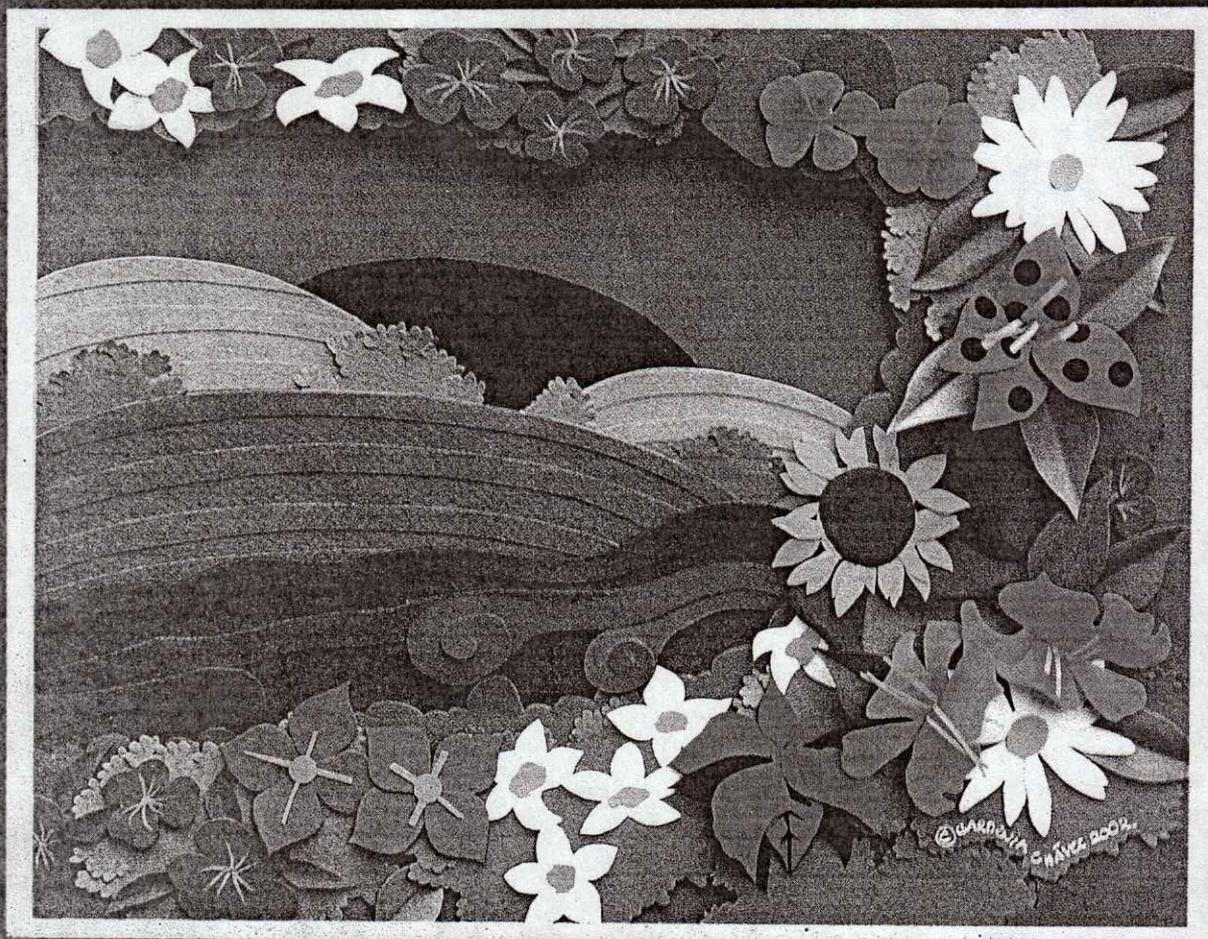


ISSN 0187-5779

TERRA

ABRIL - JUNIO DE 2003 • VOLUMEN 21 • NUMERO 2



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

TERRA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 2003-2005

Presidente

Vicepresidente

Secretario General

Tesorero

Secretario Técnico

Secretaria de Relaciones Internacionales

Vocales

Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez

Dr. José A. Cueto Wong

Ing. Andrés Espinosa Carmona

Dr. Javier Z. Castellanos Ramos

Dr. Enrique Salazar Sosa

Dr. Rogelio Juárez González

Dr. Ernesto Frías Ramírez

Dra. Christina Siebe Grabach

M.C. Jesús P. Amado Alvarez

Dr. Juan Pedro Flores Marges

Dra. Claudia Hidalgo Moreno

Dr. David Cristobal Acevedo

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 Cabriaes

Dra. Edna Alvarez Sánchez

Dr. Mateo Vargas Hernández

Dra. Carmen Gutiérrez Castorena

Dr. David Espinosa Victoria

M.C. Jorge Alvarado López

M.C. Langen Corlay Chee

Ina Aalmers de Aguilar

Diane Fumiko Miyoshi Udo

EDITORES DE ESTILO

EDITORA DE ESTILO

EN INGLES

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.
Abril - Junio de 2003 Volumen 21 Número 2

ISSN 0187 - 5779

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

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

Teléfono y Fax +01(595) 952 17 21

e-mail: terra@correo.chapingo.mx

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

Diseño de portada

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

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

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

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

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

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

President
Vicepresident
Secretary
Treasurer
Technical Adviser
International Relations
Voters

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

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- Education
- Credit and Technical Assistance

TERRA Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
April - June, 2003 Volume 21 Num. 2

ISSN 0187 - 5779

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

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

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

EDITOR
ASSOCIATE EDITOR
TECHNICAL EDITORS

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

STYLE EDITORS

ENGLISH EDITOR

EDITORIAL STAFF

Cover design

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

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

TERRA

ABRIL - JUNIO DE 2003 • VOLUMEN 21 • NUMERO 2
APRIL - JUNE, 2003 • VOLUME 21 • NUMBER 2

HISTORIA de la revista Terra; último periodo

DIVISION I

- 149 Localización de los suelos de humedad residual a partir de imágenes de satélite: Clasificación automática supervisada de la imagen.
Location of residual moisture soils using satellite images: Automatically supervised classification of the image.
Miguel A. Segura Castruita, Carlos A. Ortiz Solorio y Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena

DIVISION II

- 157 Fertilización orgánica, mineral y foliar sobre el desarrollo y la producción de papaya cv. Maradol.
Organic, mineral and foliar fertilization on development and production of papaya cv. Maradol.
José Luis Escamilla García, Crescenciano Saucedo Veloz, Ma. Teresa Martínez Damián, Angel Martínez Garza, Prometeo Sánchez García y Ramón Marcos Soto Hernández
- 167 Nutrición mineral acoplada al crecimiento (NUMAC): Nutrición con N para tomate en invernadero. 1. Descripción del modelo y obtención de parámetros.
NUMAC-N tomato: Mineral nutrition fit at growth. The nitrogen nutrition in tomato greenhouse production. 1. Model description and parameters adjust.
Sergio A. Enriquez-Reyes, Gabriel Alcántar-González, Javier Z. Castellanos-Ramos, Enrique Arjona Suárez, Diego González-Eguiarte e Ignacio Lazcano-Ferrat
- 177 Nutrición mineral acoplada al crecimiento (NUMAC): Nutrición con N para tomate en invernadero. 2. Curva de concentración crítica y demanda de nitrógeno.
NUMAC-N tomato: Mineral nutrition fit at growth. The nitrogen nutrition in tomato greenhouse production. 2. Critical concentration curve and nitrogen demand.
Sergio A. Enriquez-Reyes, Gabriel Alcántar-González, Javier Z. Castellanos-Ramos, Enrique Arjona Suárez, Diego González-Eguiarte e Ignacio Lazcano-Ferrat

- 185 Nutrición mineral acoplada al crecimiento (NUMAC): Nutrición con N para tomate en invernadero. 3. Evaluación del modelo. NUMAC-N tomato: Mineral nutrition fit at growth. The nitrogen nutrition in tomato greenhouse production. 3. Model evaluation. *Sergio A. Enriquez-Reyes, Gabriel Alcántar-González, Javier Z. Castellanos-Ramos, Enrique Arjona Suárez, Diego González-Eguiarte e Ignacio Lazcano-Ferrat*
- 195 Productividad del agua en el cultivo de nopal con riesgo por goteo en la Comarca Lagunera. Water productivity in prickly pear using drip irrigation in the Lagunera region. *Ignacio Orona Castillo, Arnoldo Flores Hernández, Miguel Rivera González, J. Guillermo Martínez y J. de Jesús Espinoza Arellano*
- 203 Metabolismo del carbono en el citosol nodular y bacteroide en la simbiosis *Rhizobium tropici-Phaseolus vulgaris* var. Africa en condiciones salinas. Carbon metabolism in nodule cytosol and bacteroid in the symbiosis *Rhizobium tropici-Phaseolus vulgaris* var. Africa under saline conditions. *Lina Pliego, Antonio Ocaña y Carmen Lluch*
- 213 Crecimiento, fijación de nitrógeno, acumulación y asimilación de nitratos con dosis de nitrógeno en frijol. Growth, nitrogen fixation, nitrate accumulation and assimilation with nitrogen levels in common bean. *Lina Pliego, Antonio Ocaña y Carmen Lluch*
- 225 Modelo logístico: Herramienta para diagnosticar el cuánto y cuándo fertilizar. Logistic model: Tool to diagnose how much and when to fertigate. *Moisés Alonso Baéz, Leonardo Tijerina Chávez, Prometeo Sánchez García, Angel Martínez Garza, Lorenzo A. Aceves Navarro y J. Alberto Escalante Estrada*

DIVISION III

- 233** Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México.
Integration of the USLE to a GIS to estimate the soil erosion by water in a watershed of Tepatitlán, Jalisco, Mexico.
Hugo Ernesto Flores López, Mario Martínez Menes, J. Luis Oropeza Mota, Enrique Mejía Saenz y Rogelio Carrillo González
- 245** Conocimiento local de pequeños productores sobre la erosión del suelo en el ejido El Tomatal, Guerrero, México.
Indigenous knowledge about soil erosion among small farmers at El Tomatal, Guerrero, Mexico.
Ricardo González Mateos, Carlos A. Ortiz Solorio, Víctor Volke Haller, Jesús González Ríos y Fernando Manzo Ramos
- 259** Degradación del suelo como resultado de la erosión hídrica.
Soil degradation as a result of water erosion.
L. Darrell Norton, Eusebio Jr. Ventura and Katerina Dontsova
- 267** Determinación de la dosis óptima económica de fertilización en caña de azúcar.
Determination of the optimal economic fertilization rate in sugar cane.
Sergio Salgado García, Roberto Núñez Escobar y Lauro Bucio Alanís
- 273** Muestreo y análisis foliar relacionados con fenología en mango en el sur de Sinaloa, México.
Sampling and phenology-related nutrient concentrations in mango in Southern Sinaloa, Mexico.
Daniel Benitez-Pardo, Migdonio Hernández-Montoya, Tomás Osuna-Enciso, Marino Valenzuela-López y Blas Galván Piña

Reseña de libros

297

Revisores y Editores Técnicos

que participaron en este número/Reviewers

299

HISTORIA DE LA REVISTA TERRA: ÚLTIMO PERÍODO

La revista TERRA se fundó en 1982, bajo la iniciativa del Dr. Antonio Turrent Fernández, quien presidió la mesa directiva de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS) en el período 1982-1984.

Se eligió el nombre de TERRA, porque éste refleja y concentra el significado de suelo, clima, biota y su relación con la actividad humana. Además, por ser un concepto que refleja el objetivo de la SMCS, es decir, buscar la interacción del científico a escala mundial, esa universalidad permite la proyección de nuestros valores nacionales.

Desde esa fecha, TERRA se ha propuesto ser el medio para difundir la producción científica de investigadores que desarrollan su actividad en el ámbito de la Ciencia del Suelo en el orden nacional y latinoamericano, principalmente.

Con el presente escrito, se pretende dar constancia de algunos aspectos que han sido de particular interés en el desarrollo de la revista de los que destacan: la actualización en su difusión, su situación económica y la evaluación externa.

OPORTUNIDAD DE PUBLICACIÓN

No se cuenta con el dato preciso de la publicación real del Número 3(1), sin embargo, en 1987, ya se tenía un desfase importante en las fechas de edición y publicación, es posible que esa diferencia fuera de tres años (seis números).

El retraso, tanto en la edición, como de su publicación, ha sido un problema que ha acompañado a la revista desde su origen. En 1990, por primera vez se pudo distribuir a tiempo cuando se publicó en octubre el Número 10(2). Sin embargo, no fue posible mantener actualizada a la revista. En 1994, por segunda ocasión se logró poner al día su publicación.

A partir de 1994, se inicia la edición trimestral de la revista TERRA. Esta decisión se basó en el creciente registro de artículos, sin embargo, tuvo un efecto negativo sobre la vigencia de su publicación. El trabajo editorial se duplicó, por lo que se produjo un desfase en los tiempos de edición y oportunidad de publicación. En marzo de 2000, se publicó el Número 17(2) que correspondió a 1999; en esta fecha, de nuevo la revista tenía un retraso de un año un trimestre. La razón principal de este atraso se debió a una falta de envío de contribuciones por parte de autores, aspecto que complicó aún más el tratar de conciliar las fechas de edición y publicación y puso en riesgo la permanencia de la revista.

Cabe la reflexión acerca de la escasa solidaridad con la revista por parte de los socios de la SMCS, en los momentos más difíciles de la misma; en 1999, se registraron 41 contribuciones, cantidad insuficiente para editar cuatro números, y reflejo de una falta de compromiso para impulsar a la revista.

En septiembre de 2002, por tercera ocasión se vuelve a poner al día la oportunidad de difusión.

Es de particular interés que este mal crónico haya quedado atrás. Se puede prever que, por la cantidad de artículos que se tienen en proceso y por el valioso trabajo que realiza el Comité Editorial, el retraso en la fecha de publicación de la revista sea parte del pasado, incluso se espera poder entregar a la revista antes de la fecha que le corresponda ser distribuida.

SITUACIÓN FINANCIERA

La falta de recursos económicos es otro mal que persiste en la revista, sin embargo, en esta ocasión no se pretende hacer un balance financiero con el que se confirme la situación precaria. Más bien, en este

momento se subraya la parte positiva, la solidaridad y el apoyo económico que colegas e instituciones han aportado a la revista. En primer lugar debe reconocerse el enorme apoyo que los autores han brindado, al pagar los costos que implica publicar sus artículos. También es pertinente reconocer a los colegas e instituciones que han otorgado financiamiento, gesto solidario que ha permitido continuar con el trabajo de edición:

La Mesa Directiva de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

(Presidida por el Dr. Víctor Ordaz Chaparro)

(Presidida por el Dr. Francisco Gavi Reyes)

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

La Universidad Autónoma Chapingo (UACH)

La Subdirección de Investigación de la UACH

El Colegio de Postgraduados (Montecillo México)

El Programa de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados

El Instituto Tecnológico Agropecuario 10 (Torreón, Coahuila)

La Universidad Benito Juárez del Estado de Durango

Los organizadores del primer y segundo Simposium de Nutrición Vegetal

El IPN-CINVESTAV, a través del Dr. Juan José Peña Cabriales

La Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Veracruzana

El Programa de Intercomparación de Análisis de Suelos y Plantas

El proyecto de investigación SPIES, financiado por la Comunidad Europea

El grupo "Amigos de Terra", cuya colaboración fue fundamental en

momentos difíciles para la revista

EL ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEL CONACYT Y LA REVISTA TERRA

A raíz de la formación del Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica del CONACYT, en 1993, la revista TERRA inicia una época de evaluación externa, realizada por expertos en el trabajo científico y editorial.

Como resultado de su primera evaluación, la revista TERRA fue aceptada en dicho índice, con una serie de condicionamientos a satisfacer en un tiempo no mayor que ocho meses. En ese período habría que lograr superar los condicionamientos indicados en el dictamen, como:

Promover su registro en índices internacionales.

Ampliar el Consejo Editorial, incorporar a miembros de otras instituciones, nacionales y extranjeras.

Integrar un sistema de distribución amplio y eficiente.

Dichas acciones se evaluarían en 1999.

El Editor en Jefe de la revista tomó las acciones encomendadas a mejorar los aspectos indicados. En 1995, una vez superados los condicionamientos, TERRA permanece dentro del Índice hasta 1997. En este año se publicó la Convocatoria del CONACYT para actualizar el registro de la revista TERRA dentro del Índice, sin embargo, por diversas razones no se sometió a evaluación el expediente de la revista, por lo cual la revista quedó fuera del Índice en los años 1998 y 1999.

A fines de 1999, TERRA se somete a evaluación para reingresar al Índice de Revistas. El dictamen respectivo fue positivo, por lo que la revista TERRA se incorporó de nuevo al Índice por un período de dos años, con los siguientes puntos a satisfacer en la próxima evaluación:

Internacionalizar el Comité Editorial
Invitar árbitros del extranjero
Incluir fecha de recepción/aceptación de artículos
Incluir fecha de publicación en el colofón
Hacer gestiones para incorporarla en índices internacionales de mayor impacto
Fortalecer sus suscripciones

Para satisfacer esos condicionamientos se tuvieron dos años en los cuales, gracias al apoyo de colegas mexicanos y extranjeros, se pudo ampliar e internacionalizar la cartera de árbitros.

También se hicieron gestiones para incluir a la revista en diversos sistemas de indización, así como se inició el cobro por suscripción y, posteriormente, por edición de artículo aprobado.

En el año 2002, TERRA nuevamente se somete a evaluación ante los miembros del Comité Dictaminador del CONACYT. Como se sabe, el resultado fue muy favorable; se revalidó la permanencia dentro del Índice, con una vigencia de cinco años. La única recomendación fue que se continuara con trámites para registrar a la revista en índices de mayor impacto en la especialidad.

Como puede apreciarse, después de un período de nueve años, TERRA ha podido afrontar el enorme reto que significa la evaluación externa y, en cada dictamen, superar cada vez mejor los criterios que señala el CONACYT.

En algún momento se pensó que el Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica significaba la muerte para algunas revistas, sin embargo, se ha convertido en la principal fortaleza que les permite permanecer y superar retos, aun en las condiciones más precarias. Tal es el caso de la revista TERRA.

Estos logros son de todos, incluidos los fundadores, los editores *Jorge D. Etchevers Barra* y *Andrés Aguilar Santelises*, el Comité Editorial actual (*editor, editores técnicos, editores asociados nacionales y editores asociados internacionales*), los árbitros y los autores de artículo. *Mención especial merecen el trabajo inagotable de Ina Aalmers de Aguilar en el formato, el trabajo secretarial de Sofía Blancas, el apoyo de Ricarda Torres Estrada, la valiosa colaboración de la Lic. Gardenia Chávez Peña en el diseño de portada y del índice de contenido, así como el trabajo fino de los editores de estilo Jorge Alvarado López, Ina Aalmers de Aguilar, Langen Corlay Chee y Diane Fumiko Miyoshi Udo (editora de estilo en inglés).*

Sin lugar a dudas, con un gran equipo como el que se integra en el Comité Editorial, pueden superarse los retos más difíciles que pudiera afrontar la revista.

VISIÓN DE LA REVISTA TERRA

Por último, los esfuerzos del grupo de trabajo deben enfocarse para que a corto y mediano plazo la revista sea y tenga las siguientes características:

Ser el órgano de referencia principal en el campo de la Ciencia del Suelo en América Latina.

Ser editada en versión bilingüe.

Estar indizada en el ISI.

Ser financieramente autosuficiente.

Antonio Vázquez Alarcón
Editor

LOCALIZACIÓN DE SUELOS DE HUMEDAD RESIDUAL A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE: Clasificación Automática Supervisada de la Imagen

Location of Residual Moisture Soils Using Satellite Images: Automatically Supervised Classification of the Image

Miguel A. Segura Castruita^{1‡}, Carlos A. Ortiz Solorio¹ y
Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena¹

RESUMEN

Los suelos de humedad residual (SHR) tienen texturas gruesas, alto rendimiento agrícola en condiciones de secano y retienen agua. Se les ubica en zonas volcánicas. Estos suelos muestran una coloración azul grisáceo en imágenes de satélite en falso color, por lo cual suponemos que tienen una firma espectral específica. El objetivo del presente estudio fue establecer los criterios para reconocer suelos de humedad residual con el uso de imágenes de satélite. Se seleccionaron áreas con SHR, en los estados de México y Puebla, y se ubicaron sobre imágenes de satélite. Estas áreas correspondieron a las zonas de análisis de reflectancia en diferentes bandas, las cuales se emplearon en una clasificación supervisada, cuyos resultados se probaron en campo. La metodología generada mostró una eficiencia de 70%, pero la desventaja es que la reflectancia de los SHR puede confundirse con la reflectancia de las ciudades.

Palabras clave: Pómez, Landsat.

SUMMARY

The residual moisture soils (RMS) have coarse texture, high yield in dryland farming and they retain water. They are located in volcanic zones. These soils show a grayish blue coloration in satellite images in false color; therefore, we suppose that they have a specific spectral signature. The objective of this study was to establish the criteria for the recognition of residual moisture soils using satellite images. Areas with RMS in the states of Mexico and Puebla were selected and located on satellite images. These areas

¹Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, México. ‡ (cast@colpos.mx)

Recibido: Noviembre de 2001. Aceptado: Octubre de 2002.
Publicado en Terra: 21: 149-156.

corresponded to the zones of reflectance analysis in different bands, which were employed in a supervised classification and whose results were proved in the field. The methodology showed an efficiency of 70%, but the disadvantage is that RMS reflectance can be confused with the reflectance of the cities.

Index words: Pumice, Landsat.

INTRODUCCIÓN

Los campesinos del valle Puebla-Tlaxcala y del valle de Chalco conocen los suelos de textura gruesa con la capacidad de almacenar agua como "suelos de humedad residual" (SHR). La capacidad para retener humedad de estos suelos es una característica de importancia agrícola y económica en áreas con agricultura de secano en la región, ya que el rendimiento de maíz en grano (4.0 t ha⁻¹) es superior al que se obtiene en otros suelos (Díaz *et al.*, 1999); además, se han utilizado en investigaciones para la generación de tecnología y genotipos de maíz en el Plan Puebla (CIMMYT, 1969, 1974). No obstante, al desconocer las razones por las cuales estos suelos retienen humedad, así como su distribución geográfica y la extensión que ocupan en la región, la transferencia de tecnología es limitada.

Para conocer el comportamiento de los suelos con diferentes usos y sistemas de manejo, es necesario determinar ¿cómo son? y ¿dónde están? La clasificación taxonómica es una herramienta útil para responder a la primera pregunta y la segunda pregunta ¿dónde están? puede contestarse a través de observaciones de campo y su relación con el paisaje (Ortiz y Gutiérrez, 1999). La percepción remota es una técnica útil para alcanzar este fin en grandes superficies (Merchant y Ripple, 1996), siendo la firma espectral la expresión de la reflectancia de energía con la cual un objeto puede diferenciarse en una imagen de satélite (Stoner y Baumgardner, 1981; Melesio-Nolasco, 1991).

En México, la aplicación de la percepción remota se inició desde 1976 y, hasta la fecha, se ha utilizado en estudios geológicos, forestales, uso y erosión del suelo, calidad del agua, identificación de cultivos y estimación de rendimientos (Soria *et al.*, 1998); sin embargo, estudios relacionados con la detección de suelos con propiedades similares (humedad y textura) no se han estudiado exhaustivamente.

Los suelos de humedad residual, objeto de la presente investigación, se han formado a partir de sedimentos aluviales, ceniza volcánica y piedra pómez (CIMMYT, 1974; Werner, 1978); se localizan en las laderas de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl y en algunas partes del valle Puebla-Tlaxcala y de Chalco; aparentemente se observan de color azul grisáceo en imágenes de satélite en falso color (Ortiz, 1999, comunicación personal).

Al considerar que la reflectancia del suelo, en general, es función de algunas propiedades, como: contenido de humedad, materia orgánica, textura y conductividad eléctrica (Swain y Davis, 1978; Baumgardner *et al.*, 1985), conduce a suponer que los SHR tienen una firma espectral específica que es necesario corroborar con datos de campo para determinar si se trata del mismo tipo de suelo. Por este motivo, el objetivo de la presente investigación fue determinar la localización de los suelos de humedad residual a través del uso de las nuevas tecnologías de cartografía, como es la interpretación automática de imágenes de satélite y, con ello, comprobar que estos suelos generan una reflectancia específica que permite su separación de otros objetos en una imagen, obteniendo así su distribución geográfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la parte sur-este del estado de México y oeste del estado de Puebla, con una altitud que fluctúa de 2240 a 2350 m (Figura 1).

La región tiene influencia volcánica, debido a que productos volcánicos del Cuaternario cubrieron amplios sectores de la Sierra Nevada; además, al pie de los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl se encuentran lahares y depósitos de nubes ardientes (Van Erffa *et al.*, 1976), de manera que los sedimentos, ceniza volcánica y partículas pomáceas constituyen el material parental de los suelos de la región (Werner, 1978). La vegetación en la zona es

escasa, debido a que se trata de suelos dedicados a la agricultura, por lo que la poca vegetación natural está compuesta por pirúl (*Schinus molle* L.), eucalipto (*Eucalyptus* spp.), pino (*Pinus* spp.), encino (*Quercus* spp.), capulín (*Prunus capuli*), tejocote (*Cratesegus* spp.) y especies arbustivas y menores de la familia Compositae, Cruciferae, Amarillidaceae, Opuntia y Cucurbitaceae (Flores, 1971). Los suelos del área de estudio, según INEGI (1982), constituyen dos unidades del sistema FAO: Fluvisoles en el estado de México y Regosoles en Puebla. Estos suelos tienen uso agrícola de riego y secano, y en ellos se cultivan maíz, frijol, calabaza, alfalfa y flor, además algunos frutales e intercalaciones; siendo el maíz de mayor importancia (Díaz *et al.*, 1999).

Trabajo de Campo

Se seleccionaron cuatro sitios de muestreo (tres en Puebla y uno en el estado de México), constituidos por suelos de humedad residual (SHR) representativos, de acuerdo con CIMMYT (1969, 1974). Se comprobó su existencia a través de visitas de campo, donde se realizaron entrevistas a productores para conocer el nombre con el que los campesinos los identifican, el uso que les dan, el rendimiento que obtienen de los cultivos que establecen y el registro de diferencias y similitudes (pendiente, color, textura y pedregosidad del suelo) entre un área y otra. En cada lugar que se visitó, se obtuvieron sus coordenadas, mediante un Sistema de Geoposicionamiento Global, utilizando un GPS12 marca GARMIN Modelo 12XL (B-100449) con una precisión de ± 10 m; para posteriormente localizarlos sobre la imagen de satélite.

Análisis de la Imagen de Satélite

La localización de los suelos de humedad residual se obtuvo por medio del análisis de una imagen de satélite, a través de una clasificación supervisada que consistió de los siguientes pasos:

Obtención de la imagen de satélite. Se dispuso de una imagen del satélite Landsat 5-MSS, donada por EOSAT^{TM/SM} (Customer Services Department) a la Universidad de Arizona, incluida en la página web <http://aria.arizona.edu>. La imagen de satélite que se obtuvo es una escena de la Ciudad de México, orientada a mapa con corrección de sistema y proyección UTM (Universal Transversa Mercator). El 07 de marzo de 1989 se captó la escena; esta fecha se

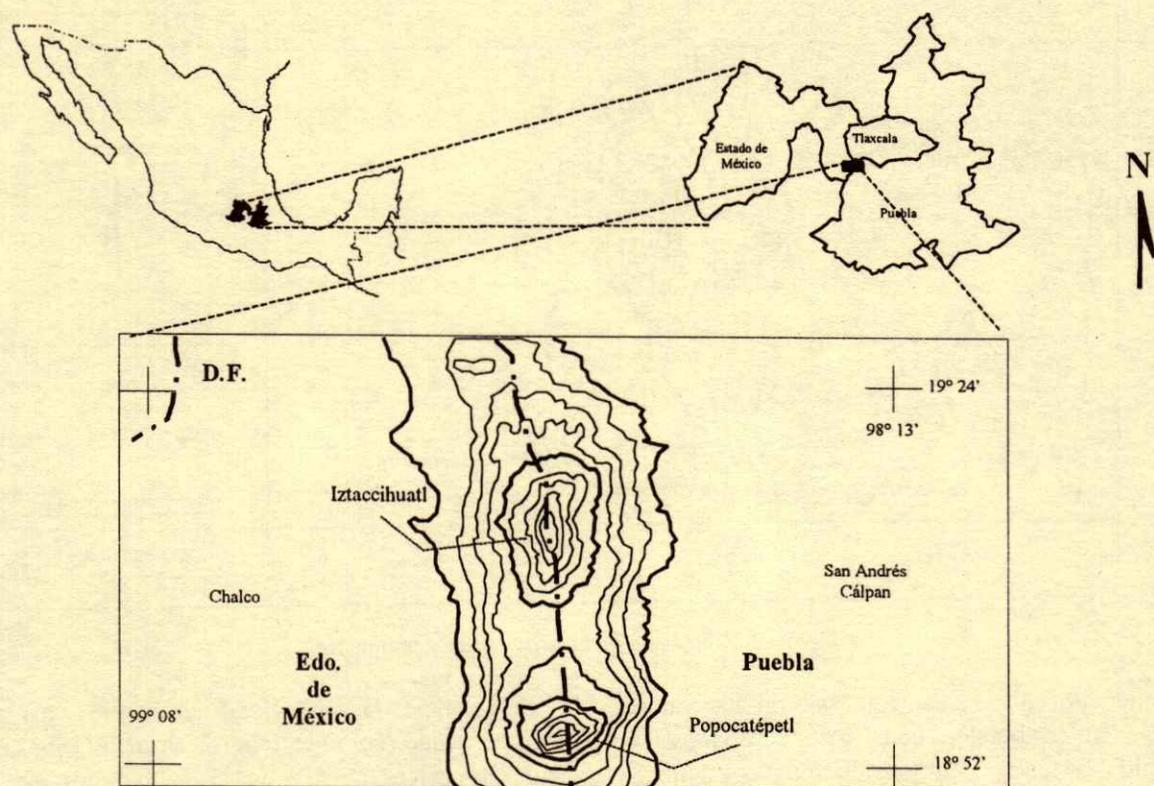


Figura 1. Localización del área de estudio.

eligió con el fin de eliminar la interferencia que pudiera causar la nubosidad. La escena tiene un tamaño real de 4059 columnas y 3833 renglones con un total de 1 626 508 píxeles. El tamaño del píxel es de 60 x 60 m y sus coordenadas UTM son: X mín. 364200 y X máx. 607680, Y mín. 1968480 y Y máx. 2194800.

