	Relación B/C ^{¶¶}	
	Mg ha ⁻¹								Incremental	Total
					pesos m.n.					
1. Testigo	29.35	-	300	14	-	-	18500	21132	-	1.14
2. Azufre	41.20	341	300	14	2370	3025	21525	29664	2.82	1.38
3. A. Sulfúrico	36.70	2749	300	14	1470	4533	23033	26424	1.17	1.15
4. KSUL [†]	38.03	1933	300	14	1736	3983	22483	27382	1.57	1.22
5. KTS	41.44	2650	300	14	2418	5382	23882	29387	1.62	1.23
6. THIO	39.30	977	300	14	1990	3281	21781	28296	2.18	1.30
7. NITRO	36.72	338	300	14	1474	2126	20626	26436	2.50	1.28

[†] KSUL = polisulfuro de potasio. KTS = tiosulfato de potasio. THIO = tiosulfato de amonio. NITRO = nitrosul.

[†] Rend: Rendimiento. La cosecha es promedio de dos años (1998 y 1999).

[‡] Costo prod.: Costo del producto (mejorador de suelo).

[‡] Aplicación prod.: Costo de aplicación manual del producto (excavación zanja de 0.15 m de profundidad alrededor del árbol, aplicación y tapado de producto líquido o sólido).

[#] Costo del análisis de suelo (una muestra representa a 5 ha en la región); pH, conductividad eléctrica y carbonatos.

^{††} Cost cosech increm: Costo de cosecha por rendimiento incremental debido a aplicación de mejoradores (\$200.0/Mg; pe 41.20-29.35 = 11.85; 11.85*200 = \$2370.0).

^{††} Costo Incre uso produc: Costo incremental por uso del producto (costo y aplicación del producto + análisis de suelo + costo incremental por cosecha adicional).

^{§§} Costo producción del cultivo: Fertilizante (producto + aplicación), riego, regador, cuota de agua o costo de bombeo, control de plagas y enfermedades, de maleza, cajeteo, horqueto y colocación, cosecha (corte y acarreo).

^{¶¶} Relación B/C: Relación Beneficio/Costo, incremental = Incremento en rendimiento x \$720.0/Costo incremental por uso del producto. Relación B/C total = Producto de las ventas/Costo de producción total.

rodados; mientras que en sistemas presurizados, goteo y microaspersión, el KTS y THIO pueden añadirse sin problemas de corrosión, ni riesgo para los trabajadores. Estos últimos representan menos costo y seguridad para el personal, ya que se incorporan directamente al sistema de riego.

CONCLUSIONES

La utilización de mejoradores del suelo de acción ácida resultó una alternativa técnica y económicamente viable para prevenir y corregir el efecto negativo que el CaCO₃ ocasiona a limón mexicano. Todos los mejoradores resultaron estadísticamente superiores al testigo. Los mejoradores de suelo más sobresalientes en lo económico, respuesta agronómica de crecimiento, rendimiento y calidad de fruta fueron: Azufre, KTS y THIO. El efecto del azufre se manifestó en mayor incremento de altura y diámetro de copa del árbol, rendimiento más alto y mayor porcentaje de jugo por fruto que el resto de los mejoradores del suelo y el testigo. Los mejoradores del suelo atenuaron el efecto climático de época de cosecha sobre rendimiento y diámetro y peso de fruto. Es recomendable evaluar los tratamientos en diferentes condiciones ambientales donde se desarrolla el limón mexicano.

LITERATURA CITADA

- Akinremi, O.O. y C.M. Cho. 1991. Phosphate and accompanying cation transport in calcareous-exchange resin system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 959-964.
- Biederbeck, V.O. 1978. Soil organic sulphur and fertility. pp. 273-310. *In: M. Schnitzer y S.U. Khan (eds.). Soil organic matter.* Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1991. Tecomán, Cuaderno de Información básica para la planeación municipal. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- Jansen, H.H. y J.R. Bettany. 1987. Measurement of sulfur oxidation. *Soil Sci.* 143: 444-452.
- Li, P. y A.C. Caldwell. 1966. The oxidation of elemental sulfur in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 370-372.
- Lindemann, W.C., J.J. Aburto, W.M. Haffner y A.A. Bono. 1991. Effect of sulfur source on sulfur oxidation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 85-90.
- Medina, U., S. Becerra, M. Robles, M. Orozco y J. Orozco. 1993. El cultivo de limón mexicano en Colima. Folleto para productores 5. Centro de Investigaciones del Pacífico Centro Colima. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colima, Colima, México.
- Nor, Y.M. y M.A. Tabatabai. 1977. Oxidation of elemental sulfur in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 736-741.
- Orozco S., M., O. López, O. Pérez y F. Delgadillo. 1994. Effect of transparent mulch, floating row covers and oil spray on insect population, virus diseases and yield of cantaloup. *Biol. Agric. Hort.* 10: 229-234.

- Pérez Z., O. 1995. Efecto de la incorporación de abonos verdes en la producción de melón en Colima. *Terra* 13: 360-367.
- Pérez Z., O., O. López y M. Orozco. 1995. Aplicación de mejoradores químicos a un suelo calcimórfico con y sin cobertura plástica en la producción de melón. *Terra* 13: 368-375.
- Requejo, R., R. Mendoza, L. Escobedo y J.M. Dimas. 1994. Effect of acid liquids fertilizers on corn, barley and triticale in greenhouse. *In: Symposium Fertilizer Technology its Efficient Use for Crop Production. Transactions 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, Mexico.*
- Roose, M.L., D.A. Cole, D. Atkin y D.R. Kupper. 1989. Yield and tree size of four citrus cultivars on 21 rootstocks in California. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 114: 678-684.
- Sholeh, R.D., B. Lefriy y G.J. Blair. 1997. Effect of nutrients and elemental sulfur particle size on elemental sulfur oxidation and the growth of *Thiobacillus thiooxidans*. *Aust. J. Agric. Res.* 48: 497-501.
- Slaton, N.A., S. Ntamungiro, C.E. Wilson Jr. y R.J. Norman. 1998. Influence of two elemental sulfur products applied to an alkaline silt loam on rice growth. pp. 326-329. *In: R.J. Norman y T.H. Johnston (eds.). Rice Research Series 1998. Res. Ser. 460. Arkansas Agric. Exp. Stn. Fayetteville, AR.*
- Slaton, N.A., R.J. Norman y J.T. Gilmour. 2001. Oxidation rates of commercial elemental sulfur products applied to an alkaline silt bam from Arkansas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 239-243.
- SPP. Secretaría de Programación y Presupuesto. 1981. Síntesis geográfica del estado de Colima. Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática. Secretaría de Programación y Presupuesto. México, DF., México.
- Wardowski, W., J. Soule, W. Grierson y G.W. Westbrook. 1979. Florida Quality Test. Bulletin 188. Florida Cooperative Extension Service. Institute of Food and Agriculture Sciences. University of Florida. Gainesville, FL.
- California Fertilizer Association. 1975. Western Fertilizer Handbook. 5th ed. California Fertilizer Association. Sacramento, CA.