Elaboración de la máscara digital. Obtenida la imagen, se procedió a delimitar el área de estudio, a través de la elaboración de una máscara digital en formato vectorial, considerando las coordenadas extremas del área de estudio, proceso que se realizó con el apoyo del Sistema de Información Geográfica (SIG) Idrisi®.

Delimitación de los sitios de entrenamiento. Los puntos de georeferencia que se obtuvieron en campo, de los lugares que ocupan los SHR, se ubicaron en un recorte de la imagen de satélite Landsat 5-MSS (área de estudio) y se formaron cuatro polígonos que constituyeron los sitios de entrenamiento y, posteriormente, se utilizaron en la clasificación de la imagen.

Procesamiento de la imagen. Se realizó una clasificación supervisada en forma automática de las bandas MSS 1, 2 y 5 (bandas 2, 3 y 6 del Landsat-TM) para obtener la localización de los SHR y los No SHR. El rango de emisividad que capta cada banda es el siguiente: MSS-1 de 0.5 a 0.6 μm , MSS-2 de 0.6 a 0.7 μm y MSS-5 de 10.4 a 12.6 μm . Estas bandas se utilizaron debido a que discriminan la humedad del suelo (Campbell, 1996).

La clasificación se llevó a cabo con el SIG Idrisi® y consistió de la asignación de una firma (nombre de identidad) a las parcelas, por medio de la herramienta Makesig y se identificó el área de estudio con el clasificador PIPED (método del Paralelepípedo). Éste se utilizó por ser el más simple y rápido en la obtención de resultados (Eastman, 1999).

Verificación de valores predichos. El mapa de localización de los SHR obtenido de la clasificación supervisada, se verificó a través de la selección al azar de 10 píxeles para cada categoría clasificada (SHR y No SHR) y se procedió a su comprobación en campo, mediante nuevas entrevistas a productores, dueños de

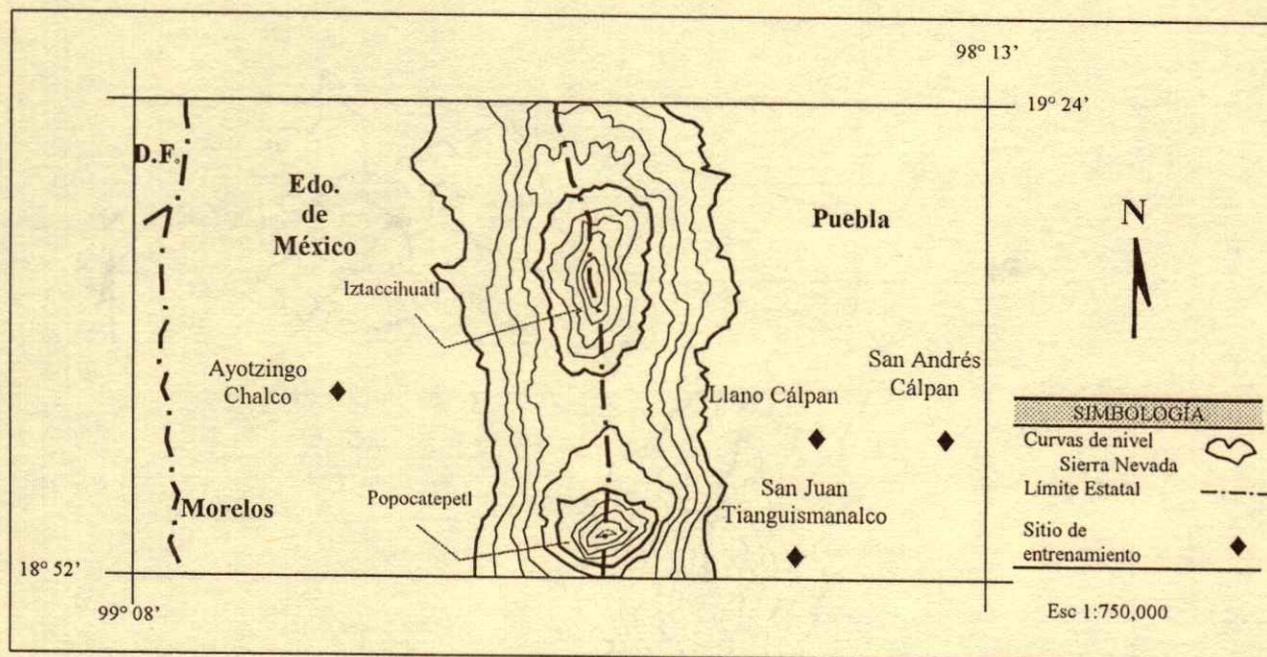


Figura 2. Ubicación de los sitios de entrenamiento.

las parcelas. Por último, se contrastaron los valores predichos en gabinete con los recabados en campo, para conocer cuántos fueron correctos y conocer la eficiencia del método.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y la discusión del presente estudio se muestran en tres apartados: a) Descripción de campo, b) Clasificación supervisada de la imagen de satélite en forma automática, y c) Comprobación de los resultados de la clasificación de la imagen de satélite. Los incisos a) y c) consistieron de recorridos de campo y entrevistas a productores, mientras que b) se efectuó en gabinete.

Descripción de Campo

Los suelos de humedad residual (SHR) tienen la peculiaridad de retener humedad, propiedad que los productores aprovechan para establecer diferentes cultivos, en un sistema de producción agrícola de secano.

Estos suelos tienen distintos nombres, dependiendo del lugar donde se localicen (Cuadro 1); sin embargo, el manejo que reciben es similar; en todos ellos se realiza un paso de arado y un rastreo o pisoneo inmediatamente después de la cosecha. La implementación de estas labores en el suelo se realiza

para romper la capilaridad del mismo y así conservar la humedad, como lo reporta Kronen (1994) en suelos de Sudáfrica.

Los campesinos, a través de su experiencia, relacionan la capacidad de retención de humedad únicamente con las labores que realizan después de la cosecha. Es probable que esta capacidad esté relacionada con algunas propiedades del suelo; sin embargo, no existe información acerca de éstas.

Clasificación Supervisada de la Imagen de Satélite en forma Automática

La ubicación de los sitios de entrenamiento (SE) se encuentra en la Figura 2, mientras que, en el Cuadro 2, se incluyen los rangos de los límites de clase (LC) y la media más-menos de la desviación estándar ($\bar{x} \pm \sigma$) de los valores de reflectancia (VR), del conjunto de SE para cada banda de la imagen de satélite. Los VR de los SHR son diferentes en cada una de las bandas; la Banda 5 presenta los mayores, mientras que en la Banda 2 y la Banda 1 son menores. Este comportamiento indica una variación en las características de la cobertura, dispersión atmosférica u otros factores (Peña, 1978; Swain y Davis, 1978).

A través de este método, y debido a la falta de datos de laboratorio de las características físicas y químicas de los SHR, no puede establecerse qué factor o factores están provocando la variación de

Cuadro 1. Resultados de las entrevistas realizadas en sitios con suelos de humedad residual.

SE [†]	Lugar	Coordenadas UTM	Nombre local del suelo	Cultivo	Rendimiento t ha ⁻¹	Observaciones
1	Llano Cálpan, Puebla.	564971.1	Arenal	Maíz	3.7	Parcelas rastreadas y preparadas para la siembra. Pendiente < 3%. Color del suelo gris. Presencia de pómez. Textura arena.
		565210.0		Frijol	1.6	
		2113582.0		Alfalfa		
		2113343.0		Durazno		
2	San Andrés Calpán, Puebla.	562631.1	Arena	Maíz	4.0	Todo el lugar seco, ninguna lluvia en los últimos meses, el maíz amogotado y se cosechaba frijol. Pendiente < 10%. Color del suelo pardo grisáceo. Presencia de pómez. Textura arena.
		562871.1		Frijol	1.8	
		2114422.0		Durazno		
		2114182.0				
3	San Juan Tianguismanalco, Puebla.	559332.4	Xaltéte (Arena)	Flor	2.8	Algunas parcelas con paso de arado y rastreadas. Pendiente entre 5 y 10%. Gran cantidad de fragmentos de pómez. Color del suelo gris pardoso claro. Textura arena.
		559571.9		Maíz		
		2100566.0		Aguacatero		
		2100326.0				
4	Ayotzingo, Chalco estado de México.	509184.3	Arena, Húmeda	Maíz	3.5	La parcela contaba con paso de arado y rastreadas. Pendiente de 5%. Fragmentos de pómez redondeados y cantos rodados de basalto. Color gris pardoso claro. Textura arena.
		509424.2				
		2125879.0				
		2125639.0				

[†] SE = sitios de entrenamiento, UTM = Universal Transversal Mercator.

los VR. Al realizar una clasificación supervisada en forma automática, específicamente con el clasificador PIPED, se utilizan todos los VR de los píxeles que conforman a los SE (límite de clase) en cada banda (Eastman, 1999), sin considerar las características del suelo o del objeto de estudio por separado. La información que se obtuvo, después del procesamiento de la imagen, fue de carácter general, ya que todo el conocimiento *a priori* que se tenía sobre el suelo se generalizó, de manera que las diferencias entre una SE y otra no se puedan detectar, aun cuando se presenten variaciones en sus propiedades.

Al clasificar la imagen con los datos del Cuadro 2, se obtuvo la localización de los SHR (Figura 3a), los cuales se encuentran alrededor de la Sierra Nevada. La mayor agrupación de estos suelos se localiza en el valle Puebla-Tlaxcala y el valle de Chalco. Uno de los problemas que se tuvo en la localización de los SHR es su rango de VR, que se confunde con el que presentan las ciudades; es probable que esto se deba a

Cuadro 2. Rangos de valores de reflectancia de los suelos de humedad residual.

	Banda 1		Banda 2		Banda 5	
	LC	$\bar{x} \pm \sigma$	L.C.	$\bar{x} \pm \sigma$	L.C.	$\bar{x} \pm \sigma$
SHR [†]	26-37	31-34	36-49	41-47	90-114	93-102

[†] SHR = suelos de humedad residual; LC = límite de clases; \bar{x} = media; σ = desviación estándar.

la composición química de los materiales de estos suelos (pómez) y de la composición del concreto en las ciudades (cemento Pórtland), ambos con dominancia de SiO₂. El problema se resolvió con un archivo en formato vectorial de las ciudades; en este estudio, se utilizó la carta topográfica digitalizada del INEGI (1984), para no considerarlas como suelo (Figura 3b).

Comprobación de los Resultados de la Clasificación de la Imagen de Satélite

Para comprobar los resultados que se obtuvieron en el mapa de localización de los SHR, se seleccionaron al azar diez píxeles de cada categoría (SHR y No SHR) y se contrastaron con información de campo. La ubicación de los puntos que se eligieron aparece en la Figura 4.

Al realizar el recorrido de campo, para verificar la existencia o no de los SHR y No SHR, se llevaron a cabo entrevistas a productores de los lugares que se visitaron y se registraron observaciones de cada sitio (Cuadros 3).

Los sitios seleccionados dentro de la categoría de SHR presentan las características que se encontraron en los lugares que se tomaron como SE (excepto los Sitios 7, 8 y 9).

La diferencia entre los sitios que se visitaron es el uso del suelo, lo cual está determinado por la ubicación geográfica donde se encuentren; es decir,

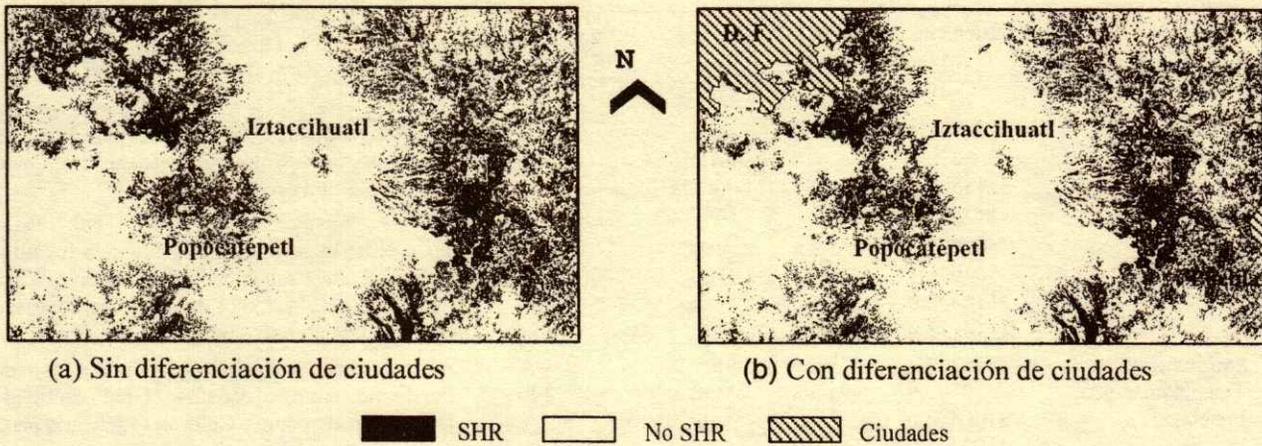


Figura 3. Localización de los suelos de humedad residual.

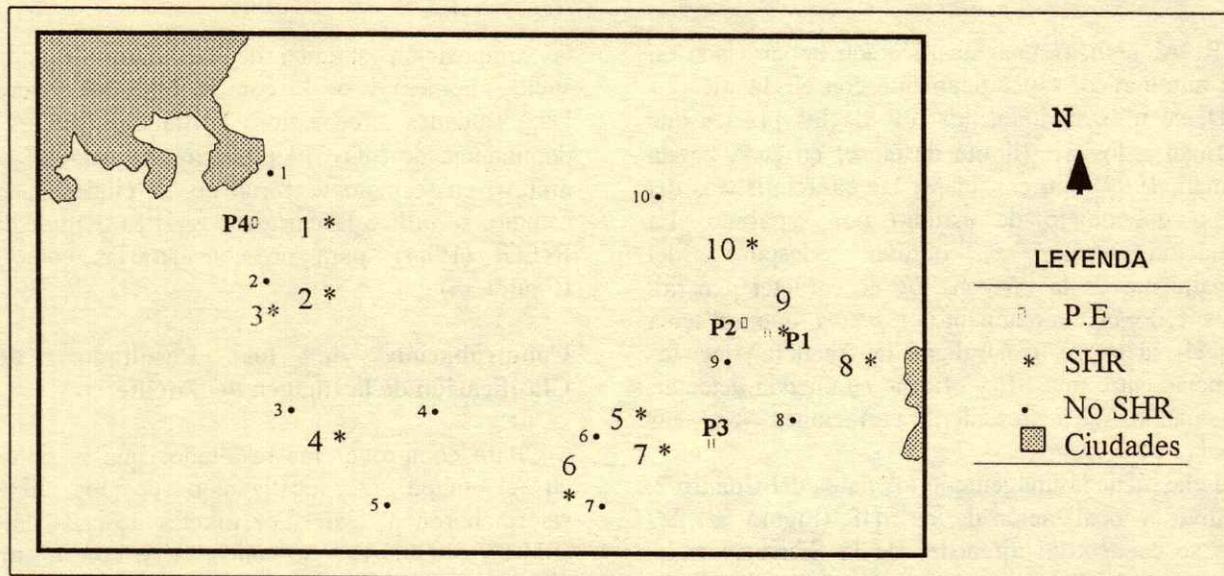


Figura 4. Ubicación de puntos de comprobación de sitios con SHR y No SHR.

mientras en los estado de México y Morelos se siembran únicamente maíz y frijol, en Puebla se siembra maíz, frijol, cultivos intercalados, flores y frutales.

Al cotejar la información extraída del mapa de localización de estos suelos para la categoría SHR, el mapa tuvo siete aciertos y tres errores (Cuadro 3). Los Sitios 7, 8 y 9, a pesar de presentar la característica de ser arenosos y retener humedad, se consideraron como errores, debido a que presentan un manejo diferente; los Sitios 7 y 8 tienen un sistema de producción agrícola con riego y el Sitio 9 no es agrícola, pues es

un suelo que se encuentra dentro de los terrenos de una constructora de concreto.

Para la categoría de No SHR, el mapa resultó con siete aciertos y tres errores (Cuadro 4). Los errores que se presentaron consistieron en sitios que en apariencia correspondían a SHR en el mapa, pero que al ser cotejados en campo no existían, lo que revela que el mapa sobreestima el área ocupada por estos suelos. Lo anterior puede explicarse por el proceso que desarrolló el clasificador (PIPED) al realizar la clasificación en forma automática, ya que los píxeles son asignados a una clase informacional dada, si el

Cuadro 3. Localización y observaciones de los puntos de verificación de los suelos de humedad residual.

S [†]	C	R	Coordenadas UTM [‡]		SHR [§]		Observaciones
			X	Y	Ac	E	
1	467	321	513709.0	2127812	♦		Siembra de frijol, rendimientos de 1.8 t ha ⁻¹ , aplican estiércol; en la superficie tepalcates y piedra pómez, pendiente < 3%
2	462	511	513387.5	2116424	♦		Siembran maíz, rendimiento 3.0 t ha ⁻¹ , aplican estiércol, en la superficie piedra pómez, pendiente > 8%
3	488	928	514960.1	2091396	♦		Superficie rastreada, lista para la siembra, grava de pómez en la superficie, pendiente > 5%
4	462	948	513434.9	2090079	♦		Suelo en descanso, pero siembran maíz, rendimientos de 2.8 t ha ⁻¹ , grava de pómez en la superficie
5	1041	986	548164.1	2087910	♦		Suelo sin laboreo, presencia de piedra pómez en la superficie, pendiente < 3%, aplican estiércol, siembran maíz y frijol.
6	1129	851	553447.4	2096050	♦		Suelo recién sembrado con maíz, rendimientos de 3.2 t ha ⁻¹ , aplican fertilizante, pendiente < 5%, presencia de piedra pómez en la superficie
7	1214	951	558527.2	2090050	♦		Suelo arenoso, con las mismas características que los anteriores, cultivan flor, sin embargo, es de riego
8	1500	751	575706.5	2102030	♦		Suelo arenoso, piedra pómez en la superficie, producen maíz y frutal pera, pero es de riego
9	1358	506	567185.3	2116716	♦		Suelo sin laboreo, dentro de terrenos que ocupan fabricas de armaduras para puentes de concreto
10	1269	347	561799.2	2126296	♦		Siembra de maíz, rendimiento de 3.0 t ha ⁻¹ , frutales de pera y durazno, aplican fertilizante, presencia de piedra pómez en el superficie, pendiente < 3%

[†] S = sitio, C = columna del píxel en la imagen de satélite, R = renglón del píxel en la imagen de satélite; [‡] UTM = Universal Transversa Mercator. [§] SHR = suelos de humedad residual, Ac = acierto, E = error.

Cuadro 4. Localización y observaciones de los puntos de verificación de No SHR.

S [†]	C	R	Coordenadas UTM [‡]		No SHR [§]		Observaciones
			X	Y	Ac	E	
1	412	246	510449.1	2132353	♦		Suelo con textura franca, arbustos y pasto
2	472	477	514008.9	2118492	♦		Afloramientos rocosos y vegetación arbustiva
3	426	795	511271.4	2099284	♦		Cobertura vegetal de pasto, poco suelo desnudo de textura franca
4	657	771	515153.8	2100728	♦		Cobertura vegetal de árboles y pasto
5	546	939	518453.1	2090620	♦		Suelo arenoso con inicios de urbanización sin capacidad de retener humedad
6	1274	505	562148.8	2116804	♦		Suelo desnudo de textura franca arcillosa
7	1095	843	551476.4	2096396	♦		Suelo desnudo de textura arcillosa
8	1362	726	567522.3	2103435	♦		Cobertura de arbustos y pasto, suelo desnudo de textura arcillosa
9	1238	657	572570.4	2107691	♦		Suelo desnudo de textura franca, cultivo de maíz y frutales, con riego
10	1079	813	559589.4	2129606	♦		Suelos de textura franco arcillosa, cultivo de maíz y frijol, con riego

[†] S = sitio, C = columna del píxel en la imagen de satélite, R = renglón del píxel en la imagen de satélite, [‡] UTM = Universal Transversa Mercator, [§] No SHR = no suelos de humedad residual, Ac = acierto, E = error.

valor de reflectancia en cada banda se ubica dentro de los valores máximos y mínimos registrados (límite de clase) o están dentro de un número específico de desviaciones estándar (Eastman, 1999).

De acuerdo con lo anterior, en el desarrollo de la clasificación en forma automática se consideraron indistintamente los límites de clase de los VR de todos los sitios de entrenamiento en cada banda, lo que

provocó que un mayor número de píxeles fuera clasificado y aparecieran en el mapa de localización de los SHR. Después de considerar los aciertos y los errores en las categorías SHR y No SHR, el mapa sólo alcanza 70% de confiabilidad.

Es factible que este resultado se mejore si se realiza una clasificación supervisada de la imagen con análisis píxel por píxel; diferentes estudios de suelos,

donde se utilizó esta metodología, han demostrado que se mejora la calidad (Lee *et al.*, 1988; Navone, 1998).

CONCLUSIONES

- Los suelos de humedad residual pueden diferenciarse en zonas volcánicas a través de la interpretación automática de imágenes de satélite, por la reflectancia que éstos producen.

- El mapa de localización de suelos de humedad residual, obtenido en forma automática con el clasificador PIPED del SIG Idrisi®, tiene 70% de confiabilidad.

- El conocimiento de la ubicación de las ciudades es importante para evitar que se confundan con los suelos de humedad residual durante el proceso de clasificación.

LITERATURA CITADA

- Baumgardner, M.F., L.F. Silva, L.L. Biehl y E.R. Stoner. 1985. Reflectance properties of soils. *Adv. Agron.* 38: 1-44
- Campbell, J.B. 1996. Introduction to remote sensing. Second edition Virginia Polytechnic Institute and State University. The Guilford Press. New York.
- CIMMYT. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 1969. El Plan Puebla: 1967-1969. El Batán. Texcoco, México.
- CIMMYT. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 1974. El Plan Puebla: Siete años de experiencia: 1967-1973. El Batán. Texcoco, México.
- Díaz C., H., L. Jiménez S., R.J. Laird y A. Turrent F. 1999. El Plan Puebla 1967-1992. Análisis de una estrategia de desarrollo de la agricultura tradicional. Colegio de Postgraduados. México.
- Eastman, J.R. 1999. Idrisi 32. Guide to GIS and Image Processing. Volume 1. Clark Labs. Clark University. Worcester, MA.
- Flores M., G. 1971. Tipos de vegetación de la República Mexicana. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Agrología. México, D.F.
- Frazier, B.F. y A.J. Bussaca. 1988. Soil patterns of the Palouse Region as seen by Landsat Thematic Mapper. *Agronomy Abstr.* 35: 256.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1982. Carta edafológica de México, Escala 1:1 000 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1984. Carta topográfica de México, Escala 1:250 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Kronen, M. 1994. Water harvesting and conservation techniques for smallholder crop production systems. *Soil Tillage Res.* 32: 71-86.
- Lee, K.S., G. Lee y E. Tyler. 1988. Thematic mapper and digital elevation modelling of soil characteristics in hilly terrain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1104-1107.
- Melesio-Nolasco, S. 1991. Bases teóricas de la percepción remota. Apuntes del curso Satélites y Agricultura: El ejemplo Spot. pp. 2-19. *In:* Sorani, V., L. Cajuste y E. Ojeda (eds.). Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Merchant, J.M. y W.J. Ripple. 1996. Special issue: Geographic information systems. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 62: 1234-1244.
- Navone, S.M. 1998. Identificación de la erosión mediante el análisis de imágenes de satélite. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 13: 253-263.
- Ortiz, S., C.A. y M.C. Gutiérrez C. 1999. Fundamentos de pedología. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Peña, R.F. 1978. Situación actual y perspectivas de la clasificación automatizada de suelos. pp. 223-250. *In:* Memoria del V Congreso Nacional de Fotogrametría, Fotointerpretación y Geodesia. México, D.F.
- Soria R., J., C.A. Ortiz S., F. Islas G. y V. Volke H. 1998. Sensores remotos, principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales, experiencias en México. 1a edición. Publicación Especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Stoner, E.R. y M.F. Baumgardner. 1981. Characteristic variations on reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 1161-1165.
- Swain, P.H. y S.M. Davis. 1978. Remote sensing: The quantitative approach. McGraw-Hill. New York.
- Van Erffa, W., W. Hilger, K. Knoblich y R. Weyl. 1976. Geología de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus contornos. Comunicaciones 13: 99-105. Proyecto Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica. México, D.F.
- Werner, G. 1978. Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores (comentarios a un mapa de suelos). Suplemento Comunicaciones. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla, México.

FERTILIZACIÓN ORGÁNICA, MINERAL Y FOLIAR SOBRE EL DESARROLLO Y LA PRODUCCIÓN DE PAPAYA CV. MARADOL

Organic, Mineral and Foliar Fertilization on Development and Production of Papaya cv. Maradol

José Luis Escamilla García¹, Crescenciano Saucedo Veloz², Ma. Teresa Martínez Damián^{3†}, Ángel Martínez Garza⁴, Prometeo Sánchez García⁵ y Ramón Marcos Soto Hernández⁵

RESUMEN

El cultivo de la papaya (*Carica papaya* L.) cv. Maradol es afectado por factores de origen biótico y abiótico, que repercuten en el vigor, la sanidad, el rendimiento y la apariencia del fruto. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la fertilización orgánica e inorgánica al suelo y foliar, sobre algunas variables fisiológicas de plantas de papaya, concentración nutrimental en hojas, rendimiento y características de los frutos producidos. Los resultados obtenidos revelaron que la fertilización mineral afectó significativamente la altura de planta, el diámetro de tallo, los frutos en las secciones inferior y media de la copa, total de frutos y el rendimiento. En cambio, la producción de frutos deformes, frutos en la sección superior de la copa y la altura a primer fruto, no fueron afectados por la fertilización orgánica y mineral al suelo o foliar. Las mayores concentraciones de calcio se encontraron en hojas de plantas con fertilización orgánica ($22.4 \mu\text{g g}^{-1}$), magnesio en plantas con fertilización foliar ($11.8 \mu\text{g g}^{-1}$) y boro en aquellas con fertilización orgánica ($0.133 \mu\text{g g}^{-1}$) y mineral ($0.130 \mu\text{g g}^{-1}$).

Palabras clave: *Carica papaya* L., rendimiento, concentración foliar, frutos deformes, crecimiento.

SUMMARY

Papaya (*Carica papaya* L.) may be affected by numerous biotic and abiotic factors, which are known

¹ Escuela de Ciencias Agropecuarias. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Apatzingán, Michoacán, México.

² Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, ⁴ Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, ⁵ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

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

[†] (teremd@taurus1.chapingo.mx)

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

Publicado en Terra 21: 157-166.

to have significant effects on plant health, vigor, yield, and fruit production. The objective of the present investigation was to evaluate the effect of organic and inorganic soil fertilization and foliar fertilization on some physiological variables of papaya plants cv. Maradol, mineral concentration of leaves, yield, and characteristics of fruit growth. It was found that mineral fertilization significantly affected plant height, stem diameter, number of fruits in the lower and middle sections of the plant crown, total fruit number and yield. However, production of malformed fruits, number of fruits in the upper crown and height position of the first fruit on the stem were not affected by organic, mineral fertilization or foliar fertilization. Calcium was highest in leaves treated with organic fertilizer ($22.4 \mu\text{g g}^{-1}$), magnesium in leaves with foliar fertilization ($11.8 \mu\text{g g}^{-1}$) and boron in leaves with organic ($0.133 \mu\text{g g}^{-1}$) and mineral fertilizers ($0.130 \mu\text{g g}^{-1}$).

Index words: *Carica papaya* L., yield, foliar concentration, malformed fruits, growth.

INTRODUCCIÓN

La papaya es uno de los cultivos frutícolas de importancia económica y social en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. En México, su producción se estima en 497 130 t (FAO, 1999). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, en 1996 México exportó a los Estados Unidos, Canadá, Países Bajos, Alemania y Francia un total de 54 208 t, con un valor de 20 millones 563 mil dólares (INEGI, 1997), colocándolo como principal exportador de papaya en el mundo (Janis y Schnitzler, 1998).

La planta es de rápido crecimiento con una producción temprana y continua, lo que hace que requiera grandes cantidades de agua y fertilizantes para su desarrollo (Pérez-López y Reyes-Jurado, 1983; Basso-Figuera *et al.*, 1995). Sin embargo, el cultivo es afectado por diversos factores de origen biótico y abiótico, los cuales tienen un efecto

significativo sobre el vigor y la sanidad de la planta, así como en el rendimiento y la calidad del fruto. Entre los factores abióticos se considera que el manejo cultural del huerto y la nutrición son las principales limitantes (Thomas, 1990; Sri *et al.*, 1995). Al respecto, se ha indicado que las aplicaciones de materia orgánica pueden incrementar el rendimiento, debido a que mejora las propiedades físicas del suelo, aumentando la capacidad de retención de agua y nutrimentos (Richard, 1992; Vieira-Neto, 1995). Con relación a la fertilización mineral, diversos estudios demuestran sus bondades en la producción y el crecimiento de plantas de papaya; en este sentido, Bertuzzi *et al.* (1996) establecieron diferencias significativas en el rendimiento (16.3 t ha^{-1}) al aplicar 200 g de N , 14 g de P y 69 g de K por planta, comparado con el rendimiento del testigo (sin fertilizante) con 7.18 t ha^{-1} . Por su parte, Cripps y Allan (1997) señalaron que, al fertilizar con 250 kg ha^{-1} de N, 20 kg ha^{-1} de P y 340 kg ha^{-1} de K hubo un mayor crecimiento de las plantas, mayor área foliar, alta retención de frutos y mayor peso fresco.

Considerando la información antes mencionada y que, en general, los suelos de la región del valle de Apatzingán, Michoacán, presentan una gran diversidad en materia orgánica, contenido de N y otros elementos minerales (Maldonado *et al.*, 2001), se realizó la presente investigación con el objetivo de evaluar el efecto de la fertilización orgánica e inorgánica al suelo y foliar, sobre algunas variables fisiológicas, rendimiento y características de los frutos en el momento de la cosecha de plantas de papaya.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en el ejido de San Juan de los Plátanos, municipio de Apatzingán, Michoacán; este municipio se localiza en las coordenadas $19^{\circ} 06' 00'' \text{ N}$ y $102^{\circ} 22' 00'' \text{ O}$ (SG y Gobierno del Estado de Michoacán, 1988). La clasificación climática es Bs1(h')w(w)(i')g (García, 1981); la temperatura media para 2000 fue de 26.8° C , se presentaron máximas de 40° C y mínimas de 19.0° C en el verano y de 36° C máximas y 13° C mínimas en el invierno; la precipitación pluvial para el mismo año fue de 689 mm , distribuida entre mayo y octubre (CNA, 2001). Las plantas de papaya cv. Maradol se adquirieron de un vivero comercial y se plantaron a 2.5 m entre plantas e hileras ($1600 \text{ plantas ha}^{-1}$). Previo al establecimiento del experimento, se realizó un muestreo de suelo de 0 a 30 cm de profundidad, el cual se llevó al laboratorio del Área de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados, para el análisis de la fertilidad inicial del suelo.

La caracterización física y química del suelo se presenta en el Cuadro 1, donde se describen los siguientes criterios de interpretación: pH moderadamente alcalino (Trinidad y Rosas, 1994); no salino (Cadahia y Lucena, 2000); alta capacidad de intercambio catiónico (Cottenie, 1980); no sódico; textura migajón arcillo limoso, alto contenido de materia orgánica (Tavera, 1985); alto contenido de N total (Moreno, 1978); muy alto contenido de K (Etchevers *et al.*, 1971); alto contenido de Ca (Etchevers *et al.*, 1971); adecuado valor de Mn (Viets

Cuadro 1. Caracterización física y química del suelo.

Determinación	Unidad	Resultado	Referencia
pH (1:2 H ₂ O)		7.53	Jackson (1964)
CE (1:5 H ₂ O)	dS m ⁻¹	1.700	Richards (1990)
CIC (NH ₄ COOCH ₃ 1N)	cmol(+) kg ⁻¹	39.998	Etchevers <i>et al.</i> (2000)
Arena	%	15.48	Bouyoucos (1936)
Limo	%	52.00	Bouyoucos (1936)
Arcilla	%	32.52	Bouyoucos (1936)
Materia orgánica (Walkley-Black)	%	4.034	Jackson (1964)
N total (Kjeldahl)	%	0.213	Bremner (1965)
P (Olsen)	mg kg ⁻¹	34.214	Olsen y Dean (1965)
K (NH ₄ O Ac 1N pH 7)	cmol(+) kg ⁻¹	3.487	Chapman (1965)
Ca (NH ₄ O Ac 1N pH 7)	cmol(+) kg ⁻¹	24.60	Chapman (1965)
Na (NH ₄ O Ac 1N pH 7)	cmol(+) kg ⁻¹	1.267	Chapman (1965)
Mg (NH ₄ O Ac 1N pH 7)	cmol(+) kg ⁻¹	9.74	Chapman (1965)
Mn (DTPA)	mg kg ⁻¹	1.30	Lindsay y Norvell, (1978)
Cu (DTPA)	mg kg ⁻¹	0.91	Lindsay y Norvell (1978)
Zn (DTPA)	mg kg ⁻¹	0.91	Lindsay y Norvell (1978)
B (DTPA)	mg kg ⁻¹	0.42	Enriquez (1989)

y Lindsay, 1973); bajo contenido de Zn (Trinidad y Rosas, 1994); adecuado contenido de Cu (Viets y Lindsay, 1973); y bajo contenido de boro (Trinidad y Rosas, 1994).

El experimento se estableció con un diseño factorial 2^3 con un arreglo en bloques al azar, con tres repeticiones, donde la unidad experimental estuvo conformada por 20 plantas. Los factores evaluados fueron: fertilización orgánica, fertilización mineral al suelo y fertilización foliar, cada uno a dos niveles: sin (0) y con fertilización (1), los cuales generaron ocho combinaciones. La dosis y época de aplicación de la fertilización orgánica, mineral al suelo y foliar fue la siguiente:

Fertilización orgánica. Se aplicaron 4 kg de gallinaza por planta (6.4 t ha^{-1}) en el fondo de la cepa cuyas dimensiones fueron $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}$, previo a la plantación. La composición química de la gallinaza fue (valores de cuatro muestras): pH 7.0 a 7.6; 20 a 30% materia orgánica; 2.1 a 5.3% N total; P 1.5 a 3.0%; K 2.0 a 4.0%; Ca 3.5 a 8.0%; Mg 0.1 a 1.6%; Na 0.4 a 2.4%; Zn total 480 mg kg^{-1} ; Mn total 415 mg kg^{-1} ; Fe total 4812 mg kg^{-1} ; sales solubles 2.4 a 6.2%; relación C/N 6 a 8 y 22 a 35% de cenizas.

Fertilización mineral. Se aplicó al suelo la fórmula 258-200-280, de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente, la cual se dividió de acuerdo con las etapas fenológicas indicadas en el Cuadro 2.

Cincuenta por ciento del N, 25% de P, 25% de K de la fórmula 258-200-280, más 6 g de sulfato de Zn, 5 g de sulfato de Mg, 5 g de sulfato de Mn, 4 g de sulfato de Fe y 3 g de bórax, se mezclaron y se aplicaron en el fondo de la cepa previo al transplante. En la etapa de floración (tres meses después del transplante) se mezcló 25% del N con 50% del P más 25% del K, y se aplicó en dos hoyos, dentro de la zona de goteo; mientras que en la etapa de producción se fertilizó con la mezcla de 25% de N y P más 50% del K; además, se aplicaron elementos menores en forma de sulfatos, aplicados en pozos igualmente en la zona de goteo (seis meses después del transplante) (Cuadro 2) de acuerdo con Sánchez (1998).

Fertilización foliar. En nueve ocasiones, se asperjó al follaje el fertilizante foliar Fertiquel Combi®, en dosis de 3 g L^{-1} de agua más nitrato de calcio (3 g L^{-1}), a intervalos de 15 días a partir del tercer mes de establecida la plantación y hasta inicio de la cosecha.

Las prácticas agrícolas consistieron en aplicar riegos con intervalos de 10 a 13 días en los primeros dos meses después del transplante, posteriormente cada 15 a 22 días por la presencia de lluvias; la eliminación de malezas se realizó en forma manual y por el método químico (Glifosato 10 mL L^{-1} agua), eliminación manual de las hojas inferiores y brotes laterales en los primeros cuatro meses de crecimiento de las plantas. Para el control de ácaros se aplicó Dicofol (1.5 mL L^{-1} agua), azufre elemental (4 g L^{-1} agua) o Abamectina (0.25 mL L^{-1} agua); asimismo, se aplicaron los plaguicidas Endosulfán (2 mL L^{-1} agua), Imidaclopric (0.5 mL L^{-1} agua), Dimetoato o Metamidofos (1.0 mL L^{-1} agua) para el control de la mosca blanca (*Aleurotrixus* sp.). Durante la época de lluvias, se observó muerte de flores y frutos recién formados, por lo que se asperjó periódicamente el Benomilo, Tiabendazol o Carbendazim en dosis de 1.0 g L^{-1} agua.

Variables Evaluadas

Altura de planta y diámetro de tallo. La altura de las plantas se midió con un flexómetro de 3 m de longitud, las medidas se tomaron a partir de la base del tallo hasta la yema apical, efectuándose tres mediciones durante el crecimiento de la planta: La primera a 86 días después de la plantación (7 de junio de 2000), la segunda a 121 días (11 de julio de 2000) y la tercera a 156 días (10 agosto 2000). En las mismas fechas, también se midió el diámetro del tallo con un vernier metálico, a 10 cm de la base del tallo.

Número de frutos deformes. Se contabilizaron y eliminaron aquellos frutos con deformaciones el 15 de junio y el 15 de julio del 2000 (15 y 45 días después de la floración, respectivamente).

Cuadro 2. Dosis de fertilizante mineral aplicado de acuerdo con la etapa fenológica en plantas de papaya.

Etapa fenológica	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	18-46-00	K_2SO_4	Zn	Mg	Mn	Fe	B
	----- g planta ⁻¹ -----							
Vegetativa	430	68	88	6	5	5	4	3
Floración	125	136	88	0	0	0	0	0
Producción	183	68	175	6	5	5	4	3

Número de frutos y altura al primer fruto. Se determinó la altura al primer fruto a partir de la base del tallo, así como el número de frutos en la axila de ocho hojas (sección inferior), el número de frutos en las siguientes ocho hojas (sección media) y el número de frutos en las siguientes ocho hojas inmediatas (sección superior).

Rendimiento y producción total. A partir del momento en que maduró el primer fruto, se contabilizó el número de éstos por planta. La cosecha se inició el 19 de octubre del 2000, registrándose la producción en kg de fruta planta⁻¹ hasta fines de enero del 2001.

Análisis nutrimental. Se tomaron cinco muestras de hojas recién maduras fisiológicamente, para cada factor y nivel evaluado a 10 meses después del trasplante (13 de enero del 2001) a fin de analizar las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn, Fe y B. El N se determinó mediante la metodología de Microkjeldahl (Alcalde *et al.*, s/f); P por el método Vanadato-Molibdato amarillo (Olsen *et al.*, 1954); K por emisión, mientras que los elementos Ca, Mg, Cu, Zn, Mn y Fe se analizaron con el espectrofotómetro de absorción atómica (Chapman y Pratt, 1961). El B se analizó mediante el método de azometina-H (Enríquez, 1989).

Diseño experimental. Se consideraron todas las combinaciones posibles de los factores: (a) fertilización orgánica, (b) fertilización mineral al suelo y (c) fertilización foliar, con niveles cada uno de ellos [sin (=0) y con (=1) aplicación], generando un factorial 2³, alojado en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones de cada tratamiento.

Análisis estadístico. Los datos obtenidos se analizaron con SAS System® (SAS Institute, 1997), partiendo la variación de tratamientos en los siete efectos factoriales posibles, cada uno con un grado de

libertad. A las variables con efectos factoriales significativos se les aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al no obtenerse efectos significativos de las interacciones generadas por el factorial 2³, se presentan únicamente los efectos de los factores principales: fertilización orgánica, fertilización mineral al suelo y fertilización foliar, en forma independiente.

Al comparar el factor materia orgánica (gallinaza) con y sin aplicación, se aprecia que no hubo diferencias significativas en las variables altura y diámetro de tallo a 86, 121 y 156 días después de la plantación; asimismo, las variables altura al primer fruto y cantidad de frutos deformes en el cultivo de la papaya no estuvieron influenciadas por la aplicación de fertilizante orgánico en comparación con aquellas plantas que no recibieron dicho tratamiento (Cuadro 3). Este mismo comportamiento se observó al comparar aquellas plantas con o sin el fertilizante foliar (Fertiquel Combi®) (Cuadro 4). Sin embargo, las plantas que recibieron el tratamiento de fertilización mineral al suelo fueron estadísticamente diferentes, comparadas con aquellas sin fertilización para los tres periodos y variables mencionadas. Las plantas con fertilización mineral presentaron un crecimiento más acelerado, comparado con aquellas sin fertilización mineral, con 32, 26 y 15%, a 86, 121 y 156 días después de establecidas, respectivamente (Cuadro 5).

De acuerdo con los resultados del Cuadro 5, el crecimiento en diámetro de tallo a 86 días de desarrollo resultó muy alto para las plantas de papaya con fertilización mineral (3.7 cm), comparadas con aquellas sin este tipo de fertilización (2.6 cm). Esta

Cuadro 3. Altura de planta y diámetro de tallo a 86, 121 y 156 días después de plantación, altura al primer fruto y número de frutos deformes, en plantas de papaya con y sin fertilización orgánica. Medias del efecto factorial.

Factor	Nivel	Días después de plantación						Altura al primer fruto	Frutos deformes	
		86			121					156
Fertilización		Altura de planta			Diámetro de tallo			cm	planta ⁻¹	
		----- cm -----								
Orgánica	0	56 a ¹	98 a	148 a	3.4 a	7.3 a	9.5 a	46.46 a	2.27 a	
	1	61 a	108 a	141 a	3.1 a	6.4 a	8.8 a	46.27 a	2.03 a	
DMS		10.02	15.42	13.96	0.71	1.19	0.86	2.86	1.67	
CV		47.26	32.34	23.04	58.19	41.37	30.54	15.08	44.67	

¹Medias con la misma letra por columna son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). DMS = diferencia mínima significativa; CV = coeficiente de variación en %.

Cuadro 4. Altura de planta y diámetro de tallo a 86, 121 y 156 días después de plantación, altura al primer fruto y número de frutos deformes, en plantas de papaya con y sin fertilización foliar. Medias del efecto factorial.

Factor	Nivel	Días después de plantación			86	121	156	Altura al primer fruto	Frutos deformes
		86	121	156					
Fertilización		Altura de planta			Diámetro de tallo				
		cm			cm			cm	planta ⁻¹
Foliar	0	57 a [†]	102 a	143 a	3.2 a	6.8 a	8.9 a	46.83 a	2.44 a
	1	60 a	103 a	147 a	3.3 a	6.9 a	9.4 a	45.90 a	1.85 a
DMS		10.02	15.40	13.95	0.86	1.19	0.86	2.84	1.66

[†] Medias con la misma letra por columna son estadísticamente iguales (Tukey P ≤ 0.05). DMS = diferencia mínima significativa.

Cuadro 5. Altura de planta y diámetro de tallo a 86, 121 y 156 días después de plantación, altura al primer fruto y número de frutos deformes, en plantas de papaya con y sin fertilización mineral al suelo. Medias del efecto factorial.

Factor	Nivel	Días después de plantación			86	121	156	Altura al primer fruto	Frutos deformes
		86	121	156					
Fertilización		Altura de planta			Diámetro de tallo				
		cm			cm			cm	planta ⁻¹
Mineral	0	50 b [†]	90 b	133 b	2.6 b	5.9 b	8.3 b	47.20 a	2.17 a
	1	66 a	113 a	153 a	3.7 a	7.6 a	9.8 a	44.96 a	2.06 a
DMS		10.06	15.55	14.14	0.71	1.20	0.87	2.93	1.71

[†] Medias con la misma letra por columna son estadísticamente iguales (Tukey P ≤ 0.05). DMS = diferencia mínima significativa.

respuesta permite asumir que la aplicación oportuna de los elementos minerales incrementa el desarrollo de la planta en altura y vigor, evitando así la caída de plantas con alta producción.

Los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con los obtenidos por Cripps y Allan (1997), quienes indicaron que dosis altas de N, P y K resultan en un crecimiento más rápido de la planta. Purohit (1977) encontró diferencias en la altura de las plantas de papaya, debido a la fertilización con N y P.

La altura de la planta estuvo relacionada con el diámetro del tallo, es decir, al incrementar la altura, aumentó el grosor del tallo. De acuerdo con Brazante (1985), este comportamiento se debe al efecto del N, el cual favorece el crecimiento vegetativo, en tanto que el P regula el metabolismo de los carbohidratos proporcionando un mayor aporte de fotosintatos al parénquima que funciona como reservorio; por otro lado, el K interviene en la formación de glúcidos y ejerce una influencia sobre el aumento de diámetro del tallo.

En el cultivo de la papaya cv. Maradol, algunos frutos muestran deformaciones, atribuidas principalmente a las condiciones climáticas y a deficiencias nutrimentales. Con relación al clima, se ha señalado que a temperaturas menores que 20 °C, 15% de frutos originados de flores carpeloides son deformes; asimismo, altitudes superiores a 450 m dan

origen a frutos deformes (Marteletto *et al.*, 1997). Con respecto a las deficiencias nutrimentales, se ha establecido que una deficiencia de B en condiciones de campo ocasiona la aparición de frutos mal formados y una exudación de látex en la epidermis de los frutos en crecimiento (Wang y Ko, citados por Manica, 1982). Es de señalar que, al eliminar los frutos deformes, la planta vuelve a fructificar en el mismo sitio.

Cabe señalar que la altura promedio al primer fruto (47 cm), observado en las plantas de papaya con los diferentes factores evaluados, mostró un comportamiento similar al indicado por Cituk *et al.* (1996) en papaya 'Maradol', cultivada en Yucatán (50 cm). En cambio, Mirafuentes (1997) indicó una altura al primer fruto de 70 cm para el mismo cultivar establecido en Tabasco.

Tomando en consideración que la planta de papaya presenta una filotaxia de 3/8, se analizó la cantidad de frutos presentes en tres secciones de ocho hojas. Los resultados mostraron que no hubo efecto significativo por la aplicación de gallinaza, comparado con plantas sin dicho fertilizante orgánico; asimismo, el rendimiento obtenido en las plantas de papaya con fertilización orgánica no mostró diferencia significativa con aquél en plantas sin este tratamiento (Cuadro 6). Resultados similares se observaron al comparar los dos niveles de fertilización foliar (Cuadro 7). Sin embargo, las plantas que recibieron

Cuadro 6. Número de frutos en tres secciones de la copa, número de frutos y rendimiento del cultivo de la papaya con y sin fertilización orgánica. Medias del efecto factorial.

Factor Fertilización	Nivel	Número de frutos (sección)			Frutos	Rendimiento	
		Inferior	Medio	Superior		planta ⁻¹	kg planta ⁻¹
Orgánica	0	4.29 a [†]	4.57 a	2.97 a	20.38 a	17.02 a	27.23 a
	1	4.71 a	4.60 a	3.00 a	21.48 a	16.45 a	26.32 a
DMS		0.87	0.67	0.80	2.86	2.12	3.59
CV		67.44	76.36	98.26	62.26	69.50	69.50

[†]Medias con la misma letra por columna son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). DMS = diferencia mínima significativa; CV = coeficiente de variación en %.

Cuadro 7. Número de frutos en tres secciones de la copa, número de frutos y rendimiento del cultivo de la papaya con y sin fertilización foliar. Medias de efectos factoriales.

Factor Fertilización	Nivel	Número de frutos (sección)			Frutos	Rendimiento	
		Inferior	Medio	Superior		planta ⁻¹	kg planta ⁻¹
Foliar	0	4.43 a [†]	4.50 a	2.87 a	20.83 a	16.10 a	25.75 a
	1	4.59 a	4.68 a	3.11 a	21.08 a	17.46 a	27.94 a
DMS		0.87	0.67	0.80	2.86	2.11	3.38
CV		67.44	76.36	98.26	62.26	69.50	69.50

[†]Medias con la misma letra por columna son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). DMS = diferencia mínima significativa; CV = coeficiente de variación en %.

fertilización mineral fueron estadísticamente superiores a aquéllas sin este insumo en las secciones inferior y medio de la copa; no así para la sección superior, donde fueron estadísticamente iguales (Cuadro 8).

Al comparar la cantidad de frutos en las tres secciones evaluadas, se observó que las plantas con fertilizante mineral presentaron el mayor promedio de fruta con 5.14, 4.79 y 3.17 frutos planta⁻¹, en tanto que aquellas plantas sin este insumo presentaron los valores más bajos con 3.74, 4.28 y 2.68 frutos planta⁻¹ en promedio (Cuadro 8). Por otra parte, las plantas con fertilización mineral alcanzaron un rendimiento promedio de 28.60 t ha⁻¹, estadísticamente superior a 24.57 t ha⁻¹ en plantas sin fertilización mineral. Los

resultados obtenidos en la presente investigación indican que la fertilización mineral no mejora únicamente el crecimiento vegetativo, sino también el rendimiento del cultivo. Esto concuerda con lo citado por Mederos y Orquín (1983) y Mosqueda y Molina (1973), quienes señalaron que el diámetro del tallo es una de las variables morfológicas correlacionadas con el rendimiento de fruta y número de frutos planta⁻¹.

En la presente investigación, las interacciones entre los factores evaluados no mostraron diferencias significativas en las variables altura de planta, diámetro de tallo (Cuadro 9), altura al primer fruto, número de frutos en las secciones inferior, media y superior, número de frutos planta⁻¹, número de frutos deformes planta⁻¹ y rendimiento (Cuadro 10).

Cuadro 8. Número de frutos en tres secciones de la copa, número de frutos y rendimiento del cultivo de la papaya con y sin fertilización mineral al suelo. Medias del efecto factorial.

Factor Fertilización	Nivel	Número de frutos (sección)			Frutos	Rendimiento	
		Inferior	Medio	Superior		planta ⁻¹	kg planta ⁻¹
Mineral	0	3.74 b [†]	4.28 b	2.68 a	18.19 b	15.36 b	24.57 b
	1	5.14 a	4.79 a	3.17 a	23.17 a	17.88 a	28.60 a
DMS		0.87	0.69	0.82	2.87	2.13	3.40
CV		67.44	76.36	98.26	62.26	69.50	69.50

[†]Medias con la misma letra por columna son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). DMS = diferencia mínima significativa; CV = coeficiente de variación en %.

Cuadro 9. Niveles de significancia actual de los efectos factoriales (Pr > F de SAS).

FV	GL	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Bloque	2	0.630 ns	0.584 ns	0.015 *	0.629 ns	0.308 ns	0.003 **
A	1	0.233 ns	0.134 ns	0.213 ns	0.353 ns	0.190 ns	0.056 ns
B	1	0.003 **	0.005 **	0.007 **	0.004 **	0.005 **	0.002 **
AxB	1	0.348 ns	0.261 ns	0.347 ns	0.550 ns	0.243 ns	0.152 ns
C	1	0.624 ns	0.959 ns	0.487 ns	0.860 ns	0.794 ns	0.236 ns
AxC	1	0.378 ns	0.725 ns	0.517 ns	0.515 ns	0.609 ns	0.852 ns
BxC	1	0.753 ns	0.742 ns	0.266 ns	0.902 ns	0.786 ns	0.695 ns
AxBxC	1	0.742 ns	0.512 ns	0.578 ns	0.574 ns	0.542 ns	0.317 ns
CME		761.53	1109.98	1116.44	3.54	8.10	7.84
CV		47.27	32.34	23.04	58.19	41.38	30.54

Factor A = fertilización orgánica, Factor B = fertilización mineral al suelo, Factor C = fertilización foliar; CME = cuadrado medio del error, CV = coeficiente de variación en %. V1, V2 y V3= altura de planta a 86, 121 y 156 días después de plantación, respectivamente; V4, V5 y V6 = diámetro de tallo a 86, 121 y 156 días después de plantación, en ese orden; * = significancia a 5%; ** = significancia a 1%; ns = no significativo.

Cuadro 10. Niveles de significancia actual de los efectos factoriales (Pr > F de SAS).

FV	GL	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Bloque	2	0.175 ns	0.088 ns	0.261 ns	0.760 ns	0.015 *	0.812 ns	0.769 ns
A	1	0.862 ns	0.264 ns	0.943 ns	0.883 ns	0.258 ns	0.821 ns	0.572 ns
B	1	0.227 ns	0.003 **	0.037 *	0.233 ns	0.002 **	0.157 ns	0.046 *
A*B	1	0.595 ns	0.452 ns	0.676 ns	0.867 ns	0.301 ns	0.945 ns	0.761 ns
C	1	0.241 ns	0.834 ns	0.795 ns	0.822 ns	0.935 ns	0.720 ns	0.182 ns
A*C	1	0.857 ns	0.450 ns	0.225 ns	0.104 ns	0.274 ns	0.328 ns	0.956 ns
B*C	1	0.444 ns	0.292 ns	0.059 ns	0.140 ns	0.629 ns	0.413 ns	0.828 ns
A*B*C	1	0.813 ns	0.770 ns	0.397 ns	0.506 ns	0.314 ns	0.358 ns	0.828 ns
CME		48.85	9.25	12.27	8.60	170.16	41.48	347.23
CV		15.08	67.44	76.37	98.26	62.26	44.68	69.50

Factor A = fertilización orgánica, Factor B = fertilización mineral al suelo, Factor C = fertilización foliar; CME = cuadrado medio del error, CV = coeficiente de variación en %. V1 = altura al primer fruto, V2, V3 y V4 = número de frutos en las secciones inferior, media y superior, respectivamente; V5 = número de frutos planta⁻¹; V6 = número de frutos deformes planta⁻¹; V7 = rendimiento; * = significancia a 5%; ** = significancia a 1%; ns = no significativo.

Los resultados del análisis foliar (Cuadro 11) revelaron que hubo diferencias significativas en las concentraciones de Ca y B en plantas con fertilización orgánica con 22.4 y 0.33 µg g⁻¹ de peso seco. Asimismo, la concentración de Mg resultó significativamente mayor en plantas con fertilización foliar (11.8 µg g⁻¹) (Cuadro 12).

Con relación a las concentraciones de macro y microelementos, sólo la concentración de B resultó con diferencias significativas en plantas con fertilización mineral (0.130 µg g⁻¹) con respecto a aquéllas sin el tratamiento respectivo (Cuadro 13). En el presente trabajo, las interacciones entre los factores evaluados para los elementos analizados no mostraron diferencias significativas (Cuadro 14).

De acuerdo con Benton *et al.* (1991), la concentración de N se encuentra en un valor alto (> 2.5%), P (0.22 a 0.40%), Ca (1 a 3%) y Mg (0.4 a 1.2%) en el intervalo óptimo y K en un valor deficiente (2.8 a 3.2%). La concentración de Fe y Cu se encuentran en el valor alto con >100 y >10 µg g⁻¹,

respectivamente, Zn y Mn en el intervalo óptimo con 15 a 40 y 20 a 150 µg g⁻¹, en el mismo orden, y B en el valor bajo (< 20 µg g⁻¹) (Benton *et al.* 1991).

Con base en los resultados obtenidos, puede asumirse que la respuesta de las plantas al uso de la materia orgánica (gallinaza), con relación a las variables evaluadas, no fue satisfactoria, ya que de acuerdo con lo indicado por He *et al.* (1992), Richard (1992), Swietlik (1993) y Ozores-Hampton *et al.* (1994), la materia orgánica aumenta el crecimiento y rendimiento de este cultivo, debido a que mejora las propiedades físicas del suelo e incrementa la capacidad de retención de agua y nutrientes. Basso-Figuera *et al.* (1995) no observaron diferencias significativas en altura, diámetro, rendimiento y concentración de la mayoría de los nutrientes en papaya, al aplicar composta en cantidades de 0, 75 y 150 t ha⁻¹. Esto último sugiere que factores como el tipo de suelo y el tiempo requerido para que la materia orgánica se haga disponible a la planta, dificultan una respuesta positiva de esta forma de fertilización.

Cuadro 11. Concentración de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn, Fe y B en hojas de plantas de papaya con y sin fertilización orgánica. Medias del efecto factorial.

Factor Fertilización	Nivel	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe	B
----- $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco -----											
Orgánica	0	96.3a [†]	3.0a	24.8a	18.5 b	10.9 a	9.7 a	22.6 a	29.9 a	169 a	0.114 b
	1	58.3a	3.2a	27.1a	22.4 a	11.4 a	10.3 a	23.8 a	30.0 a	163 a	0.133 a
DMS		5.43	0.04	0.41	0.36	0.12	0.64	3.50	4.98	35.02	0.009
CV		74.63	11.98	16.78	18.65	11.76	6.78	16.01	17.66	22.45	7.40

[†] Medias con la misma letra por cada columna son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). DMS = diferencia mínima significativa; CV = coeficiente de variación en %.

Cuadro 12. Concentración de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn, Fe y B en hojas de plantas de papaya con y sin fertilización foliar. Medias del efecto factorial.

Factor Fertilización	Nivel	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe	B
----- $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco -----											
Foliar	0	89.9 a [†]	3.2 a	27.1 a	20.4 a	10.4 b	10.0 a	24.0 a	30.2 a	161 a	0.120 a
	1	64.8 a	3.0 a	24.7 a	20.4 a	11.8 a	9.9 a	22.5 a	29.7 a	171 a	0.127 a
DMS		5.43	0.04	0.41	0.36	0.12	0.64	3.50	4.98	35.02	0.009
CV		74.63	11.98	16.78	18.65	11.76	6.78	16.01	17.66	22.45	7.40

[†] Medias con la misma letra por cada columna son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). DMS = diferencia mínima significativa; CV = coeficiente de variación en %.