SISTEMA INTEGRADO PARA RECOMENDAR DOSIS DE FERTILIZACION EN CAÑA DE AZUCAR (SIRDF)

Integrated System for Recommending Fertilization Rates in Sugar Cane (ISRFD)

David J. Palma-López¹, Sergio Salgado García^{1‡}, José J. Obrador Olán¹, Antonio Trujillo Narcía¹, Luz del C. Lagunes Espinoza¹, Joel Zavala Cruz¹, Alejandrina Ruiz Bello¹ y Miguel A. Carrera Martel²

RESUMEN

En la última década, la generación de metodologías para la recomendación de dosis de fertilización ha sido motivo de la atención de especialistas en fertilidad de suelos y de economistas, debido a la creciente necesidad de utilizar más eficientemente a los fertilizantes, al incremento de sus precios y al imperativo de conservar el ambiente. Con el objetivo de generar dosis de fertilización para caña de azúcar que se cultiva en los diferentes tipos de suelo, se llevó a cabo el presente trabajo. La identificación de unidades cartográficas de suelos se hizo mediante interpretación de fotografías aéreas, recorridos de campo y barrenaciones a 1.2 m de profundidad. En cada unidad se describieron perfiles agrológicos y se efectuaron análisis físicos y químicos para clasificar el suelo de acuerdo con la Taxonomía de Suelos y la carta de suelos del mundo. Se estimó la dosis de fertilización (DF) N, P y K para cada unidad de suelo mediante un modelo conceptual, que se basa en el balance entre la demanda del nutrimento (DEM) por el cultivo, el suministro que hace de éste el suelo (SUM) y la eficiencia del fertilizante (EF). El algoritmo respectivo es $DF = (SUM-DEM)/EF$. Para estimar la demanda, se consideró la producción de materia seca y la concentración de N, P y K de la biomasa aérea de la caña de azúcar. El suministro de P y K se estimó a partir de los resultados del análisis químico de suelos y los aportes de N a partir de la cantidad de los residuos de cosecha y su manejo. Se definieron cinco unidades de suelos, los cuales se clasificaron en Subunidad o familias. Las dosis de fertilización del modelo conceptual debieron ser ajustadas para generar una recomendación de

fertilización para la caña de azúcar por tipo de suelo en el ingenio Azsuremex. Las dosis de fertilización N, P y K fueron: Fluvisol 160-60-60, Vertisol 120-80-80, Cambisol 120-60-60, Luvisol 140-80-80 y Leptosol 160-80-80. Para el ajuste se consideraron la demanda para un rendimiento esperado por tipo de suelo y el mantenimiento de la fertilidad del suelo desde el punto de vista de manejo sostenible del cultivo de la caña de azúcar.

Palabras clave: Saccharum officinarum, dosis de fertilización, unidad de suelo, modelo conceptual.

SUMMARY

During the last decade, the generation of methodologies for recommending fertilization rates has been a key issue for economists and soil fertility specialists due to the need of using fertilizer more and more efficiently, because of price increases and to protect the environment. This work was carried out to generate fertilization rates according to the different soil types where sugarcane is cultivated. To identify cartographic soil units, interpretation of aerial photographs, field observations and soil drilling to a depth of 1.2 m were performed. In each unit, the agrologic profiles were described and physical and chemical analysis were done to classify the soil according to both the American Taxonomic System of Soils and the World Soil Map. To estimate the fertilization rates (DF) N, P, and K for each soil unit, the conceptual model was used. This model is based on the balance of the nutrient demand (DEM) of the crop, the nutrients supplied by the soil (SUM) and the fertilizer efficiency (EF). The model is $DF = (SUM-DEM)/EF$. To estimate the demand, dry matter production and N, P, and K accumulation of the sugarcane aerial biomass were determined. The P and K supply was calculated from the sum of soil chemical analysis, plus the N contributions from crop residues and their management. Five soil units were found and they were classified as Subunits or families.

¹Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco. 86500 H. Cárdenas, Tabasco, México.

[‡](salgados@colpos.colpos.mx)

²PYCSA. de C.V. México, D.F.

In the conceptual model, fertilization rates had to be adjusted to generate a fertilizer rate for the sugarcane crop appropriate for the kind of soil in the Azsuremex sugar complex. For each soil unit, fertilization recommendations were Fluvisol 160-60-60, Vertisol 120-80-80, Cambisol 120-60-60, Luvisol 140-80-80, and Leptosol 160-80-80. For the adjustment, the demand for expected yields in each soil type and maintenance of the soil fertility from the perspective of sustainable management of the sugarcane crop were considered.

Index words: *Saccharum officinarum*, fertilizer recommendation, soil unit, conceptual model.

INTRODUCCION

En el campo cañero del ingenio Azsuremex (3731 ha) se ha utilizado por más de 15 años la dosis de fertilización 120-60-60, sin considerar la variedad, el ciclo de cultivo y el tipo de suelo; se obtuvo con este manejo un rendimiento promedio de 65 t ha⁻¹ (CNIAA, 2000). Este rendimiento es inferior a 80 t ha⁻¹ que se obtienen en el ingenio Dos Patrias que se ubica en Teapa, Tabasco. En la última década, las metodologías para generar recomendaciones de dosis de fertilización han recibido atención preferente de especialistas en fertilidad de suelos (Etchevers y Volke, 1991; Rodríguez, 1993; Salgado *et al.*, 2000b) y de economistas, debido a la creciente necesidad de utilizar más eficientemente los fertilizantes (Volke y Etchevers, 1994; Martínez y Martínez, 1996), al incremento de sus precios y al imperativo de conservar el ambiente (Weier *et al.*, 1996; Salgado *et al.*, 2001a). Uno de los enfoques propuestos se basa en un modelo conceptual que permite estimar la dosis de fertilización requerida por los cultivos. Las bases del modelo indican que para alcanzar un rendimiento en cierta condición agroecológica, se debe satisfacer un balance entre la demanda del nutrimento por el cultivo (DEM) y el suministro que hace de éste el suelo (SUM). Si la demanda de un nutrimento es mayor que el suministro de éste por el suelo, se producirá un déficit que es necesario suplir con fertilización. Cuando la demanda es menor que el suministro, se aplicará una dosis para mantener la fertilidad del suelo y el rendimiento de caña, con base en criterios agronómicos y experiencia regional. La dosis de fertilización (DF) en situaciones de déficit nutrimental estará definida por la demanda, el suministro y por la eficiencia de aprovechamiento del fertilizante por el

cultivo (EF), ya que sólo parte del nutrimento aplicado es aprovechado. El modelo operativo para calcular la dosis de fertilización, se resume en la siguiente ecuación (Rodríguez, 1993):

$$DF = (DEM - SUM) / EF$$

Donde: La demanda del cultivo es la cantidad teórica que éste requerirá para alcanzar el máximo rendimiento posible con cierto grado de probabilidad. Por lo general, se calcula con base en una concentración crítica requerida por el cultivo (requerimiento interno) y, a veces, a 90% de éste y la producción de biomasa asociada a dicho rendimiento.

El suministro del nutrimento por el suelo comprende, por un lado, la capacidad del suelo para suministrar el nutrimento y, por otro, la eficiencia de la planta para absorber el nutrimento disponible. En estos términos, la capacidad del suelo para suministrar nutrimentos depende de los diversos factores que intervienen en la dinámica de los nutrimentos, sean éstos factores del suelo, del clima y del manejo, según el nutrimento de que se trate. Así, para el nitrógeno, el suministro depende de factores de suelo y clima que afectan la mineralización de la materia orgánica del suelo y de los residuos de cosecha del ciclo anterior; para el fósforo, el suministro depende de factores de suelo, como su capacidad de fijación de fósforo, y de manejo, en relación con fertilizaciones previas y su acumulación en los reservorios lábiles y no lábiles. Por su parte, la eficiencia de absorción de la planta depende del tipo de sistema radicular de la planta, en cuanto a su densidad de raíces para el caso de los nutrimentos inmóviles, como el fósforo y el potasio, y la profundidad para el caso de nutrimentos móviles, como el nitrógeno (Rodríguez, 1993). De esta manera, la eficiencia de absorción depende del cultivo según su tipo de sistema radicular, así como de factores de suelo, clima y manejo.