Cuadro 13. Concentración de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn, Fe y B en hojas de plantas de papaya con y sin fertilización mineral al suelo. Medias del efecto factorial.

Factor Fertilización	Nivel	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe	B
----- $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco -----											
Mineral	0	64.7 a [†]	3.1 a	25.4 a	21.8 a	10.5 a	10.0 a	22.3 a	30.0 a	167 a	0.117 b
	1	90.0 a	3.1 a	26.5 a	19.0 a	11.7 a	10.0 a	24.2 a	29.8 a	165 a	0.130 a
DMS		5.43	0.04	0.41	0.36	0.12	0.64	3.50	4.98	35.02	0.009
CV		74.63	11.98	16.78	18.65	11.76	6.78	16.01	17.66	22.45	7.40

[†] Medias con la misma letra por cada columna son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$). DMS = diferencia mínima significativa; CV = coeficiente de variación en %.

Con respecto a los resultados obtenidos con el fertilizante foliar (Fertiquel Combi® + nitrato de calcio), puede asumirse que la baja respuesta en las variables evaluadas se debe a que estos nutrimentos son absorbidos vía foliar, influyendo más en las características del fruto que en el desarrollo y la producción de la planta. Sin embargo, aunque estos fertilizantes no substituyen a la fertilización edáfica, que es la forma natural de transporte y absorción nutrimental, Ghanta *et al.* (1992), al asperjar soluciones conteniendo B (0.1%), Mn (0.25%) y Cu (0.25%) en papaya, encontraron que todos los tratamientos con micronutrimentos mejoraron el crecimiento de las plantas, el rendimiento y la calidad de los frutos.

El efecto significativo obtenido de la fertilización mineral sobre altura de planta, diámetro del tallo, número de frutos y rendimiento, revela la alta demanda nutrimental para un óptimo crecimiento y producción que requieren las plantas de papaya. En diversos estudios, se ha observado la respuesta benéfica por la aplicación de fertilizantes minerales; al respecto, Bertuzzi *et al.* (1996) señalaron diferencias significativas en el rendimiento de papaya al incrementar las dosis de N, P y K, ya que con la aplicación de 200 g de N, 64 g de P_2O_5 y 166 g de K_2O planta⁻¹, obtuvieron un rendimiento promedio de 16.3 t ha⁻¹, comparado con 7.18 t ha⁻¹ en el testigo sin dichos fertilizantes. Por su parte, Cripps y Allan (1997), al utilizar un experimento factorial con N, P y

Cuadro 14. Niveles de significancia actual de los efectos factoriales (Pr > F de SAS).

FV	GL	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe	B
A	1	0.15 ns	0.19 ns	0.24 ns	0.04 *	0.35 ns	0.70 ns	0.46 ns	0.96 ns	0.70 ns	0.00 **
B	1	0.32 ns	0.83 ns	0.56 ns	0.11 ns	0.06 ns	0.78 ns	0.24 ns	0.93 ns	0.89 ns	0.00 **
A*B	1	0.54 ns	0.35 ns	0.09 ns	0.79 ns	0.06 ns	0.08 ns	0.53 ns	0.47 ns	0.69 ns	0.67 ns
C	1	0.32 ns	0.61 ns	0.21 ns	0.99 ns	0.03 *	0.10 ns	0.35 ns	0.81 ns	0.52 ns	0.11 ns
A*C	1	0.64 ns	0.75 ns	0.19 ns	0.68 ns	0.35 ns	0.27 ns	0.96 ns	0.27 ns	0.85 ns	0.67 ns
B*C	1	0.09 ns	0.83 ns	0.28 ns	0.77 ns	0.36 ns	0.62 ns	0.67 ns	0.78 ns	0.76 ns	0.07 ns
A*B*C	1	0.13 ns	0.92 ns	0.50 ns	0.74 ns	0.06 ns	0.12 ns	0.96 ns	0.84 ns	0.68 ns	0.06 ns
CME		33.30	0.01	0.19	0.15	0.02	0.46	13.81	27.96	1384.1	0.001
CV		74.64	11.80	16.78	18.65	11.76	6.78	16.01	17.66	22.45	7.40

Factor A = fertilización orgánica, Factor B = fertilización mineral al suelo, Factor C = fertilización foliar; CME = cuadrado medio del error, CV = coeficiente de variación en %. * = significancia a 5%; ** = significancia a 1%; ns = no significativo.

K más tres testigos sin N, P y K, respectivamente, en papaya 'Solo' en Hawai, encontraron que las altas dosis de N, P y K coincidieron con las plantas con crecimiento más rápido, alta retención de frutos, así como mayor área foliar y peso fresco. Basados en las cantidades de fertilizante aplicado en el experimento, estos autores indicaron que un cultivo comercial de 100 t requiere aproximadamente 250 kg de N, 20 kg de P y 340 kg de K, de los cuales 112 kg de N, 7 kg de P y 220 kg de K serán encontrados en el fruto.

CONCLUSIONES

- Los resultados permiten concluir que la fertilización mineral en plantas de papaya 'Maradol' aumenta la altura de éstas, el diámetro del tallo, el número de frutos (total y de los localizados en las secciones inferior y medio de la planta) y rendimiento, no así la fertilización orgánica y foliar.
- La fertilización orgánica, mineral y foliar no influyó la producción de frutos deformes, número de frutos en la sección superior y la altura en la que inicia la fructificación de la planta.
- No se observaron diferencias significativas en la concentración de N, P, K, Fe, Cu, Zn y Mn, al comparar las variables y niveles evaluados.
- La fertilización foliar aumenta el contenido de Mg en las hojas del cultivar de papaya Maradol, asimismo la fertilización orgánica con base en gallinaza incrementa la concentración de Ca y B. La aplicación de fertilización mineral también incrementa la concentración de B.

LITERATURA CITADA

Alcalde B., S., G. Alcántar G. y J.L Tirado T. s/f. Análisis vegetal, una herramienta de diagnóstico. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Basso-Figuera, C., B. Schaffer, J.H. Crane, A.M. Colls y H.H. Bryan. 1995. Mineral nutrient content, growth, and yield of papaya (*Carica papaya* L.) as influenced by trench depth and municipal solid waste compost. *Trop. Agric.* 72(3): 231-235.

Benton Jr., J., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide. Micro-macropublishing. Athens, GA.

Bertuzzi, S.M., V.A. Rodríguez y S.M. Mazza de Gaiaad. 1996. Respuesta del mamon (*Carica papaya*) a la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio en un suelo arenoso del noroeste correntino. *Hort. Argentina* 15(38): 62-66.

Bouyoucos, G.L. 1936. Direction for making mechanical analysis of soils by the hidrometer method. *Soil Sci.* 42: 3.

Brazante, B. 1985. Influence of phosphate fertilization on the growth and nutrient status of micropropagation apple infected with endomycorrhizal fungi during the wearing stage. *Agronomie* 12: 841-845.

Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. In: C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy* 9. American Society of Agronomy. Madison, WI.

Cadahia, L.C. y J.J.M. Lucena. 2000. Diagnóstico de nutrición y recomendaciones de abonado. pp. 173-246. In: Cadahia, L.C. *Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales*. 2a edición. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. pp. 891-901. In: C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy* 9. American Society of Agronomy. Madison, WI.

Chapman, H.D. y P.F. Pratt. 1961. *Methods of analysis for soil, plants and waters*. Dept. Soil Science and Agric. Eng. University of California. Riverside, CA.

Cituk, C.D.E., J.M.S. Tun, A.R. Trejo, L.G. Borges, M.F. Soria y R.M. Arzápalo. 1996. Producción del papaya (*Carica papaya* L.) variedad Maradol para Yucatán. Resultados preliminares. Instituto Tecnológico Agropecuario No. 2. Centro de Investigación y Graduados Agropecuarios. Merida, Yucatán, México.

CNA. Comisión Nacional del Agua. 2001. Datos climatológicos correspondientes al año 2000. Oficina de Hidrometría del Distrito de Riego 097. Apatzingán, Michoacán, México.

Cottenie, A. 1980. Los análisis de suelos y plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes. *Boletín* 38 de suelos. FAO. Roma, Italia.

Cripps, R. y P. Allan. 1997. Effects of N, P and K on 'Honey Gold' papaws. *J. Southern African Soc. Hort. Sci.* 7(2): 62-64.

- Enriquez R., S.A. 1989. Análisis de boro en suelos y plantas mediante el método de azometina-H. *Terra* 7: 13-20.
- Etchevers B., J.D., W.G. Espinoza y Y.E. Riquelme. 1971. Manual de fertilidad y fertilizantes. 2a edición. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. Chillán, Chile.
- Etchevers B., J.D., G. Goyjberg R., M. López R., J. Padilla C., J. Alvarado L., C. Hidalgo M., Ma. L. Cruz H., A. Guerrero P., B. Gutiérrez y E. Miranda C. 2000. Manual de procedimientos analíticos para análisis de suelos y plantas de laboratorio de fertilidad de suelos. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- FAO. Food and Agriculture Organization. 1999. Anuario de producción y exportación de papaya. Roma, Italia.
- García M., E. 1981. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Ghanta, P.K., R.S. Dhua y S.K. Mitra. 1992. Response of papaya to foliar spray of boron, manganese and copper. *Hort. J.* 5: 43-48.
- He, X.T., S.J. Traina y T.J. Logan. 1992. Chemical properties of municipal solid waste composts. *J. Environ. Qual.* 21: 318-329.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1997. pp. 22-23. *In: Anuario estadístico del Comercio Exterior de los Estados Unidos Mexicanos 1996. Exportación. Aguascalientes, Aguascalientes, México.*
- Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Trad. al español por J. Beltrán M. Omega. Barcelona, España.
- Janis, W. y S. Schnitzler. 1998. Survey of fresh papaya exports. *World Hort. Trade and US Export Opportunities* 5: 44-46.
- Lindsay, W.L. y W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 421-428.
- Maldonado T., R., J.D. Etchevers B., G. Alcántar G., J. Rodríguez A. y M.T. Colinas L. 2001. Estado nutrimental del limón mexicano en suelos calcimórficos. *Terra* 19: 163-174.
- Manica, I. 1982. *Fruticultura tropical: Mamão*. Agronomica Ceres. São Paulo, Brasil.
- Marteletto, P.L.A., J.F.M. Maldonado, A. Vieira, S.G. Fernandes, S.M.P. de Carvalho, J.A.S. da Cruz, R.A. da Costa, L.A.A. de Oliveira y W.R.M. Sarmento. 1997. A cultura do mamão. Perspectivas, tecnologías e viabilidade. Folleto 37. Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- Mederos, E. y J. Orquín. 1983. Estudio preliminar de la influencia del diámetro del tallo sobre la producción de flores y frutos en la planta de fruta bomba var. Maradol Roja. *Revista Centro Agrícola* 12(3): 89.
- Mirafuentes, H.F. 1997. Manual para producir papaya en Tabasco. Folleto para productores. ISPROTAB. Gobierno del Estado de Tabasco. INIFAP Produce. Huimanguillo, Tabasco.
- Moreno, D.R. 1978. Clasificación de pH del suelo, contenido de sales y nutrientes asimilables. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F.
- Mosqueda V., R. y J.G. Molina. 1973. Estudio de caracteres correlacionados y análisis de componentes de rendimiento empleando coeficientes de sendero en *Carica papaya* L. *Agrociencia* 11: 3-14.
- Olsen, O., R.V. Cole, F.S. Watanabe y C.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. *US Dept. Agr. Circ.* 939: 1-19.
- Olsen, S.R. y L.A. Dean. 1965. Phosphorus. pp. 1035-1049. *In: C.A. Black (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9. American Society of Agronomy. Madison, WI.*
- Ozores-Hampton, M., B. Schaffer, H.H. Bryan y E.A. Hanlon. 1994. Nutrient concentrations, growth, and yield of tomato and squash in municipal solid-waste-amended soil. *HortScience* 29: 785-788.
- Pérez-López, A. y R.D. Reyes-Jurado. 1983. Effect of nitrogen, boron and lime on *Carica papaya*. *J. Agric. (University of Puerto Rico)* 67(3): 181-187.
- Purohit, A.G. 1977. Response of papaya (*Carica papaya* L.) to nitrogen, phosphorus and potassium. *Indian J. Hort.* 34(4): 350-353.
- Richard, T.L. 1992. The key to successful MSW compost marketing. *Biocycle* 33: 62-65.
- Richards, L.A. (ed.). 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 6a edición. Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América. Limusa. México, D.F.
- Sánchez G., P. 1998. La fertilización del mango. pp. 11-12. *In: El mango y su manejo integrado en Michoacán. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.*
- SAS Institute. 1997. SAS/STAT User's guide. Release 6.3. Cary, NC.
- SG (Secretaría de Gobernación) y Gobierno del Estado de Michoacán. 1988. Los municipios de Michoacán. pp. 43-46. *In: Colección: Enciclopedia de los municipios de México. México, D.F.*
- Sri, S.H., I. Idham y S. Koswara. 1995. The effect of K levels on the yield and quality of fruit and crude papain from 3 papaya cultivars. *Acta Hort.* 379: 83-88.
- Swietlik, D. 1993. Waste product utilization and disposal in horticultural crops. *HortTechn.* 3: 156.
- Tavera S.G., G. 1985. Criterios para la interpretación y aprovechamiento de los reportes de laboratorio para las áreas de asistencia técnica. Publicación 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Delegación La Laguna. Matamoros, Coahuila, México.
- Thomas, O.S.L. 1990. Problems associated with papaya production in Jamaica. *Proc. Interam. Soc. Trop. Hort.* 34: 139-144.
- Trinidad S., A. y D. Rosas C. 1994. Clasificación generalizada de algunas determinaciones químicas de suelo y tejido vegetal, útiles para la interpretación de resultados en fertilidad de suelos. Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Vieira-Neto, V.R.D. 1995. Green manuring of papaya trees. *Acta Hort.* 370: 117-119.
- Viets, F.G. y W.L. Lindsay. 1973. Testing soil for zinc, copper, manganese and iron. pp. 151-172. *In: Walsh, M.L. y D.B. James. Soil Testing and Plant Anal. Soil Science Society of America. Madison, WI.*

**NUTRICIÓN MINERAL ACOPLADA AL CRECIMIENTO (NUMAC):
NUTRICIÓN CON N PARA TOMATE EN INVERNADERO
1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO Y OBTENCIÓN DE PARÁMETROS
NUMAC-N Tomato: Mineral Nutrition Fit at Growth. The Nitrogen Nutrition in Tomato
Greenhouse Production**

1. Model Description and Parameters Adjust

**Sergio A. Enriquez-Reyes¹, Gabriel Alcántar-González², Javier Z. Castellanos-Ramos³,
Enrique Arjona Suárez², Diego González-Eguiarte⁴ e Ignacio Lazcano-Ferrat⁵**

RESUMEN

Se describe un modelo dinámico-funcional para la predicción y distribución de materia seca (MS) de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), cultivado en invernadero sin restricciones de estrés por agua, nutrientes, plagas y enfermedades. El modelo está constituido por un conjunto de relaciones empíricas entre la temperatura, la radiación incidente y la distribución alométrica de MS en conjunto con el concepto de eficiencia en uso de la radiación (EUR). El valor de EUR obtenido fue 2.36 g MJ⁻¹ de radiación fotosintéticamente activa interceptada (Q). Los valores de los coeficientes de distribución de MS entre los órganos de la planta varían en función de la etapa fenológica del cultivo. El principal factor limitativo en la estructura de este tipo de modelos es la descripción precisa de la tasa de expansión del área foliar para así simular, con mayor exactitud, la intercepción de la radiación por el dosel. No se descarta la posibilidad de ajustar los parámetros del modelo, sobre todo en lo que respecta a la simulación de expansión de área foliar y a los parámetros de distribución alométrica para otras variedades o hábitos de crecimiento del tomate. Este modelo se usará en conjunto con un modelo que simule la demanda de nitrógeno para definir un programa de fertilización con nitrógeno en fertirriego y disminuir el riesgo de lixiviación sin afectar la cantidad y calidad de la producción.

Palabras clave: Simulación, *Lycopersicon esculentum*, invernadero, biomasa, alométrica, fertirriego.

SUMMARY

A dynamic-functional tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) growth model for indeterminate varieties under a greenhouse production system is presented. Dry matter production is simulated by an energy approach of radiation use efficiency (RUE) and intercepted photosynthetic active radiation (Q). Dry matter partitioning is based on the allometric approach by dry matter allocation coefficients. The relation between Q and dry matter production resulted in a RUE of 2.36 g MJ⁻¹. The dry matter allometric coefficient was different in function of the crop phenology. A detailed leaf growth description is necessary to simulate intercepted radiation. The model will be incorporated with a nitrogen demand crop model to improve nitrogen efficiency in greenhouse production of tomato and to diminish the risk of nitrogen leaching.

Index words: Simulation, *Lycopersicon esculentum*, RUE, plant growth, allometric, fertigation.

INTRODUCCIÓN

El manejo eficiente de la agricultura intensiva requiere considerar los factores que condicionan el potencial de producción de los cultivos y sus interacciones. Prácticas como la fertilización con nitrógeno y el riego, deben ser definidas en relación con las condiciones del clima y del suelo, así como con las características endógenas del crecimiento del cultivo. La integración de estos factores bajo el enfoque de sistemas y apoyándose en modelos de simulación del crecimiento, es una aproximación que

¹ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Querétaro. Querétaro, México. (senrique@itesm.mx)

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

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Bajío. Celaya, Guanajuato. ⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Jalisco. Guadalajara, Jalisco, México.

⁵ Instituto de la Potasa y el Fósforo. Querétaro, México.

permite diseñar prácticas de manejo encaminadas a incrementar la productividad minimizando el impacto ambiental ocasionado por la actividad agrícola (Stockle *et al.*, 1994).

En los modelos de crecimiento, se requiere definir un conjunto de expresiones matemáticas de los procesos básicos del crecimiento de las plantas como son la producción, distribución y acumulación de la biomasa. La selección de los procesos y el detalle de descripción dependen del objetivo del modelo.

Una aplicación práctica de los modelos de simulación es que pueden utilizarse como fuente de información sobre el crecimiento de un cultivo la cual, a su vez, sirve de apoyo para la toma de decisiones sobre la conveniencia de realizar prácticas de manejo específicas, como: el control de clima de un invernadero, la dosificación y aplicación de fertilizantes y del agua; la predicción de la aparición de plagas y enfermedades; así como la planeación y predicción de la producción (Lentz, 1998). Por lo anterior, se da el continuo aumento en el interés de la modelación de la producción de biomasa en cultivos de importancia económica y social como las hortalizas en fertirriego o en invernadero (Heuvelink, 1995a; Gary *et al.*, 1998a).

Uno de los tipos de modelos que más impacto ha causado en el manejo de los cultivos son los modelos funcionales. En este tipo de modelos, también conocidos como compactos, empíricos o de caja negra, se busca representar algunos procesos esenciales del crecimiento de las plantas, sin tener la necesidad de describir los mecanismos que se realizan en dichos procesos. Para el caso del crecimiento de las plantas se considera como esenciales: la tasa de aparición de órganos, la producción, acumulación y distribución de materia seca en los órganos que forman la estructura de la planta, así como los procesos de expansión de área foliar y de la interceptación de radiación (Larsen, 1990; Heuvelink, 1995b; Marcelis *et al.*, 1998). Sin embargo, esta aproximación no se ha utilizado para la obtención de un modelo en el cultivo de tomate, aunque sí para otros cultivos como el trigo (Green, 1987), brócoli y lechuga (Kuziyakov *et al.*, 1996) y coliflor (Kage y Stützel, 1999).

Desde la perspectiva de la aplicación de los modelos, un modelo de simulación es útil si sus parámetros permanecen relativamente constantes bajo cambios en las condiciones de crecimiento de las plantas (Seginer y Iosolovich, 1998). Este requisito es fácil de alcanzar si los modelos constan de pocas

variables y se restringen a simular sólo aquellos procesos que son de importancia para el fenómeno en estudio. Ésta ha sido la principal ventaja de los modelos funcionales en relación con los mecanistas (Spitters, 1990).

Algunos modelos sobre el crecimiento del cultivo del tomate como el TOMGRO (Dayan *et al.*, 1993) y el TOMSIM (Heuvelink, 1996), son del tipo mecanista y constan de un gran número de variables (TOMGRO consta de 70 variables de estado). Estas dos características hacen que las predicciones a mediano y largo plazo sean poco precisas; además, constan de un gran número de parámetros de entrada, que la mayoría de las veces son difíciles de obtener por los productores. Dado lo anterior, estos modelos se utilizan para optimizar las condiciones de crecimiento dentro de un invernadero a intervalos de minutos en el tiempo de respuesta.

El objetivo del presente estudio fue obtener un modelo funcional y simplificado, del crecimiento potencial y de la distribución de materia seca del cultivo del tomate en invernadero en fertirriego y que presente las siguientes características: fácil de utilizar, los valores de los coeficientes de los modelos matemáticos tengan, en la medida de lo posible, una explicación biológica y que los valores de las variables de entrada sean fáciles de medir y obtener por los productores. Posteriormente, este modelo será unido a otro para simular la demanda de N por el cultivo en función de la producción de materia seca, los cuales, en conjunto, permitirán optimizar la aplicación de N disminuyendo el riesgo de pérdida por lixiviación y desnitrificación, aumentando la eficiencia en la absorción de N por el cultivo, con la consecuente disminución en el impacto ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estructura del Modelo

El modelo propuesto es del tipo funcional y se basa en la radiación interceptada por el dosel, la cual es utilizada para la biosíntesis de materia seca (Monteith, 1977). Esta aproximación relaciona los principales procesos físicos y biológicos que inciden en la producción de materia seca: por un lado, la radiación y la temperatura y, por otro, el crecimiento como un producto de la fotosíntesis y la respiración. El enlace entre estos dos procesos es a través del concepto de eficiencia de uso de la radiación (EUR) (Sinclair y Muchow, 1999). Para efectos del modelo,

se considera que en invernadero y con fertirriego, la producción de materia seca es condicionada principalmente, por la radiación interceptada y la temperatura (Challa y Bakker, 1996), mientras que los demás factores se encuentran con valores que no limitan la producción. La radiación incide directamente en el crecimiento (producción de materia seca) y la temperatura en el desarrollo (morfogénesis); este último es definido a partir de simpodios, en donde, para el caso del tomate en la etapa de crecimiento reproductivo, un simpodio representa cuatro nudos: tres correspondientes a hojas y uno que corresponde al racimo. Para el crecimiento vegetativo (primer simpodio) se consideran nueve hojas y un racimo, dando un total de 10 nudos.

Los procesos básicos en el modelo se presentan en forma esquemática en la Figura 1 y son: 1) Recepción y transmisión de la radiación hacia dentro del invernadero. 2) Intercepción de la radiación. 3) Conversión de la radiación interceptada en materia seca. 4) Distribución de materia seca en tallos, hojas y frutos.

Producción de Materia Seca

El modelo matemático que representa el componente de producción de materia seca (MS) es:

$$dMS / dt = Q \text{ (EUR)}$$

$$MS_i = \Sigma Q \text{ (EUR)}$$

Donde: EUR es uno de los parámetros a verificar, Q representa a la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el dosel en el período *i*. La cantidad de radiación que es interceptada es función de la radiación incidente sobre el invernadero (RadI), del coeficiente de transmisión (*t*) de la cubierta, del coeficiente de extinción de luz en el dosel (*k*) y del índice de área foliar (IAF) el cual es uno de los parámetros a simular. La función para el cálculo de Q es:

$$Q = \text{RadI} (t) (1 - e^{-k\text{IAF}})$$

La EUR se basa en la relación que existe entre la actividad fotosintética de las plantas y la radiación incidente en el dosel y se considera que es constante durante el ciclo del cultivo para genotipos con hábito de crecimiento indeterminado debido a que es estable en un amplio rango de IAF y del contenido de N en la hoja (Sinclair y Horie, 1989). Por su parte, Loomis y

Williams (1963) establecieron que esta relación es constante debido a la relación de la naturaleza cuántica de la radiación con la producción y acumulación de materia seca por las plantas. Por otro lado, la obtención de valores exactos de EUR es complicada debido a que todos aquellos factores que afectan la fotosíntesis y la respiración afectan, por lo tanto, el valor de EUR. Al respecto, Heuvelink (1996) reportó para el tomate una serie de valores de EUR que varían de 2.6 a 4.04 g MJ⁻¹ de RFA y que los valores comprendidos entre 2.6 y 3.43 son estadísticamente iguales; por lo tanto, y de acuerdo con los resultados obtenidos, sugiere utilizar un valor constante de 2.75 g MJ⁻¹ de Q. Asimismo, Challa *et al.* (1995) propusieron para el cultivo de tomate un valor de EUR de 3.0 g MJ⁻¹ de Q.

Distribución de la Materia Seca Total

Para la descripción de la distribución de la materia seca total entre las hojas, el tallo y los frutos se consideró la aproximación alométrica (Marcelis, 1993). La distribución de materia seca entre las diferentes estructuras en crecimiento (sinks metabólicos) de una planta es regulada por las mismas estructuras y la disponibilidad de asimilados no tiene ningún efecto sobre la cantidad a distribuir a cada estructura. Sin embargo, Ho (1996) reportó que para el caso del tomate, si la radiación no es un factor limitativo para la fotosíntesis, la producción es condicionada por el número y el tamaño de los frutos más que por la disponibilidad de fotoasimilados.

En la planta de tomate de hábito de crecimiento indeterminado, el desarrollo de ésta puede dividirse en dos etapas bien definidas: una etapa de crecimiento juvenil de relativamente pocos días de duración (45 a 60 días después de la siembra) y una etapa de reproducción que puede durar hasta más de 200 días. Durante esta última etapa, la formación de frutos es continua y si las condiciones de crecimiento no se alteran en forma significativa, la distribución de asimilados debe ser constante. La alometría descriptiva presenta una adecuada aproximación de la distribución de materia seca para los objetivos del modelo. Aunque es empírica, debido a que no tiene explicación de por qué la distribución de materia seca se da en una determinada proporción, es una forma sencilla de describir la distribución de materia seca, los coeficientes son fáciles de obtener y si las condiciones de crecimiento del cultivo se mantienen sin cambios significativos, puede establecerse que los

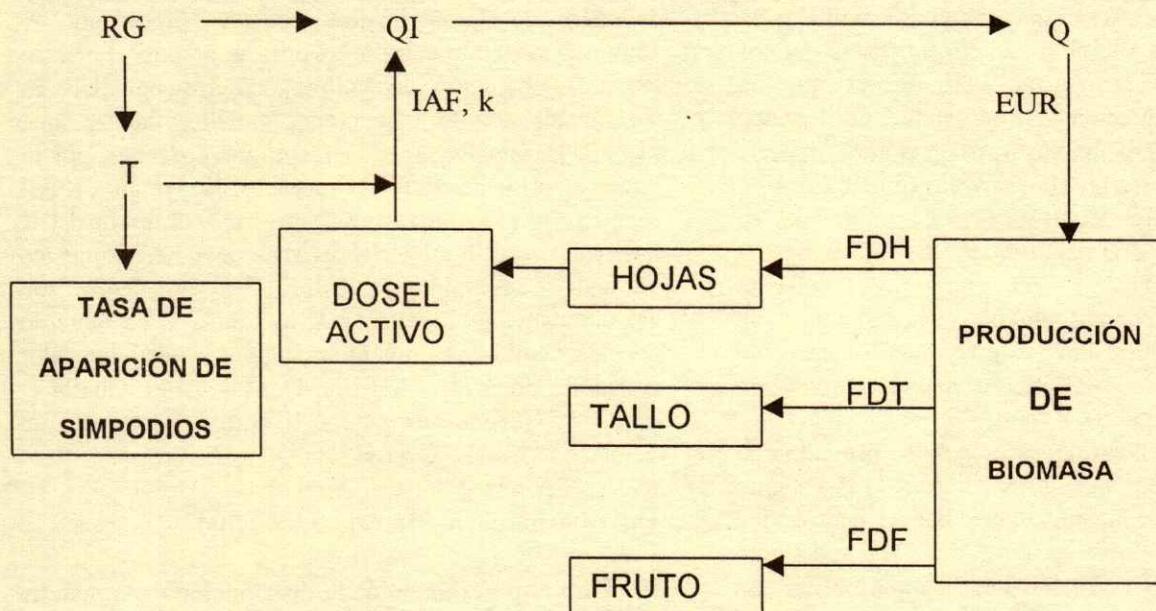


Figura 1. Representación esquemática del modelo de crecimiento del tomate.

RG = radiación global diaria incidente, QI = radiación fotosintéticamente activa incidente, IAF = índice de área foliar, k = coeficiente de extinción, Q = radiación fotosintéticamente activa interceptada, EUR = eficiencia de uso de la radiación. FDH, FDT y FDF representan los factores alométricos de distribución de materia seca a hojas, tallos y frutos, respectivamente.

coeficientes se mantienen constantes durante el ciclo del cultivo. El principal factor limitativo de esta aproximación es que precisamente esta última condición no se cumpla. Una ventaja en la aproximación propuesta es que se considera al número de frutos en su totalidad, evitando la necesidad de realizar una descripción del proceso a escala de fruto individual (Heuvelink y Buiskool, 1995; Heuvelink, 1996; Gary *et al.*, 1998b).

Tasa de Aparición de Simpodios y Expansión del Área Foliar

La tasa de aparición de simpodios se estimó considerando que este proceso es función de la temperatura, para lo cual se utilizó el concepto de grados día. Este parámetro permite describir el crecimiento y la maduración de las plantas en condiciones en que la temperatura puede variar de manera considerable. Los grados día para el día i (GD_i) se calculan mediante la ecuación:

$$GD_i = T_m - T_b$$

Donde: T_m es la temperatura media del día i y T_b es la temperatura base la cual es específica para la especie. Para el caso del tomate se considera 10°C . Los GD para un período es la suma de los GD de cada uno de los días que comprende el intervalo de tiempo.

La descripción de la expansión foliar se define a través de los GD dado que existe una relación estrecha en el número de nudos y el número de hojas. La ecuación propuesta es:

$$AF = b + TEF(GD)$$

Donde: b es un valor que representa el área foliar (AF) en el momento del transplante y TEF es la tasa de expansión foliar. El IAF es expresado en m^2 de AF por m^2 de superficie y se calcula mediante la ecuación:

$$IAF = AF(0.0001)(\text{plantas por m}^2)$$

Características de los Invernaderos y Manejo del Cultivo

Con la finalidad de obtener información que permitiera obtener un rango confiable de valores de

los parámetros involucrados en el modelo con base en la descripción anterior, se realizaron dos experimentos independientes en los ciclos de otoño-invierno de 1997-1998 y 1998-1999. Los experimentos se realizaron en invernaderos diferentes, pero de características similares: invernaderos con techos de dos aguas de 1000 m² de superficie y cubierta de película plástica PF-602 nueva, en ambos experimentos. Se utilizó el híbrido FI Gabriela y la poda dada al cultivo fue a un tallo con una densidad de 3.33 plantas por m² plantada a doble hilera en tres bolillo (distancia entre hileras y entre plantas de 0.4 m y entre camas de 0.8 m). El ancho de la cama fue de 0.8 m. La humedad en el suelo se mantuvo a 2 MPa a una profundidad de 0.2 m. En ambos experimentos, el fertilizante se aplicó en forma fraccionada, la dosis total fue 360-80-60 (N-P₂O₅-K₂O). Se utilizaron las fuentes nitrato de amonio, superfosfato de calcio triple y sulfato de potasio. El N y el K se aplicaron cada semana y todo el P al trasplante; las aplicaciones se hicieron a través del sistema de riego. La razón de manejar en esta forma el agua y el N fue con el fin de no tener limitaciones de ninguno de los dos factores.

Variables de Estudio

En la etapa de crecimiento vegetativo se realizaron muestreos semanales y durante la etapa de crecimiento reproductivo cada dos semanas para la evaluación del crecimiento y maduración del cultivo, colectando cuatro plantas y haciendo mediciones destructivas para la obtención del AF, MS y del número de nudos (NN). Las evaluaciones de AF se realizaron con un medidor de cámara Ikegami delta T y las de MS por el método gravimétrico secando las hojas y los tallos a 60 °C por 48 h y los frutos a 105 °C hasta peso constante (Heuvelink, 1996). En la evaluación de MS de las hojas se incluyó a los pecíolos y las hojas se consideraron como tales cuando presentaban una longitud igual a o mayor que 2 cm. El mismo criterio se siguió con los racimos. Los frutos se ralearon para dejar cuatro frutos por racimo.

Las plantas para el muestreo se tomaron de las camas centrales de cada nave, evitando considerar plantas alteradas en su crecimiento por cualquier factor.

Para evaluar el coeficiente de extinción en el dosel, se realizaron mediciones semanales de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) entre las 8:00 y las 17:30 h a la altura de cada uno de los simpodios presentes en el momento de la medición. Las evaluaciones de atenuación de radiación se realizaron con el sensor de radiación de un porómetro LI-COR 1600. Para el cálculo de la EUR entre cada muestreo, se utilizó la media del AF entre los dos muestreos.

Análisis Estadístico

La estimación de los parámetros se realizó mediante la técnica de regresión lineal, ya que las relaciones estudiadas presentaron esta tendencia. Se consideró que el coeficiente de determinación (r^2) es suficiente para considerar la significancia estadística del modelo. Para determinar la variación dentro de cada muestreo, se obtuvo un promedio de los cuadrados del error estándar dividido por el número de plantas para cada muestreo. A la raíz cuadrada del promedio se le llamó "error estándar de la media" y se consideró que estima la exactitud de las mediciones de cada uno de los parámetros.

La información relevante agronómica y de clima para los dos experimentos se presenta en el Cuadro 1.

Se considera que la duración de ambos cultivos es adecuada para los objetivos del estudio, ya que incluye a una parte considerable del período de producción. El experimento 1998-1999 presenta valores medios mayores en radiación y temperatura, debido a que abarca parte de la primavera en donde se tienen valores de radiación y de temperatura mayores con relación al invierno. Los valores utilizados en la estimación de los coeficientes de las ecuaciones matemáticas se obtuvieron con el experimento 1998-1999, ya que en éste se obtuvieron observaciones con mayor detalle.

Cuadro 1. Información relevante para los experimentos del ciclo otoño-invierno 1998 y 1999.

Año	Fecha de trasplante	Duración del ciclo	Radiación global media	Temperatura media
		días	MJm ⁻² d ⁻¹	°C
1997-1998	15 de octubre	140	17.25	21.6
1998-1999	18 de noviembre	171	22.54	23.2

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acumulación de Materia Seca

En el Cuadro 2, se presentan los valores observados de las variables seleccionadas para evaluar el crecimiento y la madurez del tomate, en relación con la fecha de muestreo y, en la Figura 2, se presenta la dinámica de acumulación de MS para los diferentes órganos de la planta en relación con los grados día acumulados (GDA). De la dinámica de acumulación de MS se deduce que, a partir de 1600 GDA (aproximadamente 94 días después del transplante), la tasa de acumulación de MS en hojas y tallos se mantiene constante, mientras que los frutos tienen una tasa de crecimiento exponencial, que a partir de 3200 GD es lineal. Como se observa en el Cuadro 2, la dinámica en la tasa de crecimiento condiciona los valores de distribución de MS entre los órganos. Este patrón de crecimiento, de ser primero exponencial y posteriormente lineal, es característico de las plantas de crecimiento indeterminado. Este comportamiento se acentúa debido a que el manejo convencional dado por los productores de dejar aproximadamente 21 hojas (7 simpodios) trae como resultado una dimensión en el dosel relativamente constante a lo largo del ciclo reproductivo del cultivo, por lo que la tasa de acumulación de MS está muy relacionada

con la cantidad de radiación interceptada por el dosel. El aumento en la tasa de acumulación de MS en las últimas fechas de muestreo, probablemente, se debe a un aumento en la cantidad de radiación global incidente sobre el cultivo. Esta observación implica que en las condiciones que prevalecen en el invierno, la cantidad de radiación o la temperatura puede ser un factor limitativo para la capacidad fotosintética del cultivo. La producción potencial hasta el último muestreo fue de 10.5 kg de fruto por planta.

Producción de Materia Seca

En la Figura 3, se presenta la relación entre la Q y la producción de MS.

El modelo matemático que representa la relación es:

$$MSto = 2.36 (Q) \quad r^2 = 0.83$$

La relación se obtuvo considerando un coeficiente de transmisión (t) de 0.68 para película de polietileno PF-602, (para doble capa con PF-602 se ha obtenido un valor de t de 0.60). La tasa de producción de MS es de 2.36 g por MJ⁻¹ de Q; el valor mínimo obtenido fue de 2.17 y el máximo de 4.74 con una media de 3.43 y una desviación estándar (s) de 0.84. Challa y Bakker (1996) calcularon mediante un análisis teórico

Cuadro 2. Valores obtenidos en los parámetros utilizados para evaluar la dinámica de crecimiento del cultivo de tomate. Valores promedio de cuatro plantas.

Fecha	DT	NNT _o	NHT _o	NHA	NR	PSH	PST	PSF	PST _o	AFA	FDH	FDT	FDF
						----- g planta ⁻¹ -----			----- cm ² planta ⁻¹				
18/11	0												
19/12	31	16	12	12	1	20.25	7.77		28.02	2327	0.72	0.28	
26/12	38	20	15	15	2	32.15	12.10		44.25	3201	0.72	0.28	
02/01	44	22	17	17	3	40.85	14.85		55.70	2771	0.73	0.27	
09/01	52	25	20	19	4	49.98	19.97	3.47	73.42	4120	0.68	0.27	0.05
17/01	60	29	23	19	5	67.85	28.50	8.19	104.54	3742	0.65	0.27	0.08
22/01	65	32	27	21	6	78.65	33.53	12.85	125.03	4571	0.63	0.27	0.10
30/01	73	36	29	19	7	95.45	38.64	22.75	156.84	4385	0.61	0.25	0.14
06/02	80	41	33	21	8	110.55	43.65	28.12	182.32	6043	0.61	0.24	0.15
20/02	94	49	39	25	10	140.10	55.50	54.01	249.61	5759	0.56	0.22	0.22
27/02	101	55	41	23	11	155.25	68.45	77.66	301.30	6874	0.52	0.23	0.26
13/03	114	60	48	33	13	163.23	78.32	119.34	360.89	7131	0.44	0.24	0.32
28/03	128					176.82	90.15	198.32	465.32	5460	0.38	0.19	0.42
13/04	142					193.92	111.62	300.46	606.00	5832	0.32	0.18	0.49
28/04	156					230.06	119.85	471.72	821.63	5544	0.28	0.14	0.58
12/05	170					323.88	130.42	631.06	1085.36	5911	0.30	0.12	0.58

DT = días al transplante, NNT_o = número de nudos totales, NHT_o = número de hojas totales, NHA = número de hojas actuales, NR = número de racimos, PSH = peso seco de hojas, PST = peso seco de tallo, PSF = peso seco de fruto, PST_o = peso seco total, AFA = área foliar actual, FDH = factor de distribución a hojas, FDT = factor de distribución a tallos, FDF = factor de distribución a frutos.

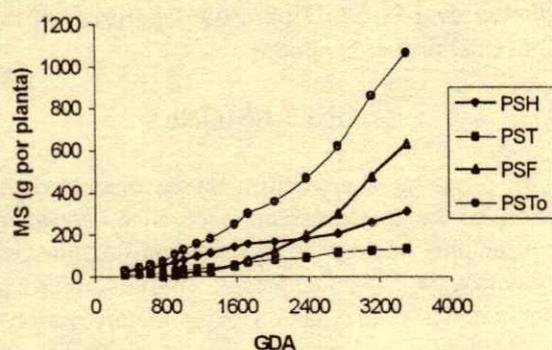


Figura 2. Dinámica de crecimiento del tomate representado por la ganancia en materia seca.

PSH = peso seco de hojas, PST = peso seco de tallos, PSF = peso seco de frutos, PSTo = peso seco total.

una tasa de $3.1 \text{ g por MJ}^{-1}$ de Q . Este valor excede al obtenido mediante el ajuste por regresión y, posiblemente, se deba a que, en las condiciones que crecieron las plantas, se hayan presentado condiciones de estrés por radiación. Esto puede explicar la variación de los valores obtenidos entre cada fecha de muestreo. Dado el valor de la variación y considerando que teóricamente debe ser una constante, es probable que la estimación por este método no sea la forma exacta de hacerlo, aunque hay similitud en valores reportados por otros autores. Un aspecto que apoya esta hipótesis es que la relación entre la radiación y la fotosíntesis es no lineal y bajo esta aproximación se presupone la existencia de una relación lineal.

Distribución Alométrica de Materia Seca

La distribución alométrica de MS presenta un comportamiento que no es constante a lo largo del ciclo del cultivo (Cuadro 2). De acuerdo con los resultados obtenidos puede establecerse que las fracciones de distribución varían con el ciclo del cultivo como se presentan en el Cuadro 3. Esta dinámica difiere a la reportada por De Koning (1994) y Heuvelink (1995a) quienes definieron un valor constante durante todo el ciclo de 0.3 para hojas, 0.1 para el tallo y 0.6 para los frutos. Los mismos autores mencionaron que una de las limitaciones en la obtención de los valores reportados es que se obtuvieron por ajuste mediante regresión lineal, durante todo el ciclo del cultivo sin diferenciar entre

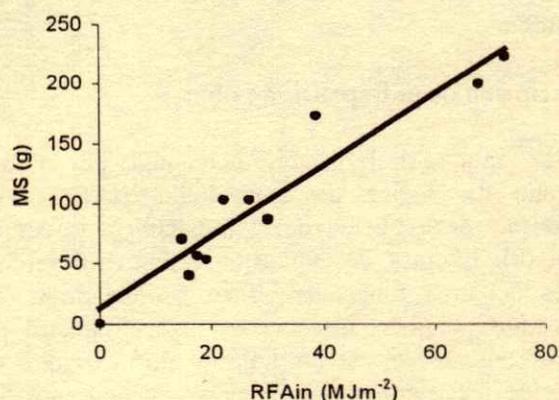


Figura 3. Relación entre la materia seca producida y la radiación interceptada (RFAin).

las tasas de crecimiento para las diferentes etapas fenológicas.

Los modelos matemáticos que definen la distribución de materia seca son para la primera etapa:

$$\text{MSH} = 0.72 \text{ MSto}$$

$$\text{MST} = 0.28 \text{ MSto}$$

Para el período comprendido entre 1601 y 2400 GD acumulados, los modelos son:

$$\text{MSH} = 0.60 \text{ MSto}$$

$$\text{MST} = 0.24 \text{ MSto}$$

$$\text{MSF} = 0.16 \text{ MSto}$$

Para el período comprendido entre 2401 y el fin del ciclo del cultivo, los modelos son:

$$\text{MSH} = 0.30 \text{ MSto}$$

$$\text{MST} = 0.12 \text{ MSto}$$

$$\text{MSF} = 0.58 \text{ MSto}$$

De los valores presentados en el Cuadro 2, se infiere que el crecimiento de los frutos es a costa del

Cuadro 3. Fracción de distribución de materia seca durante el ciclo.

Duración del crecimiento en GDA [†]	Fracción de distribución de asimilados		
	Hojas	Tallos	Frutos
Transplante a 1600	0.72	0.28	-
1601 a 2400	0.60	0.24	0.16
2401 a fin del ciclo	0.30	0.12	0.58

[†] GDA =

crecimiento del tallo y de las hojas en casi la misma proporción.

Descripción de la Expansión Foliar

La cantidad de radiación interceptada por el dosel depende del índice de área foliar (IAF) y del coeficiente de extinción de la radiación a través del dosel (k). La tasa de expansión foliar es descrita a través del área foliar específica; sin embargo, está demostrada la inconsistencia de este parámetro por efectos ontogénicos de las hojas y por variables del ambiente físico como la radiación y la concentración de bióxido de carbono. En el modelo se propone describir la expansión foliar en función de la temperatura a través de los GD. Es claro, que la expansión foliar es condicionada por factores de nutrición, principalmente N, y por agua, pero este efecto incide en las hojas en particular. Cuando un cultivo de hábito de crecimiento indeterminado es sometido a estrés que afecte la expansión foliar y éste, posteriormente, se retira, se observa un fenómeno de compensación entre las hojas, de tal modo que el dosel presenta un comportamiento regular (Ho y Shaw, 1977). Al representar la expansión foliar a través de simpodios, se considera que la representación de la expansión foliar es más cercana a la realidad. Aunado a lo anterior, está el hecho de que en la práctica los productores podan las hojas inferiores dejando entre 18 a 21 hojas (6 ó 7 simpodios), los cuales son el área foliar fotosintéticamente activa; de esta forma el IAF permanece relativamente constante.

El modelo que relaciona el AF por planta (en m^2) con los GD fue:

$$AF = 0.001 (GD) - 0.024 \quad r^2 = 0.97$$

Desarrollo del Cultivo

El desarrollo del cultivo se define a partir de la tasa de aparición de nudos (considerando que cuatro nudos dan lugar a un simpodio), la ecuación que relaciona el número de nudos con los GD es:

$$NN = 3.417 + 0.029 (GD) \quad r^2 = 0.995$$

El primer término de la ecuación representa el número de nudos en el momento del transplante. La tasa de aparición de nudos de 0.029 indica que se

requieren de 138.8 GD para que aparezca un racimo después del primer simpodio.

CONCLUSIONES

Se presenta la estructura de un modelo dinámico basado en la aproximación energética, considerando los principios básicos de la fisiología de cultivos. Los parámetros de las ecuaciones se obtuvieron a través de observaciones realizadas en experimentos *ex profeso*. Se considera que el proceso que determina la cantidad de producción de MS es la relación existente entre la expansión foliar y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). Por la forma en que está estructurado el modelo, es una propuesta que sirve de inicio para mejorar el actual o crear nuevas aproximaciones, sobre todo en lo que se refiere a la descripción de la expansión foliar y la determinación de los valores de EUR. Las relaciones propuestas permiten una descripción matemática del crecimiento y desarrollo del cultivo del tomate y con facilidad puede generalizarse a otras condiciones como sería la producción a cielo abierto, edad avanzada en el transplante y la optimización de las condiciones dentro de un invernadero en lo que respecta a radiación y temperatura.

LITERATURA CITADA

- Challa, H. y M. Bakker. 1996. Potential production within the greenhouse environment. pp. 333-348. In: Z. Enoch y G. Stanhill (eds.). Ecosystems of the world. The Greenhouse Ecosystem. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Challa, H., E. Heuvelink y O. Meeteren. 1995. Crop growth and development. pp. 62-83. In: Greenhouse climate control and integrated approach. Wageningen Press. Wageningen, The Netherlands.
- Dayan, E., H. Van Keulen, J.W. Jones, I. Zipori, D. Shmuel y H. Challa. 1993. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: I Description of the model. *Agric. Systems* 43: 145-163.
- De Koning, A.N.M. 1994. Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: A quantitative approach. PhD thesis. Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Gary, C., J.W. Jones y M. Tchamitchain. 1998a. Crop modelling in horticulture: State of the art. *Scientia Horticulturae* 74: 3-20.
- Gary, Ch., J. LeBot, J.S. Frossard y J.L. Andriolo. 1998b. Ontogenic changes in the construction cost of leaves, stems, fruits, and roots of tomato plants. *J. Exp. Bot.* 49 (318): 59-68.
- Green, C.F. 1987. Nitrogen nutrition and wheat growth in relation to absorbed solar radiation. *Agric. For. Meteorology* 41: 207-248.

- Heuvelink, E. 1995a. Dry matter production in a tomato crop: Measurements and simulation. *Ann. Bot. (London)* 75: 369-379.
- Heuvelink, E. 1995b. Effect of plant density on biomass allocation to the fruits in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Horticulturae* 64: 193-201.
- Heuvelink, E. 1996. Dry matter partitioning in tomato: Validation of a dynamic simulation model. *Ann. Bot. (London)* 77: 71-80.
- Heuvelink, E. y R.P.M. Buischool. 1995. Influence of sink-source interaction on dry matter production in tomato. *Ann. Bot. (London)* 75: 381-389.
- Ho, L.C. 1996. The mechanism of assimilate partitioning and carbohydrate compartmentation in fruit in relation to the quality and yield of tomato. *J. Exp. Bot.* 47: 1239-1243.
- Ho, L.C. y A.F. Shaw. 1977. Carbon economy and translocation of ^{14}C in leaflets of the seventh leaf of tomato during leaf expansion. *Ann. Bot. (London)* 41: 833-848.
- Kage, H. y H. Stützel. 1999. A simple empirical model for predicting development and dry matter partitioning in cauliflower (*Brassica oleracea* L. *botrytis*). *Scientia Horticulturae* 80: 19-38.
- Kuzyakov, Ya., J. Rühlmann, B. Gutezeit y B. Geyer. 1996. Modelling on the growth and N uptake of leek and brócoli. *Acta Horticulturae* 428: 181-191.
- Larsen, R.U. 1990. Plant growth modelling by light and temperature. *Acta Horticulturae* 272: 235-242.
- Lentz, W. 1998. Models applications in horticulture: A review. *Scientia Horticulturae* 74: 151-174.
- Loomis, R.S. y W.A. Williams. 1963. Maximum crop productivity: An estimate. *Crop Sci.* 3: 67-72.
- Marcelis, L.F. 1993. Simulation of biomass allocation in greenhouse crops: A review. *Acta Horticulturae* 328: 49-67.
- Marcelis, L.F., E. Heuvelink y J. Goudriaan. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: A review. *Scientia Horticulturae* 74: 83-111.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Trans. Royal Soc.* 281: 277-294.
- Seginer, I. e I. Iosolovich. 1998. A single state variable model to mimic TOMGRO for control applications. *Acta Horticulturae: Crop Models in Protected Cultivation* 456: 93-99.
- Sinclair, T.R. y T. Horie. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency: A review. *Crop Sci.* 29: 90-98.
- Sinclair, T.R. y R.C. Muchow. 1999. Radiation use efficiency. *Adv. Agron.* 65: 215-265.
- Spitters, C.J.T. 1990. Crop growth models: Their usefulness and limitations. *Acta Horticulturae* 267: 349-367.
- Stockle, C.O., S.A. Martin y G.S. Campbell. 1994. CropSyst, a cropping systems simulation model: Water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Systems* 46: 335-359.

**NUTRICIÓN MINERAL ACOPLADA AL CRECIMIENTO (NUMAC):
NUTRICIÓN CON N PARA TOMATE EN INVERNADERO
2. CURVA DE CONCENTRACIÓN CRÍTICA Y DEMANDA DE NITRÓGENO
NUMAC-N Tomato: Mineral Nutrition Fit at Growth. The Nitrogen Nutrition in Tomato
Greenhouse Production**

2. Critical Concentration Curve and Nitrogen Demand

**Sergio A. Enriquez-Reyes¹, Gabriel Alcántar-González², Javier Z. Castellanos-Ramos³,
Enrique Arjona-Suárez², Diego González-Eguiarte⁴ e Ignacio Lazcano-Ferrat⁵**

RESUMEN

Se presentan los parámetros para el modelo que describe la curva de concentración crítica de nitrógeno ($\%N = \alpha MS^{-\beta}$) para el tomate (*Lycopersicon esculentum*) de hábito de crecimiento indeterminado, la cual relaciona la concentración de N con la acumulación de materia seca (MS). Al diferenciar el dosel de la planta en hoja y tallo según el modelo de dos compartimentos de Caloin y Yu, se observó que el fenómeno de dilución y la curva de concentración crítica de N presentan valores diferentes en los parámetros para cada órgano, con lo cual se comprueba que el principal órgano de demanda de N son las hojas fotosintéticamente activas. Una de las principales ventajas del modelo es que tiene sólo dos parámetros que pueden relacionarse con la actividad metabólica de la planta: el parámetro α está relacionado con la concentración mínima de N necesaria para obtener la máxima tasa de crecimiento y el parámetro β representa la tasa de dilución de N con relación a la tasa de producción de materia seca. Los modelos obtenidos para ambos órganos fueron: para hojas, $\%N = 5.579MS^{-0.2522}$ ($r^2 = 0.87$) y para el tallo, $\%N = 3.02MS^{-0.1705}$ ($r^2 = 0.86$). Al conocer la relación entre la concentración de N y la producción de materia seca es posible estimar la cantidad de N

necesaria para la obtención potencial de una determinada cantidad de materia seca. El modelo aquí presentado será utilizado para determinar la cantidad de N por aplicar en función de la simulación de la producción potencial de materia seca para el cultivo de tomate en invernadero durante el ciclo de cultivo.

Palabras clave: *Lycopersicon esculentum*, *modelo*, *simulación*, *fertirriego*.

SUMMARY

In this paper, the critical nitrogen concentration curve model ($\%N = \alpha MS^{-\beta}$) is parameterized for indeterminate growth tomato (*Lycopersicon esculentum*) under greenhouse and soil cultivation. The model represents the relationship between dry matter (MS) accumulation and N concentration. The parameters were estimated for leaves (photosynthetic compartment) and stem (structural compartment), according to the model of two compartments of Caloin and Yu. The dynamics of N dilution is different for both compartments. The model that represents N dilution for leaves is $\%N = 5.579MS^{-0.2522}$ ($r^2 = 0.87$); and for stem, $\%N = 3.02MS^{-0.1705}$ ($r^2 = 0.86$). The photosynthetic compartment is rich in N and determines plant growth rate. Both parameters can be interpreted in ecophysiological terms: the α coefficient is related to critical N concentration and the β coefficient represents the N dilution rate in function of MS accumulation rate. Knowing the relationship between N concentration and MS production allows estimating N required for a determined MS yield.

Index words: *Lycopersicon esculentum*, *model*, *simulation*, *fertigation*.

¹Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Querétaro. Querétaro, México. (senrique@itesm.mx)

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

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Bajío. Celaya, Guanajuato. ⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Jalisco. Guadalajara, Jalisco, México.

⁵Instituto de la Potasa y el Fósforo. Querétaro, México.

INTRODUCCIÓN

La fertilización con nitrógeno es una de las prácticas agrícolas de mayor impacto en la producción de los cultivos. En el mundo, considerables cantidades de fertilizantes nitrogenados se aplican a los cultivos, con el objetivo de obtener mayores rendimientos y mayor calidad en los productos de cosecha. Una consecuencia de esta práctica es la contaminación del ambiente, ya que en conjunto con las altas cantidades de N aplicadas por los productores, se presenta el fenómeno de alta movilidad del N del suelo y baja capacidad de exploración por los sistemas de raíces; esto da como resultado una baja incorporación de N por las plantas. Hay evidencias que muestran que el riesgo de contaminación del ambiente por nitratos es mayor en los sistemas de producción de hortalizas que en los sistemas de producción de otros cultivos, como cereales (Prins *et al.*, 1988). Debido a estas condiciones que norman la práctica de la fertilización con N, es necesario establecer una relación estrecha entre la demanda de N por el cultivo y la cantidad mínima necesaria de N por aplicar. En el sentido de la obtención de un modelo de simulación, esto implica que las aplicaciones de nutrimentos deben hacerse en función de la tasa potencial de crecimiento del cultivo. El potencial de producción de materia seca depende de la interceptación de la radiación por el dosel y de la actividad fotosintética de las hojas; éstas requieren de una cantidad mínima de N para presentar la máxima tasa de crecimiento (Evans, 1989).

Caloin y Yu (1984) presentaron un modelo conceptual que relaciona la tasa de producción de materia seca (MS) con la concentración de N. El modelo se basa en asignar el N de la planta a dos compartimentos: uno, relacionado con la actividad metabólica de la planta ubicada en las hojas, y otro, relacionado con órganos de estructura y almacenamiento (principalmente el tallo). Dado que el crecimiento procede de la actividad metabólica de las hojas, el N asociado a éstas determina, en conjunto con la dimensión del dosel, la tasa de producción de MS. Este modelo es determinante en la comprensión del fenómeno de dilución de N en función de la producción de MS y en la explicación del proceso de disminución en la producción de MS por efecto de una disminución en la concentración de N; por lo que la división del contenido de N en estos dos órganos permite interpretar la producción de MS con base en la concentración de N en las hojas fotosintéticamente activas.

En todos los sistemas agrícolas, definir la cantidad de fertilizante por aplicar es complicado; para su solución se han propuesto diferentes estrategias. En la actualidad, la más satisfactoria es la aproximación que considera la demanda de N durante el ciclo del cultivo en conjunto con el análisis de N en forma de nitratos en la capa arable, auxiliándose además con el análisis del extracto de jugo celular o el análisis foliar; procedimientos que requieren de ser calibrados. Esta estrategia, además de ser costosa, incluso desde el proceso de investigación, puede ser impráctica debido a la gran cantidad de análisis que es necesario realizar.

Otra aproximación consiste en la estimación de la demanda de N con base en la producción de MS por el cultivo y la curva de concentración crítica de N. Esta aproximación se sustenta en el hecho de que para cierta producción de MS es necesaria una cantidad mínima de N, lo cual concuerda con lo establecido por Evans (1989). En términos de tasa de crecimiento, el concepto de concentración crítica establece que si el abastecimiento es igual a la demanda, la producción de MS se realiza a la máxima tasa de crecimiento, mientras que si el abastecimiento es menor que la demanda, el crecimiento se realiza también a una tasa menor. Dentro de este concepto, Greenwood *et al.* (1986) y Justes *et al.* (1994) establecieron una secuencia cronológica de la deficiencia de N en la siguiente forma: en una condición limitativa de abastecimiento de N, primeramente la concentración de N en el dosel disminuye sin afectar la tasa de crecimiento y, posteriormente, disminuye la tasa de crecimiento dando como resultado una reducción en la acumulación de MS. En un modelo de simulación con este objetivo, la producción potencial de materia seca es simulada en función de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el dosel y la capacidad de la planta para transformarla en materia seca. Estos procesos dependen de la temperatura y de la radiación. La relación entre la producción y acumulación de MS y la concentración de N en la planta es representada por la curva de concentración crítica de N (Salette y Lemaire, 1981; Greenwood *et al.*, 1986; Greenwood y Draycott, 1989a,b; Greenwood *et al.*, 1990; Lemaire y Gastal, 1997). La expresión matemática que define a la curva de concentración crítica de N es:

$$N = \alpha(MS)^{\beta}$$

Donde: N es la concentración de N, en %; MS es la materia seca producida; y α y β son parámetros

empíricos. Por definición, α representa la concentración máxima de N para una biomasa de 1 Mg ha^{-1} ; β representa la tasa de disminución en la concentración de N con relación a la tasa de producción de MS. Greenwood *et al.* (1990) propusieron valores diferentes en función de la asimilación de carbono. Para especies C3:

$$\%N = 5.7MS^{-0.5}$$

y para especies C4:

$$\%N = 4.1MS^{-0.5}$$

Lemaire y Salette (1984) propusieron para leguminosas forrajeras, valores constantes para α y β de 4.8 y 0.32; Justes *et al.* (1994) para trigo, valores de 5.35 y 0.442 y LeBot *et al.* (1995) para tomate, valores de 5.77 y 0.33, respectivamente.