Un índice de suministro de nutrimentos por el suelo, para el fósforo y potasio, lo da el análisis de suelo. Sin embargo, para el nitrógeno, Rodríguez (1993) consideró que el suministro no es adecuadamente medido mediante índices químicos, que más bien es función de los residuos de cosecha y las raíces incorporadas, y del nitrógeno inmovilizado de la fertilización del ciclo anterior, cuando el sistema se encuentra en equilibrio. Otros investigadores han considerado el nitrógeno potencialmente mineralizable (Stanford y Smith, 1972). Para el caso del fósforo, se ha considerado el fósforo determinado

por el método de Olsen, conjuntamente con la eficiencia de absorción del cultivo, según el tipo de sistema radical, y para el caso de potasio, al potasio intercambiable y la capacidad tampón del suelo, y la eficiencia de absorción del cultivo, según el tipo de sistema radical. La eficiencia es la cantidad de nutrimento del fertilizante aplicado al suelo que es aprovechado por la planta y depende de factores como el tipo de cultivo, clase de suelo, la fuente de fertilizante, la época y forma de aplicación.

En la región de la Chontalpa, Tabasco, los rendimientos experimentales del cultivo de la caña de azúcar son del orden de 150, 130 y 110 t ha⁻¹ para el ciclo plantilla, soca y resoca, respectivamente, con el tratamiento de fertilización 160-80-80 en las variedades Méx 69-290 y SP 70-1284 (Salgado *et al.*, 2000a, 2001b). Sin embargo, la metodología de recomendaciones específicas por agrosistemas, utilizada para determinar la dosis óptima económica, requiere de mayor tiempo y recursos económicos (Etchevers y Volke, 1991). Tomando en consideración lo anteriormente expuesto, se realizó el presente trabajo con el objetivo de generar recomendaciones de dosis de fertilización por tipo de suelo a través del modelo conceptual con el fin de hacer más eficiente el programa de fertilización del ingenio Azsuremex de Tenosique, Tabasco.

MATERIALES Y METODOS

El sistema integrado para recomendar dosis de fertilización se aplicó por primera vez en caña de azúcar. La metodología consistió en cinco fases: un estudio de gran visión para clasificar los suelos en el área de abastecimiento del ingenio Azsuremex, ubicado en Tenosique, Tabasco; un muestreo de suelos para caracterizar la fertilidad de las unidades de suelos y calcular el suministro nutrimental; un muestreo de biomasa aérea para determinar el rendimiento potencial y la demanda nutrimental; la generación de las dosis de fertilización a través del modelo conceptual; y la elaboración de recomendaciones sobre el manejo de la fertilización.

Clasificación de los Suelos

Recolección de información. Se realizó una revisión y recolección de información referente a los siguientes temas: mapa de integración de la superficie cañera del ingenio Azsuremex, padrón de productores del ingenio, necesidades y requerimientos de N, P y K

del cultivo de la caña de azúcar, información sobre el manejo agronómico del cultivo de la caña de azúcar, datos meteorológicos, cartografía y fotografías aéreas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

Fotointerpretación. La cartografía de subunidades de suelo se realizó en la primera fase, con base en la fotointerpretación de fotografías aéreas, escala 1:75 000 (INEGI, 1984). Posteriormente, se transfirió la información de las fotografías aéreas al mapa topográfico, escala 1:50 000 (INEGI, 1986).

Definición y caracterización de las unidades de suelo. Una vez realizada la fotointerpretación del área, se procedió a la identificación del tipo de suelo correspondiente a cada unidad cartográfica definida y a la caracterización del suelo por medio de barrenaciones a 1.20 m de profundidad para los suelos ocupados con caña de azúcar, y descripción de perfiles de suelo siguiendo la metodología de Cuanalo (1981). Se describieron cinco perfiles, uno para cada subunidad de suelo. Después se muestreó el suelo para fines de clasificación; para ello, se extrajo una muestra compuesta de suelo de cada horizonte detectado. Las muestras se secaron al aire y a la sombra, se molieron con un mazo de madera y se pasaron a través de un tamiz con malla 2 mm. El análisis correspondiente se realizó de acuerdo con los métodos modificados y adaptados por Etchevers (1988¹). A partir de la descripción de perfiles y del análisis físico y químico, se procedió a la clasificación de los suelos, tomando la referencia del sistema taxonómico de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1994) y también a partir de la carta de los suelos del mundo de FAO-UNESCO (FAO, 1989).

Diagnóstico de la Fertilidad de las Unidades de Suelos

Después de ubicar geográficamente las cinco subunidades de suelos, se procedió a seleccionar las parcelas para el muestreo dentro de cada una de ellas, tomando en consideración la pendiente y la localización de las parcelas. En cada sitio se colectaron con una barrena 20 submuestras, en un recorrido en zig-zag (Salgado *et al.*, 1994) en dos profundidades (0 a 30 y 30 a 60 cm). En total se tomaron 54 muestras compuestas (38 muestras de 0 a 30 y 16 muestras de 30 a 60 cm). Se determinó el

¹ Comunicación personal.

contenido de materia orgánica, P asimilable Olsen y K intercambiable, con los procedimientos adaptados por Etchevers (1988¹).

Muestreo de Biomasa Aérea de Caña de Azúcar

Para determinar el rendimiento esperado y estimar la demanda de nutrimentos por el cultivo de la caña de azúcar, se realizó el muestreo de biomasa aérea a 10 meses de edad del cultivo (etapa de madurez fisiológica), en los sitios representativos donde se describieron los perfiles de suelo. Se colectaron ocho muestras por sitio, la muestra se obtuvo a partir de 1 m lineal, además en dos surcos de 2 m lineales se cuantificó el número de tallos, para corregir el rendimiento de tallos zafrales ($t\ ha^{-1}$) y expresar la demanda de los nutrimentos (en $kg\ ha^{-1}$). El sitio de la muestra se ubicó a 4 m de la orilla de la parcela. Después de pesar la muestra, se seleccionaron al azar cuatro tallos de caña y se molieron en una picadora, tipo Chetumal; el material se homogeneizó y se tomó una muestra de 1 kg aproximadamente, la cual se procedió a secar en estufa a 70 °C hasta alcanzar peso constante. El porcentaje de humedad cuantificado fue de 75%, sirvió de base para determinar la producción de materia seca (MS). El análisis nutrimental de N, P y K se realizó después de moler las muestras en el molino Wiley a través de una malla de 2 mm, con los métodos adaptados por Etchevers (1988¹).

Cálculo de las Dosis de Fertilización

Para generar las dosis de fertilización de N, P y K por unidad de suelo, se procedió a calcular los parámetros del modelo conceptual $DF = (DEM - SUM) / EF$, de la siguiente manera (Rodríguez, 1993):

Demanda. Para determinar la demanda de N, P y K, la materia seca (MS) del cultivo de caña incluyó la biomasa aérea de hojas y tallos. La ecuación es:

$$DEM (kg\ ha^{-1}) = MS (kg\ ha^{-1}) * (\% \text{ Nutrimento planta}/100)$$

Suministro. A continuación se describen las fórmulas para el cálculo del suministro.

En el caso del nitrógeno, se consideró que únicamente 4% de la demanda de este elemento se incorpora al suelo a través de la desintegración de las hojas y las raíces (Hernández *et al.*, 1995); el resto se pierde en el

campo con la quema de residuos y el transporte de los tallos al molino.

$$SUM-N = (DEM-N * 0.04) + NDS$$

Donde: NDS = nitrógeno derivado del suelo, estimado en $50\ kg\ ha^{-1}$, de acuerdo con el rendimiento de caña de azúcar obtenido sin fertilización (Salgado *et al.*, 2000b).

$$SUM-P = [P\ suelo (mg\ kg^{-1}) * Ec] + [(M.S.R) * (\%P\ foliar/100)]$$

$$SUM-K = [K\ suelo (mg\ kg^{-1}) * CK] + [(M.S.R) * (\%K\ foliar/100)]$$

Donde: el índice de eficiencia del cultivo (Ec) indica que por $1\ mg\ kg^{-1}$ de P Olsen, el cultivo absorbe $1.7\ kg$ de P del suelo para el caso de las gramíneas (Rodríguez, 1993). La eficiencia de absorción de potasio (CK) indica que por $1\ mg\ kg^{-1}$ de K intercambiable, el cultivo absorbe $1.4\ kg$ de K para suelos francos y $1.3\ kg$ de K para suelos arcillosos (Rodríguez, 1993). Para el cálculo del suministro del fósforo y potasio, la materia seca de residuos (MSR) incluyó 9% de la biomasa aérea más la MS de paja, ya que se considera que estos nutrimentos se incorporan al suelo con la quema.

Eficiencia (EF). Para el nitrógeno, la eficiencia utilizada fue de 50% (García, 1984), aunque resultados reportados por Salgado *et al.* (2001a) indican que corresponde a 18%. Para el caso del fósforo, la eficiencia varía dependiendo del tipo de suelo, así para el Luvisol es de 20 %, para el Cambisol es de 38%, para el Fluvisol y Vertisol es de 40% y para el Leptosol es de 42%. Por último, para el potasio, la eficiencia estimada es de 50 y 40% para suelos francos y arcillosos, respectivamente, con cultivo de gramíneas (Rodríguez, 1993).

RESULTADOS Y DISCUSION

Area de Abastecimiento del Ingenio Azsuremex

Se localiza entre las coordenadas $17^{\circ} 23'$ y $17^{\circ} 36' N$ y $91^{\circ} 15'$ y $91^{\circ} 37' O$. La zona de abastecimiento abarca $3731\ ha$ y se distribuye principalmente al norte y al este de la fábrica, a una distancia máxima de $15\ km$ (Figura 1). La vegetación natural, de la cual sólo quedan relictos en la mayor parte del área, está constituida por selva alta

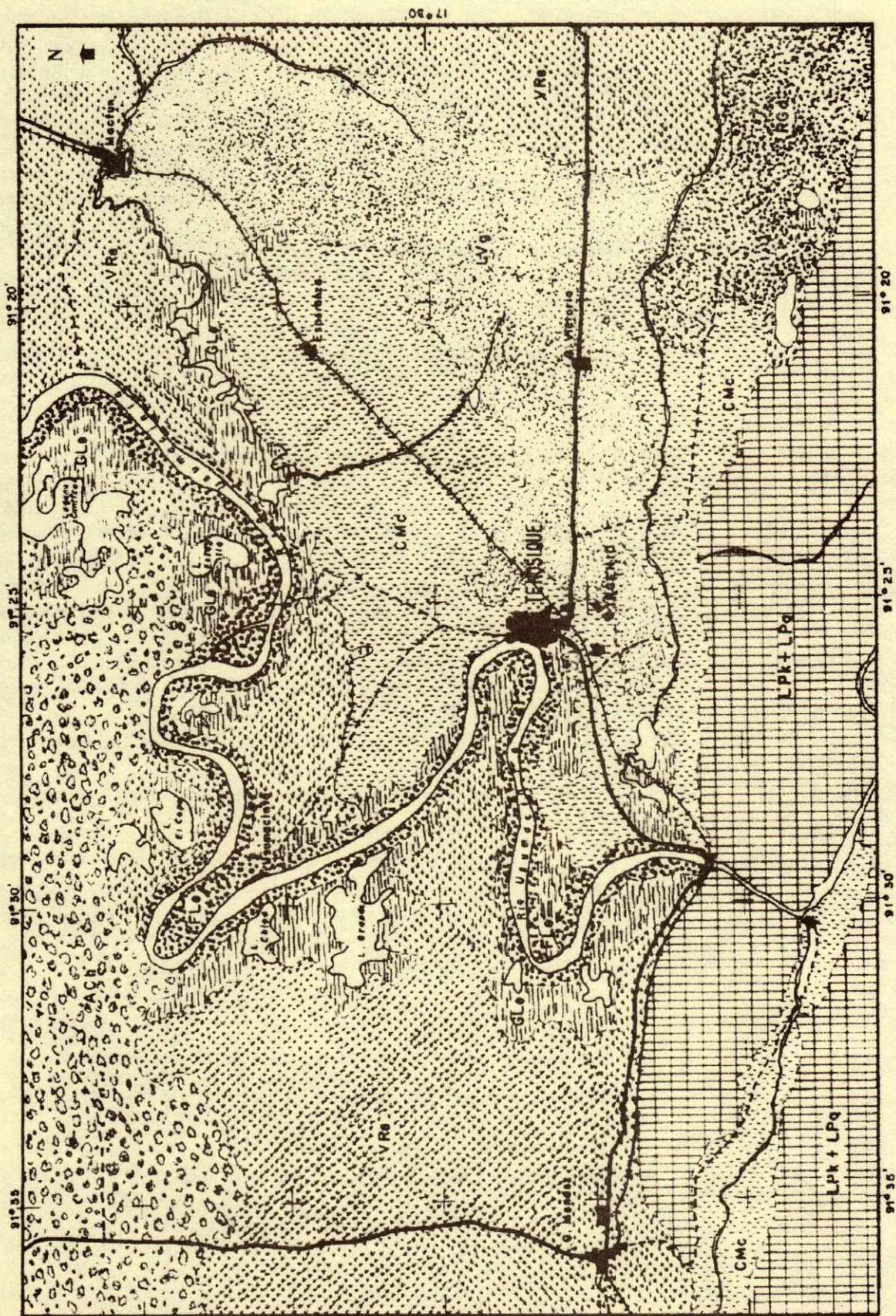


Figura 1. Mapa de las subunidades de suelos del ingenio Azsuremex. Tenosique, Tabasco. Fluvisol molli-éútrico (Fl), Vertisol éútrico (Ve), Cambisol eútri-calcarico (Cme), Luvisol hapli-gléyico (LVg) y Leptosol réndzico+leptosol lítico (LPk+LPq).

perennifolia de canshán, selva alta subperennifolia de ramón y selva mediana subperennifolia de chicozapote y pukté (López, 1980). Desde el punto de vista fisiográfico, existen tres topofomas en la zona de abasto: planicie o llanura aluvial, barrotes de río y lomeríos (INEGI, 1981). La geología de esta zona se constituye, principalmente, por areniscas sedimentarias del Terciario, menos importantes son las áreas con predominancia de calizas del Terciario y rocas sedimentarias del Cuaternario. El clima es cálido húmedo con las siguientes características: la precipitación anual se encuentra en el intervalo óptimo (1750 a 3250 mm) para satisfacer los requerimientos hídricos de la caña de azúcar, existe un período crítico (déficit de humedad en el suelo) a partir de mediados de febrero y termina a finales de mayo, lo que coincide con el período de zafra, y la temperatura media anual es de 26 °C, por lo que las condiciones para el cultivo de la caña son óptimas (Humbert, 1974).