La obtención en campo de la curva de concentración crítica de N no es un proceso sencillo, ya que es muy fácil pasar de condiciones de consumo superfluo, a las de disponibilidad limitativas para obtener la máxima tasa de crecimiento debido a cambios en la disponibilidad de N del suelo. Una aproximación consiste en aplicar dosis crecientes de N y determinar la tasa de crecimiento en períodos cortos, relacionando la producción de MS con la concentración de N en las hojas (Justes *et al.*, 1994). Puede obtenerse mayor precisión usando sistemas de fertirriego en los cuales la aplicación de N puede ser a dosis bajas y con mayor frecuencia, lo que permite mantener una disponibilidad relativamente constante de N; sin embargo, esta metodología no previene que se pase a condiciones de consumo superfluo.

El objetivo del estudio fue determinar los parámetros del modelo matemático que representa la curva de concentración crítica de N y hacer un análisis sobre la distribución de N en el dosel, para el cultivo de tomate en invernadero con fertirriego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el ciclo otoño-invierno 1998-1999, se condujo un experimento con el cultivo de tomate en invernadero con fertirriego, en una unidad comercial de producción de tomate de 3000 m^2 . El experimento se realizó en un Vertisol pélico. En la preparación del terreno se aplicaron $150 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ y $100 \text{ kg de K ha}^{-1}$, utilizando como fuentes al superfosfato de calcio triple y al sulfato de potasio, respectivamente.

El 15 de octubre se sembraron semillas del híbrido Gabriela de hábito de crecimiento indeterminado en charolas de poliestireno y el 18 de noviembre se transplantaron. La distancia entre camas fue de 1.5 m; entre hileras de 0.4 m y entre plantas de 0.4 m. El N se aplicó por fertirriego, en dosis semanales considerando un ciclo de 180 días y cantidades de N por ciclo de 150, 250 y 350 kg ha^{-1} . Estas dosis de N definen a los tratamientos en el diseño experimental utilizado. La fuente de N fue nitrato de amonio.

El manejo del agua se hizo considerando una tensión de humedad constante de 20 kPa en una capa de suelo de 0 a 30 cm, controlando el contenido de humedad mediante el uso de tensiómetros colocados a profundidades de 15 y 30 cm. El manejo del cultivo se hizo a un tallo por planta. No se presentaron problemas de plagas ni de enfermedades.

Como unidad experimental se consideraron cuatro camas a doble hilera de 10 m de largo con cuatro repeticiones en un diseño completamente al azar. Se realizaron muestreos semanales de dos plantas por repetición, tomándolas al azar pero en competencia completa. Se determinó la concentración de N total en hojas y tallos. El análisis de N total se realizó mediante la técnica de microkjeldahl modificado para incluir nitratos.

A partir de cada muestreo, se determinó la acumulación de MS en hojas y tallos, separándolas por simpodio y se relacionó con la concentración de N (%) en las hojas. El análisis se realizó por simpodios debido a la necesidad de evaluar la fracción del dosel que se encuentra en crecimiento y con mayor actividad metabólica. Para tener la seguridad de que se obtiene la concentración mínima crítica de N, en función de la tasa de producción de MS, se realizó el análisis de comparación de medias de MS mediante el estadístico *t* de Student a una probabilidad de 10% bajo el siguiente criterio: los resultados de MS y de %N para cada muestreo se compararon independientemente de la dosis de N aplicada; esta condición permite tener tres puntos definidos por sus valores respectivos de MS y %N. Al hacer la comparación de medias, cuando menos uno de los valores de MS debe ser diferente a los demás para considerarlo en el cálculo de la curva de concentración crítica; de esta forma, se establecieron los siguientes casos:

$$\text{Caso 1: } MS_1 < MS_2 = MS_3 \\ N_1 < N_2 \leq N_3$$

Los valores considerados para el cálculo de la curva de concentración crítica fueron el MS_2 con N_2 .

Caso 2: $MS_1 < MS_2 < MS_3$
 $N_1 < N_2 \leq N_3$

Los valores considerados para el cálculo de la curva de concentración crítica serían el MS_3 con N_2 . Los valores apareados de (MS_i , N_i) considerados para el cálculo pueden provenir de cualquier tratamiento de fertilización, siempre y cuando cumplan con el requisito de cualquiera de los casos antes presentados. Esta metodología permite obtener la concentración en función de la máxima tasa de crecimiento y asegura que se tengan concentraciones correspondientes a la mínima crítica, evitando en cierta medida llegar a un abastecimiento de consumo superfluo.

El ajuste de los puntos se realizó mediante el paquete SPSS 9.0 con el procedimiento de estimación de la curva.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Curva de Concentración Crítica de N y Fenómeno de Dilución

Los valores de materia seca de hojas y tallos por simpodio con sus respectivos valores de concentración de N que cumplieron con el planteamiento estadístico, se presentan en el Cuadro 1.

Los modelos matemáticos obtenidos para hoja y tallo fueron, respectivamente:

$$\%N = 5.579MS^{-0.2522} \quad r^2 = 0.87$$

$$\%N = 3.02MS^{-0.1705} \quad r^2 = 0.86$$

cuyas gráficas se presentan en las Figuras 1 y 2.

El valor de $\alpha = 5.77$, reportado por LeBot *et al.* (1995) para el cultivo del tomate en hidroponía, es muy similar al que se obtuvo para hojas ($\alpha = 5.579$), mientras que el valor de $\beta = 0.33$ es mayor que el encontrado en este estudio ($\beta = 0.2522$).

Los valores reportados por Greenwood *et al.* (1990) para especies C3, ($\alpha = 5.7$) es mayor que el aquí encontrado ($\alpha = 5.579$), mientras que el valor de $\beta = 0.5$ es considerablemente mayor que el del presente estudio ($\beta = 0.2522$). La comparación debe

Cuadro 1. Producción de materia seca y concentración de N.

Observación	Materia seca	N	Materia seca	N
	hojas	hojas	tallo	tallo
	g planta ⁻¹	%	g planta ⁻¹	%
1	1.39	4.82	0.26	3.46
2	2.34	4.68	0.47	3.34
3	3.42	4.15	0.67	3.28
4	6.35	3.96	2.33	3.01
5	7.91	3.83	4.82	2.61
6	8.41	3.64	5.69	2.50
7	9.87	3.33	5.88	2.45
8	9.92	3.18	6.23	2.37
9	10.74	3.15	6.36	2.30
10	10.95	2.98	6.38	2.25
11	11.10	2.87	6.65	2.18
12	11.41	2.84	6.85	2.16
13	11.83	2.81	6.96	2.12
14	13.05	2.85	7.25	2.01
15	14.75	2.76	7.83	1.98
16	15.66	2.75	8.84	2.00
17	16.40	2.73	9.35	1.95
18	17.10	2.72	10.05	2.02
19	17.36	2.78	10.10	1.94
20	17.52	2.66	10.15	1.92
21	18.96	2.67	10.24	1.94

hacerse con reservas, debido a que en el presente estudio se consideró el fenómeno de dilución, separando los órganos de la planta en hojas y tallo, mientras que los valores reportados en la literatura consideran a la planta en su totalidad. De hecho, en el presente estudio, las diferencias entre modelos son notables para los parámetros involucrados, lo cual se esperaba por tratarse de órganos de diferente actividad metabólica por lo que el fenómeno de dilución es también diferente.

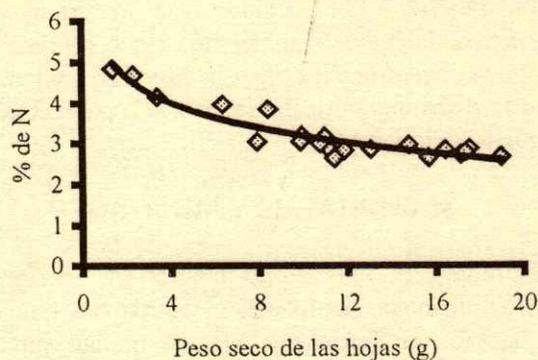


Figura 1. Relación entre la materia seca acumulada de las hojas y la concentración de N.

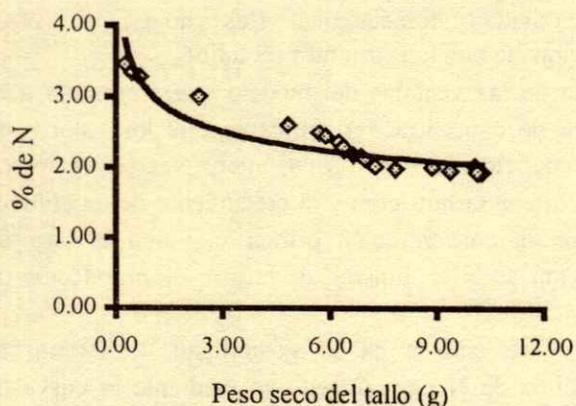


Figura 2. Relación entre la materia seca acumulada del tallo y la concentración de N.

Dado que la curva de concentración crítica representa al fenómeno de dilución de la concentración de N en función de la tasa de producción de MS, diferencias en el parámetro β son debidas a variaciones en la tasa de crecimiento del cultivo; así, mayores tasas de crecimiento traen consigo valores mayores de β . Dentro del contexto de la simulación de la dilución de N, esto puede traer consigo que cuando se presentan altas tasas de crecimiento, puede subestimarse la concentración de N necesaria para tener la máxima tasa de crecimiento en el siguiente período, dado lo especificado por Justes *et al.* (1994) con relación a la dinámica del efecto de la deficiencia de N. Este efecto puede minimizarse, considerando periodos cortos de simulación, como por ejemplo tres o cuatro días. De esta forma, el período permitido para el efecto de la dilución se ve disminuido. Respecto al tallo, el fenómeno de dilución se presenta en una menor cantidad de MS (Figura 2).

Con relación a los valores obtenidos de α , dado que el valor es mayor para hoja que para tallo, se confirma el hecho de que las hojas son el principal sitio de demanda metabólica de N, dado que en ellas se realiza la mayor actividad fotosintética. Otra interpretación que se le puede dar al valor de α consiste en relacionarlo con el grado de abastecimiento nutrimental de consumo superfluo. Altos valores de α indican la presencia de consumo superfluo en el cultivo. Con base en el análisis realizado por Greenwood *et al.* (1990), en donde establece un valor de 5.7 para especies C3, y considerando la relativa estabilidad de este valor en otros cultivos, puede afirmarse que el valor aquí

encontrado está relacionado con el grado de abastecimiento nutrimental de consumo superfluo.

De acuerdo con este análisis, los valores de α y β obtenidos, probablemente corresponden a condiciones en las cuales el abastecimiento de N es mayor que el necesario para una máxima tasa de crecimiento. Esto es debido a que se aplicaron cantidades de N que pueden ser mayores que las necesarias por el cultivo con el fin de evitar condiciones de limitación en el crecimiento por deficiencia de N, pero cuidando de que no fueran excesivas para evitar el consumo superfluo. El uso de dosis de N con incrementos menores permite obtener una estimación más exacta y precisa de los coeficientes de la curva. Por otro lado, es conveniente utilizar periodos de muestreo en los cuales se manifieste una clara acumulación de MS en el cultivo. Esto permite tener valores, tanto de materia seca, como de la concentración de N que reflejan las condiciones de crecimiento de las plantas.

Una interpretación interesante de Feller y Fisher (1994) sobre el fenómeno de dilución consiste en que, conforme se avanza en el ciclo del cultivo, parte del N presente en la MS acumulada se moviliza hacia los tejidos con mayor actividad metabólica, dando como resultado una disminución en la cantidad de N proveniente del medio de crecimiento. Para el caso de tomate de hábito de crecimiento indeterminado, el comportamiento fue similar, ya que conforme se avanza en el ciclo y se entra a la etapa de producción, la cantidad de MS dirigida hacia la formación de hojas y tallos es menor y, por lo tanto, la cantidad de N proveniente del medio de crecimiento disminuye.

Cabe mencionar, que otros modelos matemáticos pueden ajustarse tan bien como el propuesto a los datos encontrados; sin embargo, se considera conveniente continuar usando el modelo de potencia debido a la consistencia encontrada en la literatura y al hecho de que los parámetros tienen una interpretación biológica directamente asociada al fenómeno en estudio.

Un factor limitativo en la estimación de los coeficientes del modelo en el presente estudio es que son pocos los puntos que se encontraron en la sección de inflexión de la curva. Esta condición se acentuó en la estimación de la curva de concentración crítica para el tallo (Figura 2).

Los valores de los coeficientes de los modelos obtenidos no pueden compararse directamente con los reportados en la literatura, debido a que en el presente estudio la MS se separó en hojas y tallo, mientras que los reportados en la literatura, consideran al dosel en

su totalidad. Dada la relativa estabilidad de los coeficientes y la explicación biológica que se les puede dar a los mismos, permite establecer la posibilidad utilizar la curva de dilución crítica de N para estimar la demanda de N; sin embargo, como hasta el momento es una relación empírica, debe de ser explicada en términos fisiológicos antes de ser generalizada a un mayor número de cultivos y de variaciones en las condiciones de crecimiento de las plantas.

Curva de Concentración Crítica y Simulación de la Demanda de N para el Tomate en Invernadero

El uso agronómico de estos resultados consiste en poder determinar, en cualquier momento del ciclo de cultivo, la cantidad de N por aplicar para tener durante periodos cortos la máxima tasa de producción de MS; la cual es determinada por la temperatura y la radiación del ambiente. Así, dentro del contexto de simulación, la demanda de N se determina en función de la producción de MS para un período corto, utilizando la cantidad de MS estimada mediante simulación para determinar la cantidad de N por aplicar, utilizando la curva de concentración crítica. Por lo tanto, la importancia de la curva de concentración crítica radica en que ésta relaciona la producción de la MS con la concentración de N.

La diferencia entre esta aproximación con la curva de demanda en función de la curva de crecimiento es, que esta última presenta una secuencia de producción-acumulación que no refleja el efecto de las condiciones actuales del ambiente sobre la producción de MS. Estas diferencias entre la MS actual y la definida por la curva, traen consigo amplias variaciones en la cantidad de N por aplicar. Con el esquema propuesto se tiene la seguridad de tener en el cultivo una tasa de producción de MS muy cercana a la máxima que la condición del ambiente impone.

CONCLUSIONES

- La curva de concentración crítica representa el fenómeno de dilución de N en función de la tasa de acumulación de MS, la cual define el crecimiento de un cultivo.

Los modelos que representan la distribución de N en hojas y tallos para el cultivo de tomate en suelo con fertirriego y en invernadero, muestran que la dinámica del N dentro de la estructura de la planta se ajusta al

modelo de dos compartimentos: uno, relacionado con la actividad fotosintética (las hojas) y, otro, relacionado con la estructura (el tallo).

- Una de las ventajas del modelo que representa a la curva de concentración crítica es que los valores de los coeficientes tienen una interpretación biológica directa con la nutrición y el crecimiento de un cultivo; α con la concentración crítica y β con la tasa de dilución de N en función de la tasa de producción de MS.

- Se hace énfasis en la posibilidad de estimar la demanda de N para un cultivo mediante la curva de dilución crítica y la producción de MS en periodos cortos, y en que esta aproximación presenta algunas ventajas sobre la aproximación de las curvas de demanda que representan a todo el ciclo del cultivo.

LITERATURA CITADA

- Caloin, M. y O. Yu. 1984. Analysis of the time course change in nitrogen content of *Dactylis glomerata* L. using a model of plant growth. *Ann. Bot. (London)* 54: 69-76.
- Evans, J.R. 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C₃ plants. *Oecologia* 78: 9-19.
- Feller, U. y A. Fisher. 1994. Nitrogen metabolism in senescing leaves. *Critical Rev. in Plant Sci.* 13: 241-273.
- Greenwood, D., J.J. Neeteson y A. Draycott. 1986. Quantitative relationships for the dependence of growth rate or arable crops on their nitrogen content, dry weight and aerial environment. pp. 367-387. *In: H. Lambers, J.J. Neeteson e I. Stulen (eds.). Fundamental, ecological and agricultural aspects of nitrogen metabolism in higher plants.* Martinus Nijhoff. Dordrecht, The Netherlands.
- Greenwood, D. y A. Draycott. 1989a. Experimental validation of an N-response model for widely different crops. *Fert. Res.* 18: 153-174.
- Greenwood, D. y A. Draycott. 1989b. Quantitative relationships for growth and N content of different vegetable crops grown with and without ample fertilizer-N on the same soil. *Fert. Res.* 18: 175-188.
- Greenwood, D., G. Lemaire, G. Gosse, P. Cruz, A. Draycott y J.J. Neeteson. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Ann. Bot. (London)* 66: 425-436.
- Justes, E., B. Mary, J.M. Meynard, J.M. Mchet y L. Thelier-Huches. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann. Bot. (London)* 74: 397-407.
- LeBot, J., J.L. Andriolo, C. Gary, S. Adamowicz y P. Robin. 1995. Dynamics of N accumulation and growth of tomato plants in hydroponics: An analysis of vegetative and fruit compartments. pp. 37-52. *In: G. Lemaire e I.G. Burns (eds.). Diagnostic procedures for crop N management.* INRA Editions. Route de St Cyr, 78026 Versailles Cedex, Francia.

- Lemaire, G. y F. Gastal. 1997. N uptake and distribution in plant canopies. pp. 3-44. *In*: G. Lemaire (ed.). Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer Verlag, Berlin, Alemania.
- Lemaire, G y J. Salette. 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Étude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4: 423-430.
- Prins, W.H., K. Dilz y J.J. Neeteson. 1988. Current fertilizer recommendations for nitrogen fertilization within the EC in relation to nitrate leaching. *Proc. Fert. Soc.* 276: 27-34.
- Salette, J. y G. Lemaire. 1981. Sur la variation de la teneur en azote de graminées fourragères pendant leur croissance: Formulation d'une loi de dilution. *C.R. Acad. Sc., Paris* 292: 875-878.

NUTRICIÓN MINERAL ACOPLADA AL CRECIMIENTO (NUMAC): NUTRICIÓN CON N PARA TOMATE EN INVERNADERO

3. Evaluación del Modelo

NUMAC- N Tomato: Mineral Nutrition Fit at Growth. The Nitrogen Nutrition in Tomato Greenhouse Production. 3. Model evaluation

Sergio A. Enriquez-Reyes¹, Gabriel Alcántar-González², Javier Z. Castellanos-Ramos³,
Enrique Arjona Suárez², Diego González-Eguiarte⁴ e Ignacio Lazcano-Ferrat⁵

RESUMEN

Se presentan los resultados de la evaluación del modelo de simulación NUMAC, el cual se creó con el objetivo de definir dosis de fertilización nitrogenada para el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum*) con fertirriego en invernadero. Con el modelo se define la cantidad de nitrógeno por aplicar por períodos de crecimiento de cuatro días en función de la cantidad mínima de N necesaria para tener la máxima tasa de crecimiento. Las variables de estado en el modelo son la producción de materia seca (MS), y el área foliar y las variables conductoras son la radiación incidente y la temperatura. Con el uso del modelo se demuestra que la tasa diaria de absorción de N depende de las condiciones climáticas (radiación y temperatura) en las que el cultivo desarrolla. Si se ignoran las variaciones en la tasa de crecimiento por efecto de variaciones en las condiciones de crecimiento del cultivo, se llega a una sobrefertilización que trae como resultado aplicaciones excesivas de N, la contaminación del ambiente y un costo innecesario. Se observó que el modelo tiende a sobrestimar la producción de MS cuando las condiciones de crecimiento no son óptimas. Este estudio muestra que es factible el uso de modelos de simulación en la práctica agronómica, concretamente en la fertilización con N, y que entre los beneficios que pueden obtenerse, están el uso eficiente de los fertilizantes y la consecuente

disminución en el riesgo de contaminación del ambiente sin que se presente una disminución en la producción del cultivo.

Palabras clave: *Lycopersicon esculentum*, modelo de simulación, nitrógeno, fertirriego.

SUMMARY

This paper presents the evaluation results of NUMAC, a dynamic simulation model, developed to assess growers in defining the doses of nitrogen fertilization for tomato (*Lycopersicon esculentum*) production with fertigation in greenhouse. The model calculates the N demand for each four-day period, considering the minimum N quantity required to obtain the maximum growth rate. The state variables that define crop growth are dry matter (MS) production and leaf area size; and the leading variables are incoming radiation and temperature. The use of the model demonstrated that the daily N uptake that results in optimum yield and product quality depended on climatic conditions. If temporal variation in growth rate in function of climatic conditions is ignored, it results in over-fertilization and, consequently, in N buildup in soil, contamination of the environment and extra cost. It was observed that the model predicted MS accumulation in a reasonable way, but the model slightly overestimated MS accumulation when growth conditions are sub-optimal. NUMAC is a compact, functional, real-time model developed for continuous assessment for N fertigation decisions and this study showed that it can be successfully used in agronomic practice.

Index words: *Lycopersicon esculentum*, simulation model, nitrogen fertilization, fertigation.

INTRODUCCIÓN

En los Artículos 1 y 2 (Enriquez *et al.*, 2003a,b) de este estudio, se presentó la descripción de un

¹ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Querétaro. Querétaro, México. (senrique@itesm.mx)

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

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Bajío. Celaya, Guanajuato, México. ⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Jalisco. Guadalajara, Jalisco, México.

⁵ Instituto de la Potasa y el Fósforo. Querétaro, México.

modelo de simulación de tipo funcional, desarrollado para definir las dosis por aplicar de N en función de la cantidad mínima necesaria para tener la máxima tasa de crecimiento en un cultivo de tomate de hábito de crecimiento indeterminado con fertirriego en invernadero. El modelo se basa en la respuesta de la planta a variaciones de temperatura y radiación incidente dentro del invernadero. El objetivo de esta parte del estudio es la evaluación del modelo, bajo la hipótesis de que con el uso del modelo se tiene una mayor eficiencia en el uso de N, sin que se presente una disminución en la producción.

La evaluación es un requisito que debe cubrir cualquier modelo antes de ser utilizado en sistemas de producción comercial. En la actualidad, no se cuenta con un procedimiento estándar para la evaluación de un modelo dinámico de simulación; incluso, no se ha definido un término en español adecuado al proceso de evaluación; algunos autores le llaman validación (traducción literal de la palabra inglesa validation), otros le llaman análisis de sensibilidad (traducción literal de la palabra inglesa sensitivity). De acuerdo con la literatura revisada, ambos términos son correctos, pero difieren en cuanto al nivel jerárquico de evaluación de un modelo.

El término validación corresponde al proceso de evaluación de un modelo dinámico, mediante el cual se evalúa la capacidad del modelo para describir el comportamiento de cualquier variable de estado del mismo (Scholten y Van der Tol, 1993). Esta capacidad se evalúa mediante un análisis de regresión entre valores simulados y valores reales obtenidos de un experimento ex-profeso. Un requisito para este tipo de evaluación es que debe realizarse con información que no se haya utilizado en la obtención de los parámetros del modelo. Jones y Carberry (1994) presentaron un método estadístico denominado validación cruzada, el cual tiene como criterio de evaluación la varianza de los valores simulados. A este tipo de evaluación se le conoce como global y normalmente se usa en modelos de tipo funcional o compacto. Presenta la desventaja de que descarta la posibilidad de compensar errores en los submodelos que constituyen al modelo en su totalidad; tiene la ventaja de que con información obtenida en el mismo experimento en que se obtiene la información para obtener el modelo se realiza la evaluación.

En el análisis de sensibilidad, se evalúa la respuesta del modelo a pequeños cambios en los valores de las variables causales. La evaluación de la sensibilidad se realiza sobre los procesos en donde

participan las variables relevantes del sistema. El análisis se realiza comparando los valores simulados contra valores reales tomados con alta precisión y exactitud (se les conoce como "apropiados"), los cuales son difíciles de obtener.

Un criterio diferente en el análisis de sensibilidad es el propuesto por Seginer e Ioslovich (1998), quienes establecieron como criterio de evaluación, la estabilidad de los parámetros del modelo en diferentes condiciones de crecimiento. Aparentemente, este criterio simplifica el proceso de validación, pero no es así, ya que se requiere que el modelo sea evaluado en condiciones en donde las variables causales son exactamente controladas, lo que dificulta el proceso. Este tipo de evaluación se centra en la evaluación de modelos de tipo mecanicista, los cuales tienen como objetivo el control óptimo de un sistema y que operan en tiempo real.

El criterio final de evaluación, en general aceptado, es que el modelo de simulación represente a la realidad para la cual el modelo se construyó (Bertin y Gary, 1993; Scholten y Van der Tol, 1993; Seginer e Ioslovich, 1998). Bajo este criterio, aunque un modelo sea "invalidado" por alguno de los dos procesos anteriores de evaluación, puede ser útil si se ajustan los parámetros para obtener, dentro de cierto margen de precisión, resultados que representen a la realidad que se desea simular. Esto resulta obvio si se considera que la información utilizada para obtener los valores de los parámetros de los modelos tiene por naturaleza un carácter aleatorio y que, por otra parte, la información obtenida a través del modelo de simulación tiene también en forma inherente, un componente de aleatoriedad.

Considerando lo anterior, para la evaluación del modelo NUMAC, se establecieron los siguientes criterios:

1. Mediante la comparación de diferentes estrategias para definir dosis de aplicación de N, determinar si el modelo NUMAC presenta un comportamiento aceptable teniendo como indicador la producción del cultivo.
2. Determinar si existe una relación entre las dosis de N definidas por el modelo y el crecimiento del cultivo.
3. Determinar el efecto de las diferentes estrategias de fertilización sobre el grado de abastecimiento nutrimental del cultivo.

El artículo está organizado en la siguiente forma: primero, se presentan las ecuaciones matemáticas que conforman la estructura del modelo de simulación; segundo, se presenta la metodología del experimento

de evaluación del modelo. Finalmente, se discuten los resultados y las implicaciones del uso del modelo en la producción de tomate en invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Modelo NUMAC

En el modelo NUMAC, la planta es representada por dos variables de estado: el área foliar que representa la dimensión del sistema fotosintético y la producción-acumulación de materia seca (MS) que define el crecimiento del cultivo y que se distribuye en tres componentes de la estructura de la planta: hojas, tallo y fruto.

La simulación de la producción de MS se realiza mediante la aproximación energética funcional de eficiencia de uso de la radiación (Monteith, 1972; Sinclair y Muchow, 1999). La distribución de MS se basa en la aproximación de la alometría descriptiva, (Marcelis, 1993). La demanda de N se obtiene a partir de la curva de concentración crítica (Greenwood *et al.*, 1990; Justes *et al.*, 1994).

Las ecuaciones matemáticas que conforman al modelo NUMAC se presentan en el Cuadro 1.

Los procedimientos utilizados en la obtención de los parámetros del modelo se presentan en las Partes 1 y 2 de este estudio (Enriquez *et al.*, 2003a,b).

Para la evaluación del modelo, se realizó un experimento en el cual se aplicaron dosis de N según cuatro estrategias de dosificación (Cuadro 2). Las cantidades totales de N aplicado para cada estrategia se presentan en el Cuadro 3.

Para el Tratamiento 1, la cantidad de N aplicada para cada etapa fenológica es la media de los valores reportados por Castellanos (1997). Para el Tratamiento 2, la cantidad de N aplicada se consideró a partir de la edad de la planta en el momento del transplante: 2 kg de N ha⁻¹ d⁻¹. Para el Tratamiento 3, la cantidad de N por aplicar se determinó en función de la cantidad de agua de riego, la cual se definió con base en una humedad objetivo de 20 kPa a una profundidad de 30 cm. Para definir la dosis de N por aplicar en el Tratamiento 4, se consideró un período de simulación de cuatro días con base en la radiación incidente en los cuatro días previos al período a simular. Se utilizó un coeficiente de corrección definido por la relación entre la radiación real al final del período y la radiación estimada; el valor de este factor es menor que 1.0 si la radiación incidente real fue menor que la estimada, y mayor que 1.0 si la radiación incidente real fue mayor que la estimada. De esta forma, se compensan las variaciones en la radiación incidente que se pudieran presentar en cada período. En todos los tratamientos, la fuente de N fue urea. Para todos los tratamientos, se consideró un período de aplicación de cuatro días.

Cuadro 1. Ecuaciones del modelo NUMAC.

Variable	Ecuación	Observaciones
Grados - día acumulados para el período i.	$GD_i = \Sigma(T_m - T_c)$	T_m , temperatura media diaria T_c , temperatura crítica = 8°C
Área foliar para el período i	$AF_i = 0.001GD_i - 0.024$	
Área foliar acumulada	$Afa = \Sigma AF_i$	
Índice de área foliar	$IAF = 3.3(Afa)$	3.3, densidad de plantas m ⁻²
Radiación fotosintéticamente activa interceptada (Q)	$Q = Rad^{\circ}(0.5)(1 - e^{-0.75IAF})$	Rad° , radiación global incidente, 0.5 factor de transformación a Q, 0.75 coeficiente de extinción en el dosel
Producción de materia seca (MS) total	$MS = 2.36 Q$	2.36, coeficiente de transformación de radiación a materia seca
MS dirigida a las hojas (componente fotosintético)	$MSH = 0.72 MS$	0.72, coeficiente alométrico de distribución de MS a las hojas.
MS dirigida al tallo (componente estructural)	$MST = 0.28 MS$	0.28, coeficiente alométrico de distribución de MS al tallo.
Concentración de N en la MS de cada componente	$\%NH = 5.738MSH^{-0.2722}$ $\%NT = 3.35MST^{-0.1564}$	H = hoja T = tallo
Demanda de N de cada componente	$DNH = MSH(\%NH/100)$ $DNT = MST(\%NT/100)$	

Cuadro 2. Descripción de las estrategias de dosificación de N utilizadas en la evaluación del modelo.