Descripción de las Subunidades de Suelos

La distribución y superficie de las subunidades de suelos en el área de estudio se presentan en la Figura 1. Debido a que el principal objetivo de este trabajo fue estudiar la fertilidad de los suelos cultivados con caña de azúcar, no todos los suelos presentados en el mapa son descritos, tal es el caso del Acrisol háplico, Gleysol éútrico, Leptosol lítico y Regosol éútrico. Por otro lado, la escala y categoría del estudio (gran visión) no permite describir todos los tipos de suelos, es necesario aclarar que el mapa de las subunidades de suelos se refiere a la subunidad dominante, aceptando una variación y mezcla de las mismas (Palma y Cisneros, 1996).

Se identificaron nueve subunidades de suelos, de las cuales existen cinco cultivadas con caña de azúcar, tres se agrupan en los suelos de poco o nulo desarrollo del perfil: Fluvisol molli-éútrico, Vertisol éútrico y Leptosol réndzico; las otras dos subunidades corresponden a suelos con moderado a fuerte desarrollo del perfil: Cambisol eutri-calcárico y Luvisol hapli-gléyico. La superficie ocupada así como la clasificación taxonómica de las cinco subunidades se reportan en el Cuadro 1.

Fluvisol molli-éútrico. Son suelos de texturas medias ubicados paralelamente a los cauces de los ríos, se originan a partir de aluviones antiguos, poseen colores pardos. Estos suelos no presentan problemas mayores para el cultivo de caña, salvo que se esperan deficiencias de nitrógeno, fósforo y potasio (Cuadro 2).

Vertisol éútrico. Son suelos originados por aluviones y tienen texturas finas, al menos en el primer metro de profundidad, así como agrietamiento pronunciado en la época de secas. Poseen coloración pardusca, se localizan en las llanuras de inundación cercanas a los cauces de los ríos y arroyos. Estos suelos tienen una permeabilidad moderadamente lenta, manifiestan problemas de encharcamiento y dificultan la labranza en la época de lluvias. Se esperan deficiencias de nitrógeno y potasio en el cultivo de la caña de azúcar (Cuadro 2).

Cambisol eutri-calcárico. Se localizan sobre lomeríos de poca altitud, se originan a partir de rocas calizas y areniscas. Poseen colores amarillentos o anaranjados (rasgos de oxidación) y texturas medias. Estos suelos presentan riesgos latentes de erosión hídrica si están descubiertos en la época de lluvias. El pH del suelo es alcalino, contiene carbonatos solubles.

Cuadro 1. Clasificación de los suelos del área de abastecimiento del ingenio Azsuremex. Tenosique, Tabasco.

Subunidad de suelo (FAO, 1989)	Familia de suelo (Soil Survey Staff, 1994)	Superficie ha	Porcentaje del total
Fluvisol molli-éútrico	Tropofluent típico; francoso fino, mezclado, isohipertérmico, no ácido	3,617	4.9
Vertisol éútrico	Hapludert crómico; arcilloso fino, mezclado, isohipertérmico	27,390	36.9
Cambisol eutri-calcárico	Eutropept fluvéntico; francoso fino, mezclado, calcáreo, isohipertérmico	15,693	21.1
Luvisol hapli-gléyico	Hapludalf ácuico; arcilloso fino, mezclado, isohipertérmico	12,360	16.7
Leptosol réndzico + Leptosol lítico	Rendoll lítico; francoso fino, mezclado, isohipertérmico	15,138	20.4
Otros suelos		4,601	24.9

Cuadro 2. Características físicas y químicas de los perfiles representativos de las unidades de suelos del ingenio Azsuremex. Tenosique, Tabasco.

Perfil	Arena	Limo	Arcilla	Textura	pH	MO	Nt	Relación C/N	K	Mg	Ca	CIC	P-Olsen
	-----%					--- % ---			--- cmol (+) kg ⁻¹ de suelo ---				mg kg ⁻¹
Fluvisol													
Ap	57	12	31	M Ar A [†]	7.4	4.30	0.21	11.8	0.30	6.2	17.6	27.0	2.6
Ac	67	13	20	M A	8.0	1.09	0.04	15.8	0.15	4.6	18.7	17.1	2.6
C	58	24	18	M A	8.6	0.63	0.03	12.8	0.11	5.9	38.3	16.3	4.1
IIIc	58	12	30	M Ar A	8.6	0.57	0.03	11.0	0.18	8.7	21.7	19.9	0.7
Vertisol													
Ap	50	13	37	Ar A	7.4	3.13	0.15	12.1	0.26	13.0	27.7	42.0	13.2
C1	49	15	36	Ar A	5.5	0.94	0.05	10.9	0.18	13.9	37.8	51.9	2.6
C2	56	24	20	M A	8.5	0.47	0.04	6.8	0.08	7.3	27.6	35.0	0.7
Cambisol													
Ap	54	17	29	M Ar A	8.2	4.85	0.23	12.2	0.21	1.1	48.3	49.6	7.7
Bw	51	21	28	M Ar A	8.4	1.57	0.07	13.0	0.10	1.2	51.9	53.1	1.8
Ci	49	26	25	M Ar A	8.5	0.63	0.02	18.2	0.08	0.5	47.9	48.4	0.9
C2	50	25	25	M Ar A	8.4	0.26	0.01	15.0	0.08	0.4	46.7	42.3	2.7
Luvisol													
Ap	60	8	32	Ar A	6.7	3.60	0.16	13.0	0.18	20.8	32.3	52.9	0.9
Btg1	58	3	39	Ar A	5.6	1.09	0.03	21.0	0.13	29.3	39.0	65.1	3.0
Btg2	59	2	39	Ar A	4.7	0.52	0.01	30.1	0.12	31.5	40.2	67.1	5.8
Cr	60	0	40	Ar A	7.0	0.10	0.0	58.0	0.05	34.3	43.6	70.7	2.7
Leptosol													
Ap	57	15	28	M Ar A	8.2	6.72	0.31	12.5	0.21	2.1	54.0	56.3	9.5
C/R	52	22	26	M Ar A	8.4	1.88	0.09	12.1	0.05	0.8	43.3	44.2	1.4

[†] M Ar A = migajón arcillo arenosa, M A = migajón arenosa, Ar A = arcillo arenosa.

Se esperan deficiencias de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, hierro y zinc (Cuadro 2).

Luvisol hapli-gléyico. Estos suelos se localizan en sitios semejantes a la subunidad anterior, son suelos más desarrollados, con texturas finas, colores amarillentos y grisáceos y el pH es ácido. Los problemas de permeabilidad lenta son importantes en estos suelos, además éstos presentan riesgos de erosión moderada y deficiencias de nitrógeno, fósforo y potasio (Cuadro 2).

Leptosol réndzico. Estos suelos se ubican en los cerros de baja altitud, al sur del área de estudio, se caracterizan por desarrollarse a partir de rocas calizas del terciario y tener profundidades no mayores que 60 cm antes de que aparezca el estrato rocoso. Los colores son oscuros, la textura media y su consistencia es muy friable. Estos suelos presentan problemas moderados de labranza (pedregosidad) y pH alcalino que conduce a deficiencias de micronutrientes. En cuanto al nitrógeno, fósforo y potasio, éstos se encuentran en cantidades medianamente bajas (Cuadro 2).

Determinación de la Dosis de Fertilización

En general, la utilización del modelo conceptual para estimar dosis de fertilización resultó sencilla, ya que es capaz de describir el esquema nutrimental de los cultivos en su totalidad con un mínimo de postulados.

Estimación de la demanda. En el Cuadro 3, se presenta el rendimiento de la biomasa aérea, seguido de su desviación estándar. Para estimar la demanda del cultivo de la caña de azúcar, se consideró el rendimiento promedio de la biomasa aérea (Cuadro 3). Se observa que las unidades Fluvisol, Luvisol y Leptosol producen los mayores rendimientos de biomasa aérea, los cuales tienen diferentes relaciones hoja/tallo, lo que repercute en el rendimiento de campo a 10 meses de edad (Cuadro 4). Además, los mayores rendimientos de caña de azúcar se asociaron con la potencialidad de los suelos. En el Cuadro 5 se presentan las concentraciones nutrimentales de la biomasa aérea, los cuales se encuentran dentro de la amplitud establecida para caña de 10 a 13 meses de edad (Jones *et al.*, 1991).

Cuadro 3. Rendimiento de biomasa aérea y de caña de azúcar (peso fresco), en las unidades de suelo del área del ingenio Azsuremex. Tenosique, Tabasco.

Unidad de suelo	Variedad	Tallo			Biomasa	Rendimiento de caña [†]
		Número	Peso			
			T+H	T-H		
		m lineal	kg			t ha ⁻¹
Fluvisol	Méx 57-453	20.3±2.0	1.080±0.15	0.60±0.08	174± 45	97±24
Vertisol	Méx 68-P-23	15.5±1.0	1.090±0.11	0.76±0.06	134± 24	94±14
Cambisol	Méx 68-P-23	17.4±1.5	0.910±0.10	0.51±0.06	126± 26	71±15
Luvisol	Méx 68-P-23	15.5±1.3	1.504±0.16	0.75±0.06	185± 38	92±16
Leptosol	Méx 68-P-23	16.4±1.2	1.456±0.13	0.94±0.09	190± 32	123±21

[†]R = [(No. T * Peso promedio de T) * 7.962]/1000.

T = tallo, H = hoja.

Cuadro 4. Rendimiento de materia seca (MS) para estimar la demanda y el suministro de NPK ingenio Azsuremex. Tenosique, Tabasco.

Unidad de suelo	MS de biomasa (tallo+paja)	MS de tallo	MS de paja
Fluvisol	47.96±6.8	26.65±6.0	21.31±3.3
Vertisol	36.88±2.6	25.71±3.5	11.17±1.3
Cambisol	34.62±3.4	19.42±3.7	15.21±1.3
Luvisol	46.25±9.3	23.00±4.0	23.25±5.5
Leptosol	47.50±8.0	30.75±5.2	16.75±2.7

Con los datos promedio de materia seca y las concentraciones de N, P y K de la biomasa aérea, se calculó la demanda (Cuadro 6). Se observa que la variedad Méx 57-453, cultivada en el Fluvisol, y la variedad Méx 68-P-23, cultivada en el resto de los suelos, demandaron diferentes cantidades de nutrimentos, lo anterior concuerda con lo reportado por Salgado *et al.* (2001b), quienes encontraron los siguientes valores: nitrógeno de 1.07 a 1.78 kg, fósforo de 0.4 a 1.14 kg P₂O₅ y potasio de 2.1 a 4.95 kg de K₂O por tonelada de caña producida. El orden de requerimiento es: potasio, nitrógeno y fósforo, lo que coincide con lo reportado por Humbert (1974).

Cuadro 5. Concentración nutrimental de la caña de azúcar (tallos + paja) en las diferentes unidades de suelo del ingenio Azsuremex. Tenosique, Tabasco.

Concentración nutrimental	Unidades de suelo				
	Fluvisol Méx 57-453	Vertisol Méx 68-P-23	Cambisol Méx 68-P-23	Luvisol Méx 68-P-23	Leptosol Méx 68-P-23
%					
N	0.31±0.03	0.19±0.08	0.37±0.04	0.28±0.03	0.27±0.04
P	0.09±0.01	0.09±0.01	0.11±0.01	0.09±0.02	0.11±0.01
K	0.75±0.07	0.80±0.06	0.80±0.09	0.66±0.04	0.48±0.06

Se obtuvo una demanda de potasio para el cultivo de la caña de azúcar mayor que 249 kg ha⁻¹, lo que implica que la dosis de fertilización 120-60-60, usada en la actualidad por el ingenio, no satisface las demandas del cultivo, por lo que éste tiene que tomar el K de las reservas del suelo (Jafri, 1987; Salgado *et al.*, 2000a). Al respecto, Cortés *et al.* (1987) reportaron que a cinco años de cultivarse caña de azúcar en un Vertisol, el suelo presentó una reducción en el contenido nutrimental y la densidad aparente se incrementó de 1.0 a 1.31 g cm⁻³, lo que redujo el espacio poroso dificultando el crecimiento radical; a nueve años de cultivo, el Vertisol presentó una pequeña recuperación en el contenido nutrimental y esta tendencia se mantuvo hasta 13 años. Lo anterior indica la capacidad del suelo para restablecer sus propiedades químicas, lo cual demuestra que el monocultivo de caña no es tan perjudicial en los Vertisoles. Sin embargo, las propiedades físicas sufren modificaciones que pueden restablecerse con el subsuelo profundo, al reemplazar las plantaciones viejas, lo que ocurre cada siete años.

Estimación del suministro. El suministro representa la cantidad de nutrimentos que el suelo es capaz de proveer al cultivo durante su desarrollo más la que se incorporó al suelo por la quema de los residuos de caña (Cuadro 6). El suministro de nitrógeno es bajo,

Cuadro 6. Demanda, suministro y balance de NPK en las diferentes unidades de suelos en el ingenio Azsuremex. Tenosique, Tabasco.

Unidad de suelo	Demanda del cultivo			Suministro del suelo			Balance (D-S)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	----- kg ha ⁻¹ -----								
Fluvisol	149	99	464	56	92	473	93	7	-9
Vertisol	70	76	381	53	78	339	17	-2 [†]	42
Cambisol	97	87	357	54	73	340	43	14	17
Luvisol	171	95	394	57	79	332	114	16	62
Leptosol	128	120	294	55	101	271	73	19	23

[†] Valores con signo negativo indican que el suelo puede satisfacer la demanda del cultivo de P y K.

debido a que la mayor parte de este elemento se pierde durante la quema (Hernández *et al.*, 1995), no obstante que la relación C/N de estos suelos indica que ocurre el proceso de mineralización (Cuadro 7), pero la liberación de nitrógeno es insuficiente para satisfacer las demandas del cultivo. Para el caso del fósforo, el suministro casi es suficiente en la mayoría de los suelos estudiados. Esto se debe, principalmente, al reciclaje del fósforo por la quema de residuos, la poca movilidad de este elemento en el suelo y las aplicaciones anuales a través de la fertilización. Sin embargo, es recomendable que las aplicaciones de fertilizante fosforado se realicen en banda para evitar la inmovilización por los carbonatos solubles en suelos con pH alcalinos, y por el hierro y aluminio en suelos de pH ácido (Cuadro 7). Ortega (1979) estudió la distribución de raíces de la caña en el suelo y encontró que, a medida que se incrementa la dosis de fósforo (150 kg ha⁻¹), el crecimiento del sistema radicular es de 70% en los primeros 20 cm de profundidad, con una mejor distribución en el suelo y el contenido de fósforo se mantiene alrededor de

20 mg kg⁻¹ hasta 30 cm de profundidad; lo que demuestra la necesidad de mantener valores óptimos de este nutrimento en el suelo para incrementar el crecimiento de la caña. El suministro de potasio en la unidad Fluvisol indicó que este suelo logró abastecer la demanda del cultivo de caña, a pesar de que la concentración de este elemento se clasificó como media (Cuadro 7); lo anterior se atribuye al proceso de incorporación del K durante la quema y a la aplicación continua de triple 17.