Tratamiento	Descripción	N kg ha ⁻¹ día ⁻¹	Cita bibliográfica
1 California	Crecimiento vegetativo	1.21	Castellanos (1997)
	Inicio de floración	3.65	
	Llenado de fruto	2.84	
	Cosecha	1.21	
2 Bar - Yosef 1	Días de emergencia/transplante:		Bar-Yosef (1999)
	1 - 30	1.00	
	31 - 40	2.00	
	41 - 80	2.50	
	81 - 100	1.50	
	101 - 120	1.00	
	121 - 150	1.50	
	151 - 180	4.00	
181 - 220	2.00		
3 Bar - Yosef 2	Solución nutritiva con 130 mg L ⁻¹ de N		Bar-Yosef y Sagiv (1982a,b)
4 NUMAC	NUMAC con base en la radiación incidente		

El manejo del cultivo se realizó siguiendo las prácticas estándar de un sistema de producción comercial y consistió en: camas a doble hilera con una distancia entre plantas de 0.4 m en tres bolillo, obteniéndose una densidad de 3.3 plantas m⁻². Las plantas se podaron a un solo tallo. A partir de la aparición del sexto racimo, se procedió al retiro de las hojas inferiores, manteniendo una masa foliar de aproximadamente 21 hojas planta⁻¹. Se ralearon los racimos a cuatro tomates por cada uno y se instaló una caja de abejorros para asegurar la polinización.

En el momento del transplante, se realizó una aplicación de P₂O₅ y K₂O a una dosis de 00-100-50 kg ha⁻¹, utilizando ácido fosfórico y sulfato de potasio. La aplicación de cada uno de los fertilizantes se hizo en forma independiente mediante el uso de un inyector Dosmatic. El mismo inyector se utilizó en la aplicación de N para cada uno de los tratamientos.

Cuadro 3. Cantidad total de N aplicado y eficiencia de N para cada estrategia de dosificación de N.

Cantidad total de N aplicado	California	Bar-Yosef		NUMAC
		1	2	
g m ⁻²	39.24	34.5	42.38	29.20
kg ha ⁻¹	392.4	345	423.8	292.0
Eficiencia kg de fruto/g de N	0.13	0.14	0.11	0.17

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones, la unidad experimental constó de una cama de 12 m de largo.

El invernadero utilizado fue del tipo arco, con doble capa de cubierta de polietileno PF-602. Consta de dos naves de 8 x 30 m cada una. El invernadero (y, por lo tanto, las camas) está orientado en dirección oriente-poniente. En la parte media del interior del invernadero, se instaló una estación meteorológica Davis, mediante la cual se obtuvo información sobre: radiación incidente, temperatura máxima y mínima y porcentaje de humedad relativa. La estación se programó para promediar información a intervalos de 15 min. El sensor de radiación se instaló a una altura de 3.0 m del suelo, cuidando que no fuera bloqueada la radiación por la estructura del invernadero. Se tomó la precaución de nivelar el sensor en posición horizontal.

El 5 de septiembre de 2000, semillas del híbrido Gabriela se sembraron en charolas, y el 15 de octubre de 2000, se transplantaron. El experimento finalizó el 17 de marzo de 2001. Para esta fecha, se había realizado la cosecha de frutos de entre el segundo y tercer racimo, el noveno estaba en floración y las plantas presentaron el crecimiento lineal típico de las plantas de hábito indeterminado, el cual se mantuvo hasta el fin del cultivo. Se realizaron seis cortes a intervalos de una semana: 10, 17 y 24 de febrero y 3, 10, y 17 de marzo. Los frutos se cosecharon maduros (rojos) y se clasificaron de acuerdo con los criterios especificados en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Criterios de clasificación de los frutos de tomate[†].

Grado	Peso	Características
	g	
Exportación	181 - 240	Cero defectos, sin daño de ningún tipo y color uniforme.
Primera	120 - 180	Daño leve, pequeñas rajaduras, manchas o maduración no uniforme.
Resto	Peso fuera de los rangos señalados	Frutos con daños considerables.

[†]United States Standards for Grades of Greenhouse Tomatoes, US Department of Agriculture.

Se realizaron tres muestreos de hojas recientemente maduras para el análisis foliar de N y corresponden a 27 de diciembre de 2000, 2 de febrero y 2 de marzo de 2001. También se tomó una muestra de la hoja de mayor tamaño del segundo simpodio, (de arriba hacia abajo) que es en donde se tiene la mayor tasa fotosintética. Para la evaluación de MS, a partir de 45 días del transplante y a intervalos de 15 días, se realizó un muestreo de una planta completa por repetición. Las muestras se secaron en estufa de aire forzado a 60 °C.

El análisis de varianza se realizó con el procedimiento GLM y el de regresión con el procedimiento REGRESION (curve estimation) del paquete SPSS 9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de las Estrategias de Dosificación en la Producción de Tomate

Las cantidades totales de N aplicado para cada una de las estrategias se presentan en el Cuadro 3.

La mayor cantidad de N aplicada corresponde a la estrategia Bar-Yosef 2 y la menor a la estrategia

NUMAC. Normalmente, las estrategias basadas en una solución de concentración constante, como es el caso de la estrategia Bar-Yosef 2, cuyo volumen de aplicación varía en función de la demanda de agua por el cultivo, traen como resultado una aplicación excesiva de nutrimentos. Este es uno de los principales problemas en la producción de hortalizas en invernadero (Voogt y Korsten, 1996).

Las estrategias Bar-Yosef 1 y California presentan cantidades totales de aplicación inferiores a la Bar-Yosef 2, pero superiores a la NUMAC. Es notable que el tratamiento NUMAC, que presenta la cantidad más baja de N aplicado, represente 68.9% del tratamiento con la mayor cantidad de N aplicado.

Con relación a la eficiencia en el uso del N expresada en kg de fruta producida por g de N, Beck, (1997) mencionó que la eficiencia del cultivo del tomate en invernadero con fertirriego es de 0.52, valor obtenido mediante el uso de un modelo denominado KLIWADU. Esta cantidad difiere considerablemente de la reportada por Bar-Yosef (1999) de 450 kg de N ha⁻¹ para una producción de 195 Mg ha⁻¹ (una eficiencia de 0.43 kg de fruto por g de N, cálculo nuestro). Los valores de eficiencia que se muestran en el Cuadro 3 son menores que los reportados; sin embargo, la estrategia NUMAC presenta el valor más alto. Al hacer esta comparación debe tenerse en cuenta que hasta el momento del corte seis, se habían cortado frutos del tercer racimo por lo que el valor de la eficiencia tiende a aumentar conforme se avanza en el ciclo del cultivo.

La producción de tomate se evaluó con base en la clasificación del fruto en producción total y producción calidad de exportación. En los Cuadros 5 y 6, se presentan las medias de tratamiento a un nivel de significancia estadística de 5% para cada uno de los cortes realizados. Los resultados obtenidos indican que los tratamientos tuvieron el mismo efecto, tanto en la producción total, como en la de calidad de exportación; por lo que cualquier estrategia puede utilizarse en la dosificación de N.

Cuadro 5. Producción total (Mg ha⁻¹) de cada tratamiento en cada uno de los cortes.

Tratamiento	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4	Corte 5	Corte 6	Acumulado
California	5.01	13.60	7.07	10.65	7.11	7.48	50.94
Bar-Yosef 1	3.33	10.21	6.61	13.82	7.25	7.30	48.54
Bar-Yosef 2	3.55	10.04	7.55	11.04	7.57	6.99	46.76
NUMAC	3.80	10.71	8.62	13.18	7.85	9.13	51.68
Fc	1.799	2.268	2.397	0.896	0.524	0.528	1.279
Significancia	NS						

Cuadro 6. Producción calidad de exportación (Mg ha^{-1}) de cada tratamiento en cada uno de los cortes.

Tratamiento	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4	Corte 5	Corte 6	Acumulado
California	4.55	10.10	3.01	8.29	5.61	6.29	37.86
Bar-Yosef 1	3.32	8.52	3.45	11.48	5.51	5.62	37.92
Bar-Yosef 2	3.55	7.67	3.39	7.98	5.85	5.48	33.93
NUMAC	3.19	8.37	3.34	10.13	6.25	6.35	37.62
Fc	1.406	1.441	0.394	1.078	0.554	0.577	1.094
Significancia	NS						

Relacionando la información de los Cuadros 5 y 6 con la del Cuadro 2, se observa que la estrategia California es la que presenta las cantidades más altas de dosificación de N en las primeras etapas del cultivo; esto se manifiesta en los primeros cortes, aunque la producción alcanzada no llega a una significancia estadística. Posteriormente, en los dos últimos cortes realizados, la producción tiende a ser constante y relativamente menor, lo cual es debido a que las dosis de N aplicadas en la etapa fenológica de cosecha son menores que las de las otras estrategias.

La producción obtenida mediante la estrategia NUMAC tiende a aumentar conforme avanza el ciclo del cultivo, debido a que la cantidad de radiación interceptada por el dosel es mayor, lo que da por resultado mayores tasas de crecimiento y, por lo tanto, una mayor demanda de N que se refleja en un aumento en la producción, (Figuras 1A a D; Cuadros 5 y 6). Si la cantidad de radiación interceptada aumenta, la producción de MS es mayor y, en consecuencia, incrementa la demanda de N, pero al alcanzar el dosel la máxima área foliar permitida por la práctica del retiro de las hojas basales, la cantidad de N por aplicar depende exclusivamente de la radiación incidente.

Si se extrapola la producción obtenida hasta el Corte 6 para un ciclo de 10 racimos, la producción total obtenida sería de aproximadamente 150 Mg ha^{-1} , la cual es aceptable para un cultivo en invernadero en suelo con riego por goteo.

Relación entre las Dosis Aplicadas y la Producción de Materia Seca

El segundo criterio de evaluación del modelo se refiere a que debe existir una relación entre la cantidad de N aplicado y el crecimiento del cultivo. En las Figuras 1A a D, se muestra la relación entre las dosis de N aplicadas, en cada período de aplicación (cuatro días) para cada tratamiento, en conjunto, así como la acumulación de materia seca simulada (MSs) y real (MSr). Puede observarse que sólo las estrategias

Bar-Yosef 2 y NUMAC presentan una relación entre la acumulación de MS y las dosis de N aplicadas.

En el Cuadro 7, se presentan los resultados de MSr y MSs en cada fecha de muestreo para la estrategia NUMAC. Tanto la MSs, como la MSr presentan la misma tendencia, pero el modelo tiende a sobrestimar la producción de MS.

Con relación a la dosificación de N, la estrategia NUMAC (Figura 1D) presenta una clara relación entre la producción de MS y las dosis de N aplicadas. Desde el transplante del cultivo, conforme aumenta la tasa de producción de MS aumenta la cantidad de N aplicado. A partir del período 20, el IAF se mantiene relativamente constante debido a la poda de hojas basales; por lo que la producción de MS es función directa de la radiación incidente (Figura 2). De esta forma, la producción de MS presenta un comportamiento lineal y la cantidad de N por aplicar es relativamente constante. Las variaciones que se observan son debidas a variaciones en la radiación incidente. La estrategia denominada Bar-Yosef 2, también presenta una tendencia similar aunque menos estrecha en el inicio del cultivo. Esto es debido a que conforme aumenta el área foliar, también se incrementa la transpiración y es mayor la cantidad de agua aplicada, por lo que la cantidad de N aplicado también aumenta. Se ha demostrado que la absorción de N por las plantas es independiente de la cantidad de agua transpirada (Andriolo *et al.*, 1996) y que un mecanismo de retroalimentación negativa, basada en la concentración de N en la hoja, es el que regula la absorción de N en forma de nitrato (Buysse *et al.*, 1996), la cual está estrechamente relacionada con la fotosíntesis y, por lo tanto, con la radiación incidente (Scaife y Schloemer, 1994).

Un aspecto relacionado con la estrategia NUMAC, que es conveniente considerar, es que durante las primeras etapas de crecimiento, la radiación interceptada por el dosel es baja, debido a la escasa cantidad de área foliar presente. Esta condición es detectada por el modelo y ocasiona que la cantidad de N por aplicar sea subestimada con relación a la

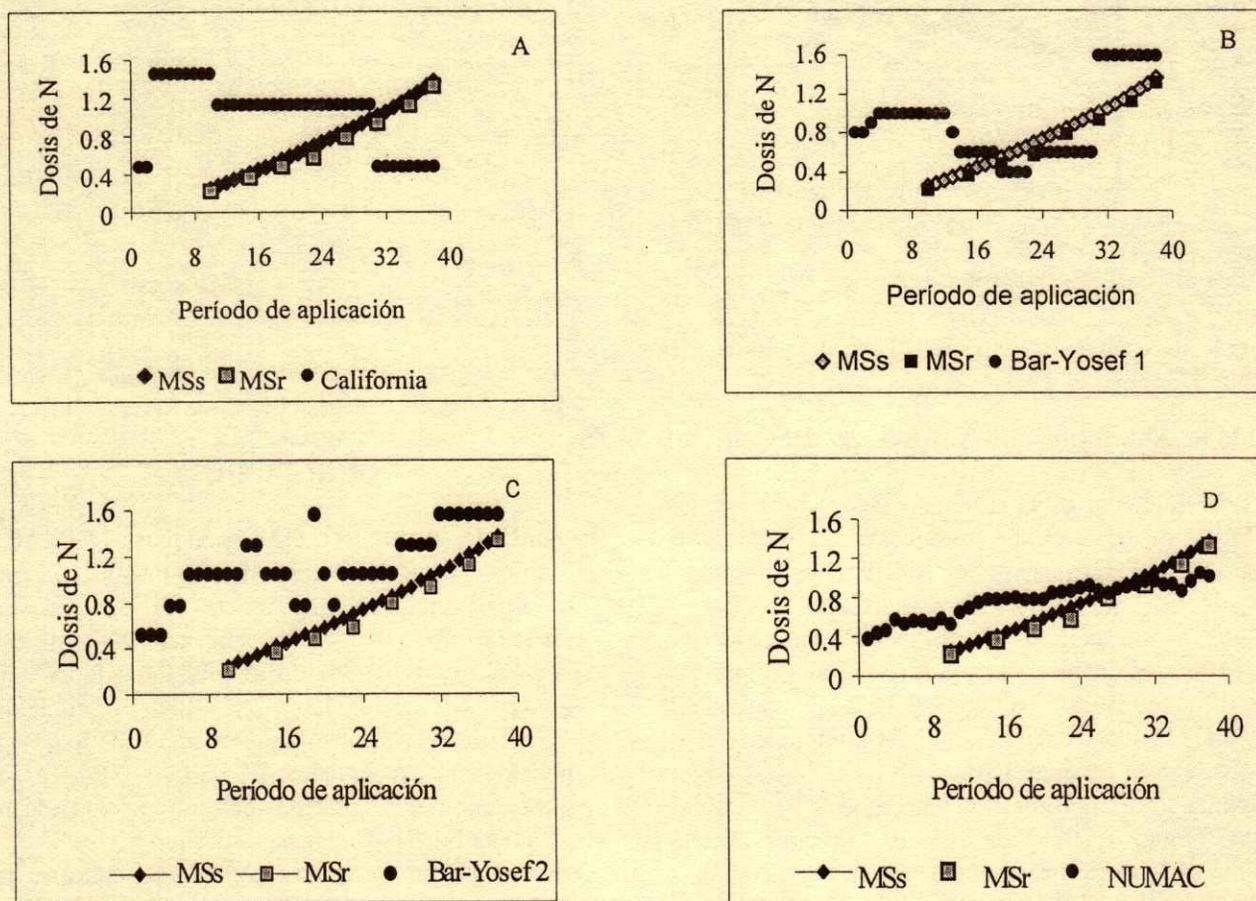


Figura 1. Dosis de N (g m^{-2}) aplicadas para cada período y cada tratamiento. MS representa a la materia seca acumulada MSs = simulada, MSr = real (g m^{-2})/1000.

cantidad mínima necesaria para tener la máxima tasa de crecimiento, dando como resultado un grado de abastecimiento nutrimental de deficiencia. Este hecho implica la necesidad de una precisa descripción del área foliar en las primeras etapas del cultivo, así como de una evaluación del grado de abastecimiento

Cuadro 7. Materia seca real (MSr) y simulada (MSs) para cada fecha de muestreo.

Días al transplante	MSr	MSs	Días al transplante	MSr	MSs
	-- kg m^{-2} --			-- kg m^{-2} --	
45	0.220	0.254	105	0.787	0.849
60	0.364	0.415	120	0.932	1.016
75	0.482	0.548	135	1.125	1.207
90	0.574	0.699	150	1.324	1.374

nutrimental en la etapa inicial de desarrollo. En este mismo contexto, cabe la posibilidad de que el modelo defina correctamente la cantidad de N por aplicar, pero que ésta sea tan poca que dado la baja capacidad de exploración de las raíces, la planta no la pueda tomar en su totalidad, presentándose, por lo tanto, una condición de deficiencia.

En la Figura 2, se presenta la relación existente entre la acumulación de materia seca producida y las dosis de N aplicadas. La relación es estrecha y presenta, hasta el momento del sexto corte, un comportamiento de tipo lineal con un coeficiente de regresión de 0.93. Las variaciones observadas son la respuesta a las diferencias en la radiación incidente. Ninguna de las otras estrategias presenta esta relación.

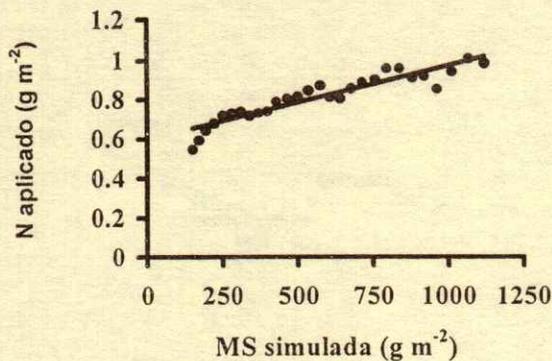


Figura 2. Relación entre la cantidad de N aplicado y la materia seca (MS) simulada.

Grado de Abastecimiento Nutricional del Cultivo

La estimación de la demanda de N por el modelo NUMAC se basa en la producción de biomasa en tiempo real. Esta aproximación ofrece una estrategia ecofisiológica del manejo de la nutrición nitrogenada del cultivo, la cual es determinada por la mínima concentración de N necesaria para tener la máxima tasa de crecimiento. Sands (1995) estableció que la tasa de fotosíntesis de la hoja presenta una relación positiva con la concentración de N en la hoja y en una aproximación mecanicista mediante un estudio teórico. Sands (1996) definió que la concentración mínima de N para una máxima tasa fotosintética es de 2.8 mmol g^{-1} (3.92 %) de N en las hojas que presentan la mayor actividad fotosintética, las cuales se encuentran en la fracción superior del dosel. Una conclusión interesante del mismo autor es que la tasa de actividad fotosintética presenta una mejor relación con el N, cuando se expresa en unidades de g de N m^{-2} de área foliar que en términos de concentración y esta forma de expresión es mejor para efectos de simulación.

En el Cuadro 8, se presentan los resultados del análisis foliar de N para cada fecha de muestreo, así como la concentración de N en las hojas superiores del dosel.

En el contexto de evaluación del modelo, la concentración que presentan las hojas es igual para las cuatro estrategias consideradas. Para el estrato superior del dosel, los valores de concentración son mayores que los reportados por Sands (1996). De acuerdo con estos resultados, se establece que el grado de abastecimiento nutricional del cultivo es igual para

Cuadro 8. Contenido foliar de N para cada estrategia de dosificación de N. Entre paréntesis la concentración de N en las hojas superiores del dosel.

Tratamiento	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3
	27 Dic. 2000	2 Feb. 2001	2 Mar. 2001
	----- % -----		
California	3.66 (4.84)	3.40 (4.56)	3.86 (4.04)
Bar-Yosef 1	3.43 (4.63)	3.49 (4.36)	3.92 (4.27)
Bar-Yosef 2	3.59 (4.72)	3.65 (4.54)	3.68 (4.33)
NUMAC	3.57 (4.56)	3.54 (4.62)	3.66 (4.42)
Fc	0.70	3.284	1.361
Significancia	NS [†]	NS	NS

[†]No significativo.

cada estrategia de dosificación durante el ciclo del cultivo y que éste puede considerarse como adecuado.

CONCLUSIONES

- Para la validación del modelo NUMAC, se establecieron tres criterios de evaluación en términos de funcionalidad agronómica: 1) La producción obtenida en la evaluación debe ser aceptable e igual para las estrategias de dosificación consideradas en el proceso de evaluación. 2) Debe presentarse una relación estrecha entre las dosis de N definidas por el modelo y el crecimiento del cultivo. 3) El grado de abastecimiento nutricional del cultivo inducido por la estrategia NUMAC debe ser adecuado.

- Los resultados de la evaluación indican que el modelo presenta un comportamiento aceptable de acuerdo con los tres criterios de evaluación.

- Al término del experimento (cosecha de frutos del tercer y cuarto racimo), se obtuvo una producción de 51.68 Mg ha^{-1} con una cantidad total de 292 kg ha^{-1} de N definida por el modelo NUMAC. Esta cantidad representa 31% menos de N que al utilizar una solución nutritiva de concentración constante de 130 mg L^{-1} de N con una producción de 46.73 Mg ha^{-1} .

- Se obtuvo una estrecha relación ($r = 0.93$) entre las dosis definidas por el modelo y la acumulación de materia seca (MS), así como un grado de abastecimiento nutricional adecuado.

- Con el uso del modelo se demuestra que la tasa diaria de absorción de N depende de las condiciones climáticas (radiación y temperatura) en las que el cultivo desarrolla, por lo que la dosis en cada aplicación tiene un efecto mayor que la cantidad total de N aplicado.

- Si se ignoran las variaciones en la tasa de absorción de N, ocasionadas por variaciones en la tasa de crecimiento del cultivo, se llega a una sobrefertilización que trae como resultado la acumulación de N en el suelo, la contaminación del ambiente y un costo innecesario.

- De acuerdo con los resultados obtenidos, la definición de dosis de N mediante el uso del modelo de simulación NUMAC es agronómicamente aceptable.

- Para mejorar la conducta del modelo, así como la amplitud de aplicación, es necesaria la realización de experimentos de evaluación en diferentes condiciones y estaciones del cultivo, poniendo énfasis en la descripción de la tasa de expansión foliar.

LITERATURA CITADA

- Andriolo, J.L., J. LeBot, C. Gary, P. Orlando, B. Brunel y C. Sarrouy. 1996. An experimental set-up to study carbon, water, and nitrate uptake rates by hydroponically grown plants. *J. Plant Nutr.* 19: 1441-1462.
- Bar-Yosef, B. 1999. Advances in fertigation. *Adv. Agron.* 65: 1-75.
- Bar-Yosef, B. y B. Sagiv. 1982a. Response of tomatoes to N and water applied via trickle irrigation system. I. Nitrogen. *Agron. J.* 74: 633-636.
- Bar-Yosef, B. y B. Sagiv. 1982b. Response of tomatoes to N and water applied via trickle irrigation system. II. Water. *Agron. J.* 74: 637-639.
- Beck, M. 1997. Ecological irrigation and fertigation of soil grown plants in greenhouses. *Acta Horticulturae* 450: 413-417.
- Bertin, N. y C. Gary. 1993. Tomato fruit-set: A case study for validation of the model TOMGRO. *Acta Horticulturae* 328: 185-193.
- Buysse, J., E. Smolders y R. Merckx. 1996. Modelling the uptake of nitrate by a growing plant with an adjustable root nitrate uptake capacity. I. Model description. *Plant Soil* 181: 19-23.
- Castellanos R., J.Z. 1997. Las curvas de acumulación nutrimental en los cultivos hortícolas y su importancia en los programas de ferti-irrigación. pp. 73-82. *In: Memorias del segundo Simposium Internacional de ferti-irrigación. Querétaro, México.*
- Enriquez R., S.A., G. Alcántar González, J.Z. Castellanos Ramos, E. Arjona Suárez, D. González Eguiarte e I. Lazcano Ferrat. 2003. Nutrición mineral acoplada al crecimiento (NUMAC): Nutrición con N para tomate en invernadero. 1. Descripción del modelo y obtención de parámetros. *Terra* 21: 167-175.
- Enriquez R., S.A., G. Alcántar González, J.Z. Castellanos Ramos, E. Arjona Suárez, D. González Eguiarte e I. Lazcano Ferrat. 2003. Nutrición mineral acoplada al crecimiento (NUMAC): Nutrición con N para tomate en invernadero. 2. Curva de concentración crítica y demanda de nitrógeno. *Terra* 21: 177-183.
- Greenwood, D., G. Lemaire, G. Gosse, P. Cruz, A. Draycott y J.J. Neeteson. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Ann. Bot. (London)* 66: 425-436.
- Jones, P.N. y P.S. Carberry. 1994. A technique to develop and validate simulation models. *Agric. Syst.* 46: 427-442.
- Justes, E., B. Mary, J.M. Meynard, J.M. Machet y L. Thelier-Huches. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann. Bot. (London)* 74: 397-407.
- Marcelis, L.F.M. 1993. Simulation of biomass allocation in greenhouse crops: A review. *Acta Horticulturae* 328: 49-67.
- Monteith, J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9: 747-766.
- Sands, P.J. 1995. Modelling canopy production. I. Optimal distribution of photosynthetic resources. *Aust. J. Plant Physiol.* 22: 593-601.
- Sands, P.J. 1996. Modelling canopy production. III. Canopy light-utilization efficiency and its sensitivity to physiological and environmental variables. *Aust. J. Plant Physiol.* 23: 103-114.
- Scaife, A. y S. Schloemer. 1994. The diurnal pattern of the nitrate uptake and reduction by spinach *Spinacia oleracea* L. *Ann. Bot. (London)* 73: 337-343.
- Scholten, H. y M.W.M. van der Tol. 1993. Towards a metrics for simulation model validation. pp. 398-410. *In: J. Grasman y G. van Straten (eds.). Predictability and nonlinear modeling in natural sciences and economics. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.*
- Seginer, I. e I. Ioslovich. 1998. A Single state variable model to mimic TOMGRO for control applications. *Acta Horticulturae: Crop Models in Protected Cultivation* 456: 93-99.
- Sinclair, T.R. y R.C. Muchow. 1999. Radiation use efficiency. *Adv. Agron.* 65: 215-265.
- Voogt, W. y P. Korsten. 1996. Mineral balances for radish crops grown under glass. *Acta Horticulturae* 428: 53-64.

PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL CULTIVO DE NOPAL CON RIEGO POR GOTEO EN LA COMARCA LAGUNERA

Water Productivity in Prickly Pear Using Drip Irrigation in the Lagunera Region

Ignacio Orona Castillo^{1†}, Arnoldo Flores Hernández²,
Miguel Rivera González¹, J. Guillermo Martínez¹ y J. de Jesús Espinoza Arellano³

RESUMEN

Ante la escasez de agua en la Comarca Lagunera, situada en la zona árida del norte de México, se requiere encontrar cultivos que, combinados con tecnologías de ahorro de agua, hagan un uso eficiente de este recurso. El objetivo de este trabajo es mostrar la productividad del agua en variedades de nopal hortícola (*Opuntia* spp.) con riego por goteo, utilizando cintilla colocada en forma superficial y subsuperficial, para lo cual se evaluaron cuatro variedades de nopal que pueden destinarse al consumo humano y forrajero. Las variedades se establecieron con dos sistemas de riego (goteo superficial y goteo subsuperficial) y con tres niveles de riego, los cuales consistieron en aplicar cantidades de agua equivalentes a 30, 45 y 60% de la evaporación diaria. En el primer año de establecimiento del cultivo, *Opuntia ficus indica* obtuvo la mayor productividad (kg de materia verde por m³ de agua), y la mayor producción se alcanzó con el sistema de producción con cintilla superficial. El análisis estadístico de los valores de producción no reporta diferencias significativas entre ambos sistemas de producción. Por otra parte, de las cuatro variedades de nopal evaluadas, tres pertenecientes a *Opuntia megacantha* y una a *Opuntia ficus indica*. *O. ficus indica*, clasificada como Variedad 69, mostró mayor productividad con ambas formas de riego y presentó una producción promedio de 102 807 kg ha⁻¹, concluyéndose que este cultivo y esta variedad

representan una opción productiva viable a los problemas de escasez de agua que enfrenta la zona semiárida y, en particular, la región de estudio.

Palabras clave: *Opuntia* spp., riego por goteo superficial y subsuperficial.