Balance nutrimental. A partir de las determinaciones de la demanda y el suministro (Cuadro 6), se estableció el balance nutricional del modelo conceptual (Rodríguez, 1993). Se obtuvo un déficit en todos los casos para nitrógeno y en cuatro sitios para fósforo y potasio (Cuadro 6). Los déficits difieren entre sí, lo que refleja la variabilidad del contenido nutrimental de los suelos, la variación en rendimiento y el historial de manejo de cada sitio (Cuadro 7). Estos valores pueden parecer poco realistas si se considera el potencial máximo de producción de los sitios, tal es el caso del Luvisol donde el déficit

Cuadro 7. Concentraciones promedio de N, P y K de las unidades de suelo utilizadas para calcular el suministro en el ingenio Azsuremex. Tenosique, Tabasco.

Unidad de suelo	Profundidad	MO	Nt	Relación C/N	P Olsen	K	pH
	cm	----- % -----	-----		----- mg kg ⁻¹ -----	-----	
Fluvisol	0 a 30	2.56±0.84	0.13±0.02	11	10.0±4.8	125±11.7	7.6±0.14
	30 a 60	1.90±0.43	-		3.8±3.5	86±23.4	-
Vertisol	0 a 30	1.76±0.49	0.09±0.01	11	12.4±5.1	113±27.3	6.1±0.12
	30 a 60	1.57±0.21	-		9.4±2.4	98±15.6	-
Cambisol	0 a 30	2.22±0.59	-	-	6.9±2.5	90±11.7	6.3±0.10
	30 a 60	1.33±0.04	-		0.8±0.2	51±7.8	-
Luvisol	0 a 30	1.95±0.38	0.11±0.02	10	5.7±3.2	59±7.8	4.5±0.60
	30 a 60	2.13±0.45	-		1.4±1.1	70±11.7	-
Leptosol	0 a 30	2.26±0.80	0.17±0.02	7	12.4±4.2	78±19.5	8.2±0.15
	30 a 60	3.20±0.65	-		1.4±1.0	70±15.6	-

Cuadro 8. Dosis de fertilización por unidad de suelo ingenio Azsuremex. Tenosique, Tabasco.

Unidad de suelo	Dosis de fertilización		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	- - - - kg ha ⁻¹ - - - -		
Fluvisol	186	18	0
Vertisol	34	0	105
Cambisol	86	37	42
Luvisol	228	80	155
Leptosol	146	45	46

calculado de N y K resulta evidentemente sobrestimado; esto posiblemente se debió al exceso de humedad en el suelo, que ocasionó que el cultivo modificara su relación tallo/hoja (0.5 aproximadamente), demandando una mayor cantidad de NPK, ya que se ha demostrado que, en condiciones normales de humedad en el suelo, la caña produce 30% de hojas y 70% de tallos molederos aproximadamente (Salgado *et al.*, 2001b). Otra posible causa puede ser algún error de tipo experimental en el momento del muestreo, por lo que estos valores se consideran como aislados dentro del área de interés. En el Fluvisol, se observa que con este método no se recomendaría la aplicación de potasio, no obstante que estos suelos presentaron valores deficitarios de este elemento de acuerdo con los estándares de Etchevers (1988¹). Esto pone de manifiesto que es necesario contar con estudios de suministro nutrimental que permitan utilizar con mayor precisión el modelo conceptual.

Dosis de fertilización. Las dosis de fertilización para el cultivo de caña se calcularon tomando en consideración las eficiencias reportadas (Cuadro 8). Debido a que las recomendaciones de fertilización no fueron del todo satisfactorias por los problemas descritos en la sección del balance nutrimental, para dar una respuesta a los productores del ingenio Azsuremex, se optó por ajustar las recomendaciones

de fertilización (Cuadro 9), de acuerdo con las experiencias obtenidas en varios años con ensayos de fertilización en suelos similares (Salgado *et al.*, 2000a); estas experiencias indican que la caña de azúcar produce rendimientos superiores a 150 t ha⁻¹, con dosis de 160 a 180 kg ha⁻¹ de N. Para el caso del fósforo y potasio, las dosis fluctúan de 60 a 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y K₂O, respectivamente; y el diferencial de suministro de N, P y K de cada tipo de suelo (Palma y Cisneros, 1996).

Cuando se analizan las dosis de fertilización, se observa que existe una relación muy estrecha con la potencialidad de los suelos. En los casos donde el método no recomienda la aplicación, se optó por una dosis para mantener la fertilidad del suelo, evitando que, a largo plazo, existan desbalances nutrimentales difíciles de corregir, que repercutirían finalmente en el rendimiento del cultivo de caña de azúcar. En el Cuadro 9, se indican las fuentes y la cantidad de fertilizante comercial que se debe aplicar. Se sugiere el empleo de supernitrato para el Fluvisol y el Leptosol, por la reacción ácida de este fertilizante; además de que contiene azufre (33.5-0-0-10 de N-P-K-S). La fertilización debe realizarse en forma mecanizada, después del primer cultivo para plantillas y socas (Salgado *et al.*, 2001b). La eficiencia de aprovechamiento del fertilizante es 18% mayor en comparación con la aplicación manual, pues el fertilizante se deposita a 15 cm de profundidad favoreciendo el enraizamiento profundo. En caso de que la aplicación sea manual, ésta debe efectuarse un día antes del aporque para que con esta labor se cubra el fertilizante.

RECOMENDACIONES

Para alcanzar el rendimiento esperado con base en la fertilización recomendada, es necesario que el resto de las labores de cultivo se realicen en tiempo y

Cuadro 9. Recomendaciones de dosis y fuentes de fertilizantes por unidad de suelo con base en el rendimiento esperado de caña en el ingenio Azsuremex. Tenosique, Tabasco.

Unidad de suelo	Rendimiento esperado t ha ⁻¹	Dosis de fertilización			Fuentes de fertilizantes				
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Recomendación 1		Recomendación 2		
		- - - - kg ha ⁻¹ - - - -			20-10-10 + S. Nitrato		17-17-17 + S.Urea o S. Nitrato		
					- - - - - kg ha ⁻¹ - - - - -				
Fluvisol	120	160	60	60	600	123	353	-	308
Vertisol	100	120	80	80	-	-	471	92	-
Cambisol	80	120	60	60	600	-	353	138	-
Luvisol	100	140	80	80	-	-	471	138	-
Leptosol	120	160	80	80	800	-	471	-	247

con eficiencia, para lo cual se dan algunos señalamientos:

Resiembra. Durante el recorrido de campo se detectó que los predios cañeros, en general, presentaban una reducción de 25% aproximadamente de población. Esto debe atenderse a la brevedad posible mediante un programa de resiembras, pues los efectos de la baja densidad de población repercuten en la disminución del rendimiento de campo, favorecen la incidencia de malezas y la pérdida de dinero por la ejecución de las labores de cultivo en 25% del espacio que está vacío.

Drenaje. Para las subunidades Vertisol y Luvisol que presentan texturas arcillosas, debe implementarse un programa de drenaje superficial que disminuya el riesgo de encharcamiento en la época de lluvias; lo anterior permitirá que el cultivo de caña aproveche mejor el fertilizante.

Variedades. Por seguridad no es recomendable que una variedad ocupe más de 60% de la superficie total cultivada, por lo que debe implementarse un programa de introducción de nuevas variedades con instituciones involucradas en el mejoramiento genético de la caña de azúcar, para que, a mediano y largo plazo, se cuente con un grupo de variedades, de tal forma que los efectos de plagas y enfermedades se vea disminuido por la diversidad genética.

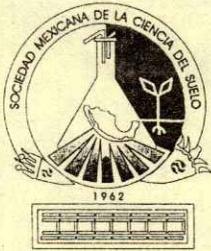
CONCLUSIONES

Se determinaron cinco unidades de suelos en el área de abastecimiento del ingenio Tenosique. A través del modelo conceptual no fue posible llegar a generar las dosis de fertilización para cada tipo de suelo. Los resultados mostraron que aún quedan dudas en los parámetros a utilizar para la estimación del suministro de los nutrimentos del suelo, sobre todo en lo que respecta a los aportes de los restos de cultivo para la temporada siguiente; esto es aún más evidente si se trata de estimar los aportes después de la quema de los residuos de cosecha. Con respecto a la demanda, hacen falta estudios más puntuales sobre las variedades de caña de azúcar. Las dosis de fertilización obtenidas con el modelo conceptual debieron ser ajustadas para generar una recomendación viable para la fertilización de la caña de azúcar en el ingenio Azsuremex.

LITERATURA CITADA

- CNIAA. 2000. Desarrollo operativo campo-fábrica 1993/1998. Comité de la Agroindustria Azucarera. CNIAA. <http://www.sagar.gob.mx/users/coazucar> (abril 2000).
- Cortés L., T., I. Pacheco H. y J.R. Ramírez V. 1987. Efecto del uso continuo con caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) sobre algunas variables importantes en un Vertisol, en la Chontalpa, Tabasco, México. p. 114. In: A. Aguilar S. y J.D. Etchevers B. (eds.). Memorias del XX Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Zacatecas, México.
- Cuanalo de la C., H. 1981. Manual de descripción de perfiles de suelo en el campo. 2a. ed. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Etchevers B., J.D. y V. Volke H. 1991. Generación de tecnologías mejoradas para pequeños productores. Serie Cuadernos de Edafología 17. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- FAO. 1989. Carte mondiale des sols, Légende révisée. Rapport sur les ressources en sols du monde 60. FAO-UNESCO. Rome, Italie.
- García E., A. 1984. Manual de campo en caña de azúcar. Serie Divulgación Técnica. Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar. Libro 24. México, DF.
- Hernández, I., E. Medina y D. López H. 1995. Respiración edáfica y aportes de materia orgánica por las raíces y la hojarasca en un cultivo de caña de azúcar. Agronomía Tropical 45: 121-142.
- Humbert, R.P. 1974. El cultivo de la caña de azúcar. Continental. México, DF.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1981. Carta fisiográfica. Villahermosa, Tabasco. Escala 1: 1000 000.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1984. Fotografías aéreas, blanco y negro Tenosique y del Estado de Tabasco. México. Escala 1:75 000.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1986. Cartas topográficas, Tenosique y del Estado de Tabasco. México. Escala 1:50 000.
- Jafri, S.M.H. 1987. Effect of potassium with nitrogen and phosphorus on sugarcane in plant-ratoon cropping sequence in alluvial soil. J. Indian Soc. Soil Sci. 35: 667-671.
- Jones, B.J., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook. Micro-Macro Publishing. Athens, GA.
- López M., R. 1980. Tipos de vegetación y su distribución en el estado de Tabasco y norte de Chiapas. Centro Regional Puyucatengo, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Martínez G., A. y M.A. Martínez D. 1996. Diseño de experimentos con fertilizantes. Publicación especial 5. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Ortega, E. 1979. Características del fósforo como elemento mineral esencial en la nutrición de la caña de azúcar. Tesis candidato a doctor en ciencias. Universidad de la Habana, Cuba.

- Palma, L., D.J. y J. Cisneros D. 1996. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Vol. 1. Fundación Produce Tabasco, A.C. Villahermosa, Tabasco, México.
- Rodríguez S., J. 1993. La fertilización de los cultivos: Un método racional. Colección en Agricultura. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. ANAGRA, S.A.
- Salgado G., S., A. Trujillo N. y R. Torres R. 1994. Manual para muestreo de suelos de uso agrícola y ganadero en el estado de Tabasco. Campus Tabasco-Instituto de Recursos Genéticos y Productividad-Colegio de Postgraduados. H. Cárdenas, Tabasco, México.
- Salgado G., S., R. Núñez E., J.J. Peña C., J.D. Etchevers B., D.J. Palma L. y M.R. Soto H. 2000a. Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* 34: 689-698.
- Salgado G., S., D.J. Palma L., R. Núñez E., L.C. Lagunes E. y H. Debernardi de la V. 2000b. Manejo de fertilizantes y abonos orgánicos. ISBN 968-839-281-2. Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados-Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.
- Salgado G., S., R. Núñez E., J.J. Peña C., J.D. Etchevers B., D.J. Palma L. y M.R. Soto H. 2001a. Eficiencia de recuperación de nitrógeno fertilizante en soca de caña de azúcar sometidas a diferentes manejos de fertilización. *Terra* 19: 155-162.
- Salgado G., S., L. Bucio A., D. Riestra D. y Luz del C. Lagunes E. 2001b. Caña de azúcar: Hacia un manejo sustentable. ISBN 968-839-331-2. Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados-Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.
- Soil Survey Staff. 1994. Keys to soil taxonomy. 6th ed. US Department of Agriculture-Soil Conservation Service. Washington, DC.
- Stanford, G. y S.J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 465-472.
- Volke H., V. y J.D. Etchevers B. 1994. Recomendaciones de fertilización para cultivos necesidades y perspectivas de una mayor precisión. Cuaderno de Edafología 21. Instituto de Recursos Naturales, Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Weier, K.C., C.W. McEwan., I. Vallis., V.R., Catchoole y R.J. Myers. 1996. Potential for biological denitrification of fertilizer nitrogen in sugarcane soils. *Aust. J. Agric. Res.* 47: 67-79.



SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO, A.C.

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos;
km 38.5 Carr. México -Texcoco; Tel: 01 595 95 460 24; Fax01 595 95 480 76
(correo ordinario: Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Méx.)

FORMA DE SUSCRIPCION A LA REVISTA TERRA

La revista Terra es publicada trimestralmente. Todas las suscripciones son anuales e incluyen un volumen con cuatro números. El costo de la suscripción es de \$ 500.00 en el país y \$ 60.00 Dls. en el extranjero (incluye costos de envío en ambos casos).

Enviar suscripción a:

Nombre: _____

Empresa: _____

Dirección: _____

Colonia: _____

Código Postal: _____

Ciudad: _____

Estado: _____

País: _____

e-mail: _____

Teléfono: _____

Fax: _____

Usted podrá depositar el monto de la suscripción en una cuenta bancaria que describimos en la parte inferior de esta forma.

**HOY ES EL MEJOR MOMENTO PARA APOYAR FINANCIERAMENTE A LA REVISTA TERRA
! SUSCRÍBETE !**

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
Cuenta044 657115
Bancomer Número de Plaza 010
Sucursal 3441 Texcoco, Estado de México.

Esta Publicación consta de
1000 Ejemplares se imprimió el mes
de Agosto del 2002 en los talleres de:

Publicaciones Diamante
Av. Hidalgo No. 46, esq. Galeana
San Vicente Chicoloapan, Edo. de México
Tels. 01 (595) 92 1-56-02 y 92 1-65-08