SUMMARY

As a result of water shortage in the Comarca Lagunera Region, located in the northern arid zone of Mexico, it is necessary to find crops that, combined with water-saving technologies, use water efficiently. Since prickly pear (*Opuntia* spp.) is a crop with low water requirements and is suitable to the regional climatic conditions, this survey shows the performance of four kinds of prickly pear that can be used as either forage or food for human consumption. The crop was established under two different drip irrigation conditions: surface and subsurface location. Three moisture levels were imposed: 30, 45, and 60% of the daily evaporation. In the first year of establishment of the crop, *Opuntia ficus indica* had the highest productivity (kg green matter m⁻³ water) with all of the water treatments applied (this varied between 11.0 and 17.6 kg m⁻³), and the highest yield was obtained with the superficial tape location production system. The statistic analysis of the production values reports no significant differences between the two tape location production systems. On the other hand, three of the four kinds of prickly pear evaluated pertained to *Opuntia megacantha*, and one to *Opuntia ficus indica*. The latter, classified as Variety 69, showed the highest production with a mean of 14.17 kg m⁻³ water under both irrigation systems. The results of the analyses of variance indicate that the prickly pear varieties are different among themselves, Variety 69 being the most productive, with an average production of 102 807 kg ha⁻¹, concluding that this crop represents a viable production alternative to water shortage problems that semiarid zones face and, particularly, the study region.

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta y Atmósfera-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Gómez Palacio, Durango. †(orokaz@yahoo.com)

² Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Durango.

³ Campo Experimental de la Laguna-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Matamoros, Coahuila.

Index words: *Opuntia spp.*, *drip irrigation*, *surface and subsurface tape*.

INTRODUCCIÓN

La región semiárida del norte de México se caracteriza por presentar zonas agrícolas de riego altamente productivas, tal es el caso de la Comarca Lagunera, ubicada en el desierto chihuahuense. Sin embargo, en la última década, el área irrigada en el Distrito de Riego 017, dada la escasez de agua, no satisface las necesidades de empleo y fuente de ingresos para la población que habita la zona rural de la Comarca, por lo que es necesario buscar fuentes alternativas de vida.

Por otra parte, para cubrir las demandas de agua agrícola y mantener la producción regional, se ha recurrido a la extracción de aguas subterráneas; esta práctica atenta contra la conservación del recurso, pues de acuerdo con un estudio hecho para la Comisión Nacional del Agua por el Instituto Técnico de Estudios y Servicios, S.A., el acuífero principal de la Comarca Lagunera reporta un déficit de 414.95 millones de metros cúbicos (ITEPSA, 1999). Contradictoriamente, mediante la explotación de cultivos altamente demandantes de agua, como la alfalfa, que para el año agrícola 1999 (SAGAR, 1999) se reportaron 35 277 ha, se aplicaron láminas de riego que rebasaron 2 m. Esta zona constituye la principal cuenca lechera del país, por lo cual se requiere fomentar el desarrollo de cultivos alternativos que se adapten a las condiciones del medio natural y que con mejoras tecnológicas relativas a formas de riego se logre un mejor aprovechamiento del recurso escaso: el agua.

Entre los cultivos que pueden adaptarse a la región con requerimientos hídricos menores que los cultivos tradicionales, se encuentra el nopal (*Opuntia spp.*). Para el nopal se desconoce la lámina de riego que permita obtener rendimientos atractivos de nopalito fresco; es decir, no sólo requerimientos hídricos que permiten su supervivencia. A este respecto, De la Rosa y Santamaría (1998) señalaron que la precipitación media anual requerida para la sobrevivencia del nopal es de 116 mm distribuida en el año.

En México, las principales zonas nopaleras se ubican en lugares con temperaturas medias anuales que oscilan entre 16 y 23 °C. Pimienta (1986) y Nobel (1994) indicaron que especies de nopal cultivadas pueden sufrir daños con heladas de -5 y -10 °C, sobre

todo en plantas jóvenes, durante los dos primeros años de desarrollo. Con respecto a temperaturas altas, Nobel (1994) indicó que las pencas de *Opuntia ficus indica* pueden sobrevivir a 69 °C durante una hora, requiriendo terrenos con pendientes menores que 3% y bien drenadas.

La importancia económica que guarda este cultivo en México muestra que en 1999 dentro del grupo de las principales hortalizas, la de nopalito ocupó el 11^o lugar en volumen y el 12^o lugar en lo referido a valor de la producción (SAGAR-CEA, 1999). La exportación en fresco de nopalito en el período de 1995 a 1996 osciló en 2.5 millones de dólares, con un volumen aproximado de 4000 t, que representaban 1.36% de la producción nacional, mientras que el monto estimado para nopalito procesado se calculó en 7.5 millones de dólares (Flores *et al.*, 1995).

En México, las superficies sembradas de "nopalito" durante 1999, de acuerdo con cifras oficiales (SAGAR-CEA, 1999) comprenden 7327 ha, distribuidas en 19 estados, donde el estado de Morelos y el Distrito Federal concentran 68% de la superficie total; la principal zona productora de nopal se ubica en regiones con temperaturas medias anuales que oscilan entre 16 y 23 °C. La Comarca Lagunera registra una temperatura promedio anual de 19.9 °C y una precipitación promedio de 257 mm, por lo que el manejo del cultivo del nopal con riego constituye un cultivo alternativo a la escasez de agua.

El rendimiento promedio nacional en condiciones de riego es bajo, 22.2 t ha⁻¹, comparado con el obtenido en condiciones de temporal, 49.9 t ha⁻¹ (esta diferencia se debe más a la densidad de plantación por hectárea que a la condición de riego o temporal). Sin embargo, con riego, el estado de Tamaulipas presenta un promedio de 80 t ha⁻¹, gracias al buen nivel de tecnificación alcanzado en el cultivo (SAGAR-CEA, 1999).

Lo anterior muestra que el cultivo no requiere elevados volúmenes de agua, sino microclimas adecuados para su desarrollo y un cuidadoso manejo y explotación.

Flores (2001) estimó que, en México, tres de los 13 millones de hectáreas de matorral crasicaule están ocupadas con comunidades de nopal. Los cladodios jóvenes (nopalitos) de un gran número de especies silvestres se utilizan durante la temporada de brotación (primavera) para consumo humano en los estados del centro y norte del país y se comercializa poco. Una excepción se presenta en San Luis Potosí, donde los nopalitos del nopal tapón (*O. robusta*

Wend) se recolectan en poblaciones silvestres dentro de un radio de 120 km durante la temporada de marzo a junio. Los nopalitos se limpian, se pesan y se empacan en "arpilleras" para ser transportados a mercados donde se venden en fresco, o bien, a cinco empresas industrializadoras, para ser procesados, empacados y exportados o comercializados en el mercado nacional.

La literatura sobre productividad del agua en nopalito es prácticamente inexistente. El productor de nopal con riego en la Comarca Lagunera como en otros estados, se concreta a regar cuando lo considera conveniente o cuando tiene agua disponible para ello. Grajeda y García (1982) reportaron que en un sistema de producción con microtúneles las necesidades de riego son de 3 L de agua m⁻² cada mes para obtener una buena producción dependiendo de la textura del suelo, pues suelos con texturas franco arenosas y arena franca tienen filtración elevada y requieren mayor cantidad de agua.

En Tecate, Baja California Norte, se cultiva el nopal verdura en invernaderos, con camas y altas densidades, utilizando sistemas de riego por goteo (Flores *et al.*, 1995), lo que evita disminución en producción por descenso de temperaturas, heladas y granizadas; sin embargo, para iniciar este sistema de producción, se requieren inversiones muy elevadas, lo cual deja fuera a gran número de personas que deseen emprender una actividad de este tipo. Además, la Comarca Lagunera no presenta el riesgo por heladas que caracteriza a la región de Baja California Norte, lo que no justifica plenamente la utilización de invernaderos para producción de nopal, en todo caso el uso de microtúneles sólo en los meses fríos de diciembre a febrero.

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar la productividad del agua en variedades de nopal hortícola con riego por goteo, utilizando cintilla colocada en forma subsuperficial y superficial en el primer año de establecimiento, partiendo de tres hipótesis: a) el sistema de riego por goteo con cintilla subsuperficial es más eficiente que el goteo superficial; b) existen diferencias en productividad del agua entre los tres niveles de humedad a que se somete el cultivo; y c) existen diferencias en productividad de nopalito por volumen de agua aplicado entre las variedades de nopal utilizadas.

Con la finalidad de cultivar comercialmente el nopal en la Comarca Lagunera y haciendo un manejo eficiente del agua, resulta adecuado el uso de la cintilla, pues la menor precipitación anual en la

región, a diferencia de regiones productoras de México, como Milpa Alta y Otumba, no permite el desarrollo comercial del nopal. Cabe señalar que en la región de estudio se está propagando sandía y melón, reportándose mayores rendimientos por volumen de agua utilizado.

MATERIALES Y MÉTODOS

En abril de 2000 y hasta marzo de 2001, se llevó a cabo la evaluación de productividad del agua en nopalito para verdura, en el campo experimental del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua, Suelo, Planta y Atmósfera en Gómez Palacio, Durango, para lo cual se utilizaron cuatro materiales vegetativos que resultaron los de mayor capacidad de adaptación en condiciones de temporal. Estos materiales figuran dentro de los mejores de 55 evaluados en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), en Bermejillo, Durango, durante el período de 1989 a 1992, y que se colectaron en los estados de México, San Luis Potosí, Aguascalientes, Zacatecas y Coahuila.

La región Lagunera se encuentra situada geográficamente entre 24° 22' y 26° 23' N y 102° 22' y 104° 47' O. El clima es árido con una precipitación media anual de 257 mm. La temperatura promedio anual es de 19.9 °C, siendo la temperatura máxima de 33.7 °C y la mínima de 6.2 °C. La evaporación media anual es de 2400 mm y la altitud de 1139 m. Por otra parte, la radiación solar media es de 562 cal cm⁻² d⁻¹ con un fotoperíodo medio anual de 13 h d⁻¹ y una humedad relativa que oscila entre 30 y 60%.

El presente trabajo se estableció en un suelo arcillo-limo-arenoso, clasificado por el US Department of Agriculture (Soil Survey Staff, 1996) como Typic haplargid. En los primeros 30 cm de profundidad, los parámetros de humedad son de 16% en marchitamiento permanente y 31% en capacidad de campo. La densidad aparente es de 1.22 g cm⁻³, la conductividad eléctrica asciende a 1.985 dS m⁻¹ y un pH de 8.34. De acuerdo con las características edáficas y la altitud requeridas para el cultivo del nopal, reportadas por De la Rosa y Santamaría (1998), las del lugar de estudio se adaptan al desarrollo del cultivo.

El diseño experimental utilizado fue bloques al azar con un arreglo en parcelas subdivididas, asignando a las parcelas grandes, los sistemas de riego (goteo superficial y goteo subsuperficial); a las

parcelas medianas, los niveles de humedad (30, 45 y 60% de la evaporación diaria tomada de un tanque evaporímetro tipo "A"); y a las parcelas chicas, las variedades de nopal, utilizando tres repeticiones por tratamiento.

El tanque evaporímetro se colocó a campo abierto al nivel del suelo en la parte media del experimento, de manera que la evaporación registrada coincidiera lo más posible con la de la zona experimental.

En la parcela chica se destinaron las cuatro variedades de nopal: tres identificadas como 40, 60 y 8 que pertenecen a *Opuntia megacantha* y una Variedad 69 que pertenece a *Opuntia ficus indica*. A un lado del experimento se establecieron seis parcelas testigo sin riego que sólo sirvieron como referencia. Para comparar los rendimientos, no se consideró como un tratamiento adicional.

Las Variedades 69 y 60 se colectaron en Pabellón, Aguascalientes; la Variedad 40 en Calera, Zacatecas, y la Variedad 8 en San Martín de las Pirámides, estado México, en 1987. Estos materiales vegetativos están en el banco de germoplasma de nopal de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, sede en Bermejillo, Durango, de la Universidad Autónoma Chapingo.

El sistema de riego por goteo se utilizó con dos variantes: superficial y subsuperficial. En ambos casos, se utilizó cintilla T-Tape TSX 710, calibre 10 mil (0.250 mm), diseñada para elevar la uniformidad en hileras largas y con un gasto de 0.5 L h^{-1} funcionando a una presión de 0.70 kg cm^{-2} (10 PSI). El espacio entre goteros fue de 0.2 m, lo que hace un gasto de $2.5 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Se colocó una línea regante por hilera de nopal y la capacidad de la bomba usada para el riego fue de 0.372 kW (0.5 HP), se puso un filtro en la entrada del agua en la tubería de conducción para evitar el taponamiento de los emisores. En el caso del riego subsuperficial, la cintilla se ubicó a 15 cm de profundidad.

La preparación del suelo consistió en un barbecho y un rastreo. Se aplicó estiércol de bovino a razón de 5.7 kg m^{-2} , mismo que se incorporó al suelo mediante otro rastreo, perpendicular al primero. Previo a la aplicación del estiércol, se realizó un muestreo de éste para determinar sus características químicas.

Los cladodios madre se cortaron y se trataron con caldo bordelés en marzo, se mantuvieron en sombra durante 15 días para cicatrizar la parte de corte afectada y se plantaron finalmente el 5 de abril. Posterior a esto, el huerto experimental se cercó con

mallita de alambre usada para gallinero para protegerlo de animales silvestres.

El riego de establecimiento se hizo hasta llevar a capacidad de campo los primeros 60 cm de profundidad del suelo para todos y cada uno de los tratamientos, incluyendo el testigo, debido a que en este estrato existe una mayor concentración radicular del cladodio. La densidad poblacional a que se plantaron las diferentes variedades fue a 0.4 m entre pencas y 0.6 m entre hileras de pencas, dejándose un espacio de 3 m entre parcelas. El número de hileras por parcela fue de cuatro, donde cada una corresponde a una variedad. El tamaño de parcela fue de 1.8 m de ancho por 4 m de largo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Productividad del Agua con Riego por Goteo Superficial y Subsuperficial

Los volúmenes de agua aplicados, la producción acumulada y el producto medio del agua para cada variedad y tratamiento de humedad experimental se muestran en el Cuadro 1. El producto medio del agua (kg m^{-3}) es definido como el valor resultante del cociente de producción fresca total acumulada y el volumen de agua aplicado en un periodo de un año.

A menor aplicación de agua se advierte mayor productividad promedio del agua en todas las variedades y con ambos sistemas de riego, lo que confirma el escaso requerimiento de agua del nopal para sus funciones metabólicas. Con aplicación excesiva de agua, la planta es afectada por hongos y bacterias que originan pudriciones, clorosis y, en general, deficiente desarrollo vegetativo (De la Rosa y Santamaría, 1998). En los tres tratamientos de humedad, se aprecia mayor productividad media del agua en la especie *O. ficus indica*, identificada como Variedad 69, lo que demuestra la mayor capacidad de almacenamiento de agua por esta especie (López *et al.*, 2001), lo que influye en su mayor vocación para producción de nopalito, siguiéndole las tres variedades de la especie *O. megacantha*. Se observa que la especie *O. megacantha* Variedad 8 en cualquier criterio y forma de riego presenta la menor productividad del agua, debido a su mayor vocación para producción de tuna.

Si se consideran los valores de producción experimental y se escalan a un huerto de una hectárea

Cuadro 1. Consumo de agua, producción y productividad del agua para cuatro tipos de nopal verdura con riego por goteo superficial y subsuperficial en el primer año de establecimiento en la Comarca Lagunera.

Tratamiento (% de evap)		<i>Opuntia megacantha</i> 60		<i>Opuntia ficus indica</i> 69		<i>Opuntia megacantha</i> 40		<i>Opuntia megacantha</i> 8	
		a	b	a	b	a	b	a	b
30	m ³ ha ⁻¹	5 340							
	t ha ⁻¹	83.0	80.0	100.4	93.3	83.8	86.7	67.9	65.1
	kg m ⁻³	15.5	15.0	18.8	17.5	15.7	16.2	12.7	12.2
45	m ³ ha ⁻¹	7 620							
	t ha ⁻¹	81.8	76.9	108.9	95.2	76.8	93.0	66.2	68.7
	kg m ⁻³	10.7	10.1	14.3	12.5	10.1	12.2	8.7	9.0
60	m ³ ha ⁻¹	9 930							
	t ha ⁻¹	86.7	89.1	114.5	104.2	81.1	97.5	60.3	77.7
	kg m ⁻³	8.7	9.0	11.5	10.5	8.2	9.8	6.1	7.8
Testigo	m ³ ha ⁻¹	3 360							
	t ha ⁻¹	18		22.4		15.9		14.4	
	kg m ⁻³	5.4		6.7		4.7		4.3	

a = riego por goteo superficial. b = riego por goteo subsuperficial.

de superficie con el siguiente arreglo topológico: 0.4 m de distancia entre plantas y 0.6 m de distancia entre hileras, en camas de 2.4 m de ancho por 100 m de largo y pasillos de 1.5 m de ancho que dividen las camas para maniobras del cultivo (corte y acarreo), se podrían tener 30 camas de cuatro hileras y se obtendría el rendimiento señalado en el Cuadro 1; aquí queda manifiesto que la especie *O. ficus indica* Variedad 69 sería la más productiva con cualquiera de los tres niveles de humedad y formas de riego estudiados.

En términos de volumen de agua utilizado por hectárea, considerando la superficie realmente ocupada por el cultivo, equivalente a 7200 m², para el riego que considera 30% de evaporación, correspondería a 5340 m³ ha⁻¹, volumen inferior al requerido en cultivos regionales tradicionales como maíz, frijol, hortalizas y forrajes, que oscila entre 5500 m³ ha⁻¹ para frijol y 18 000 m³ ha⁻¹ para alfalfa. Esta comparación demuestra que el cultivo del nopal puede ser un cultivo alternativo a la escasez de agua en la zona semiárida. Nobel (2001) indicó que esta eficiencia en el uso del agua se explica porque el nopal tiene un metabolismo ácido crasuláceo, con estomas abiertas por la noche y cerrados durante el día y con menor número de estomas por milímetro cuadrado (de 20 a 30), lo que le permite tener una eficiencia en el uso del agua cuatro veces mayor que las plantas C3 (alfalfa, algodón, trigo) y C4 (maíz, caña de azúcar).

Volúmenes de agua menores que 5340 m³ probablemente disminuyan el rendimiento total, pues como se aprecia en el Cuadro 1, a volúmenes

mayores, el rendimiento tiende a incrementarse. Sin embargo, de la productividad del agua a menores volúmenes no puede decirse nada *a priori*, aunque es posible que pueda incrementarse. A este respecto, se requieren estudios adicionales.

Revisada la productividad del agua en ambas formas de riego por goteo, se presenta a continuación el análisis estadístico que muestra si hubo diferencias significativas en la productividad del agua entre formas de riego, niveles de humedad y entre variedades de nopal.

Como se aprecia en el Cuadro 2, el análisis de varianza mostró que no existe diferencia significativa entre las formas de riego (cintilla superficial y cintilla subsuperficial) utilizadas; es decir, la respuesta productiva del nopal es igual entre ambas formas de riego. Esto puede deberse a la profundidad con que se colocó la cintilla (15 cm), lo que, por otra parte, tuvo como ventaja menor incidencia de maleza, menos daño por pisoteo a la cintilla y menor cantidad de fugas de agua por perforación de la misma por espinas. La colocación de la cintilla a mayor profundidad puede ocasionar menor aprovechamiento del agua por la planta, pues su sistema radicular se extiende a escasos centímetros de profundidad. Por el contrario, el agua se perdería por percolación en el suelo.

Se observó la presencia de diferencias significativas en productividad del agua entre niveles de humedad y variedades de nopal. Para conocer qué tratamiento de humedad y qué variedad es estadísticamente mejor, se realizó una prueba de comparación de medias por el método de diferencia

Cuadro 2. Resumen del análisis de varianza para producto medio del agua por sistema de riego, contenido de humedad y variedades de nopal

Fuente	G.L.	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor	FPr>F
Bloques	2	6.740	3.37	1.48	0.236 ns
Factor A (sistema de riego)	1	0.000	0.00	0.00	1.000 ns
Factor B (nivel de humedad)	2	547.344	273.67	120.41	0.000 **
Factor C (variedad de nopal)	3	207.923	69.30	30.49	0.000 **
A x B	2	4.980	2.49	1.09	0.344 ns
A x C	3	17.041	5.68	2.49	0.070 ns
B x C	6	7.500	1.25	0.55	0.769 ns
A x B x C	6	4.366	0.72	0.32	0.923 ns
Error	46	104.545	2.27		
Error	71	900.443			

** diferencia significativa entre tratamientos de humedad a $P < 0.01$; ns = no significación estadística. CV = 12.7677%.

mínima significativa (DMS) a una probabilidad de 99% de estos factores (Cuadro 3).

En los resultados del análisis se aprecia que el mayor producto del agua se consigue con el tratamiento de riego que considera 30% de la evaporación, siendo de esta manera estadísticamente diferente de los tratamientos que consideran 45 y 60% de la evaporación; la razón de esto se encuentra en el metabolismo ácido crasuláceo que caracteriza al nopal, así como al tejido ceroso que presenta en su exterior, que le ayuda a prevenir pérdidas de agua al medioambiente. Por ello, aplicaciones adicionales de agua disminuirán la producción total de nopal, debido a que la capacidad de respuesta de la planta es limitada por su funcionamiento fisiológico.

Con respecto a las variedades en estudio, se aprecia que la Variedad 69, perteneciente a *O. ficus indica*, es estadísticamente diferente al resto, además, es la que mayor rendimiento por metro cúbico de agua alcanza; esto confirma que el cultivo de nopal posee una excelente eficiencia en el aprovechamiento del agua.

Considerando los resultados obtenidos para el primer año de establecimiento del cultivo con cualquiera de las modalidades de riego por goteo

Cuadro 3. Análisis de medias (kg de nopalito fresco m⁻³ de agua) para los factores contenido de humedad y variedad de nopal (DMS $\alpha = 0.01$).

Contenido de humedad		Variedad	
	kg m ⁻³		kg m ⁻³
Riego a 30%	15.53 a [†]	69	14.17 a
Riego a 45%	10.94 b	40	12.13 b
Riego a 60%	8.94 b	60	11.50 b
		8	9.41 c

[†] Medias con la misma letra en columna no son estadísticamente diferentes.

estudiadas, es posible incrementar la producción que se tiene registrada en la actualidad en México.

De este manera, la producción que consume la región metropolitana de la región Lagunera de Coahuila y Durango podría ser ofertada por productores locales, pues competirían vía precios con el nopal proveniente del resto del país, debido a los costos de transporte en que incurren al introducirlo; o, en su caso, podría destinarse a satisfacer la demanda potencial existente en los Estados Unidos de América, con la población de origen mexicano en las ciudades de los estados de California, Arizona, Texas e Illinois.

CONCLUSIONES

- Con base en los objetivos planteados, se concluye que no existe diferencia estadística significativa en el rendimiento del cultivo de nopal sometido a las dos formas de colocación de la cintilla, por lo que la hipótesis inicial se rechaza. Sin embargo, se recomienda el cultivo con riego con cintilla subsuperficial, pues en la conducción de una parcela de nopal a nivel semi-comercial, el riego con cintilla superficial requiere mayor mano de obra; también ocurre un daño a la cintilla debido al pisoteo y deshierbe mecánico, y a un mayor número de fugas de agua por contracción y expansión del plástico que sujeta la cintilla.
- En el primer año de establecimiento, la producción de nopalito obtenida con goteo superficial o subsuperficial rebasa ampliamente las registradas en promedio en México, lo que muestra que con estos sistemas de producción es posible incrementar substancialmente la productividad del nopal.
- Con respecto a la existencia de diferencias en productividad de nopalito por volúmenes de agua aplicados a las variedades de nopal, planteado por la

segunda hipótesis, ésta se acepta. Asimismo, se concluye que existen también diferencias significativas en productividad entre las variedades estudiadas; *Opuntia ficus indica*, Variedad 69, mostró más productividad.

- El hecho de que la Variedad 69 sea la de mayor aceptación en el mercado, debido a la escasa presencia de espinas en el nopalito, la hace más atractiva al productor que desee dedicarse a este cultivo.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional de Zonas Áridas, Delegación Comarca Lagunera por su apoyo al proyecto de investigación. Al Fideicomiso para el Riesgo Compartido, Delegación Comarca Lagunera por apoyar en la región la transferencia de los resultados de investigación. A Salvador Ramírez Pérez, técnico del Programa de Nopal en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria-Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.

LITERATURA CITADA

- De la Rosa H., P. y D. Santamaría A. 1998. El Nopal. Usos, manejo agronómico y costos de producción en México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Flores V., C.A. 2001. Producción, industrialización y comercialización de nopalitos. Reporte de investigación 58. Universidad Autónoma Chapingo-Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial. Chapingo, México.
- Flores V., C.A., J.M. Luna y P.P. Ramírez. 1995. Mercado mundial de nopalito. Resumen Ejecutivo. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial. Chapingo, México.
- Grajeda G., J.E. y V.A. García. 1982. Cultive nopal para verdura. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- ITEPSA. Instituto Técnico de Estudios Profesionales y de Servicios. 1999. Lineamientos estratégicos para el desarrollo hidráulico de la Región Administrativa VII "Cuencas Centrales del Norte". Capítulo 1. Marco de Referencia. Torreón, Coahuila, México.
- López G., J.J., J.M. Fuentes R. y R.A. Rodríguez. 2001. Production and use of *Opuntia* as forage in Northern Mexico. pp. 29-36. In: "Cactus (*Opuntia* spp.) as forage". Plant Production and Protection Paper 169. FAO. Rome, Italy.
- Nobel, P.S. 1994. Remarkable agaves and cacti. Oxford University Press. New York.
- Nobel, P.S. 2001. Ecophysiology of *Opuntia Ficus-Indica*. pp. 13-20. In: "Cactus (*Opuntia* spp.) as forage". Plant Production and Protection Paper 169. FAO. Rome. Italy.
- Pimienta B., E. 1986. Establecimiento y manejo de plantaciones de nopal tunero en Zacatecas. Publicación Especial 5. Centro de Investigaciones Agrícolas del Centro Norte-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Calera, Zacatecas, México.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1999. Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria. Cd. Lerdo, Durango, México.
- SAGAR-CEA. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural-Centro de Estadística Agropecuaria. 1999. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola en los Estados Unidos Mexicanos. México, D.F.
- Soil Survey Staff. 1996. Keys to soil taxonomy. 7th edition. National Resources Conservation Service. US Department of Agriculture. Washington, D.C.

METABOLISMO DEL CARBONO EN EL CITOSOL NODULAR Y BACTEROIDE EN LA SIMBIOSIS *Rhizobium tropici*-*Phaseolus vulgaris* VAR. AFRICA EN CONDICIONES SALINAS

Carbon Metabolism in Nodule Cytosol and Bacteroid in the Symbiosis *Rhizobium tropici* - *Phaseolus vulgaris* Var. Africa Under Saline Conditions

Lina Pliego¹, Antonio Ocaña² y Carmen Lluch²

RESUMEN

En este trabajo, se analizó el efecto del estrés salino (0, 50 y 100 mM) aplicado desde la siembra a plantas de frijol en simbiosis con *Rhizobium tropici*. Las plantas se crecieron en una cámara de cultivo con condiciones controladas. Se valoraron el crecimiento, la fijación de N, las actividades enzimáticas del citosol nodular y del bacteroide, así como la acumulación de solutos compatibles. La salinidad afectó negativamente el rendimiento de la planta y la fijación de N y de manera más acentuada a esta última, además de provocar la acumulación de prolina y azúcares solubles totales. Por otro lado, en el nódulo, la actividad de la enzima PEPC declinó, mientras que ADH, ICDH, LDH, MDH y 6PGDH aumentaron su actividad por efecto del tratamiento salino. En el bacteroide, las enzimas ICDH, MDH, 6PGDH y BHBBDH mostraron un descenso en su actividad, en tanto que la ADH y LDH[†] recuperaron su actividad con la dosis más alta de NaCl. La actividad de las diferentes enzimas detectada en el bacteroide fue mucho más baja que la encontrada en el nódulo. Se concluye que, dado el efecto negativo del tratamiento salino sobre el crecimiento y la fijación del N₂, el frijol en simbiosis es un cultivo sensible a la salinidad, por lo que el aumento en la concentración de prolina no es un indicio de tolerancia, sino más bien del grado de sensibilidad

del mismo. Con respecto a la acumulación de azúcares solubles totales en el nódulo y la inhibición de la actividad de las enzimas MDH, ICDH, 6PGDH en el bacteroide y no en el citosol nodular, por efecto de la presencia de la sal, se evidencia que la caída en la actividad nitrogenasa no es debida a una disminución en el aporte de fotosintatos al nódulo, sino más bien a una limitación en la disponibilidad y transporte de ácidos dicarboxílicos, intermediarios biosintéticos y poder reductor al bacteroide.

Palabras clave: Bacteroide, *Phaseolus vulgaris*, *Rhizobium*, salinidad, prolina.

SUMMARY

The effect of salt stress (0, 50, and 100 mM) applied from sowing on common bean plants in symbiosis with *Rhizobium tropici* CIAT899 strain was analyzed. Plants were grown in a growth chamber with controlled conditions. Plant growth, N fixation, enzymatic activities of nodular cytosol and bacteroid, as well as the accumulation of compatible solutes, were registered. Salinity negatively affected plant biomass and N fixation, and in a more accentuated way in the latter; furthermore, salt caused the accumulation of proline and total soluble sugar. In addition, the enzymatic activity of PEPC in nodules decreased while MDH, ADH, LDH, ICDH y 6PGDH increased its activity by the effect of salinity. In the bacteroid, the enzymes: MDH, ICDH, 6PGDH and BHBBDH showed a drop in their activity, but ADH and LDH[†] recovered their activity with the highest dosage of NaCl. The enzymatic activities in the bacteroid were lower than those detected in the nodule. The data presented show the negative effect of saline treatment on growth and N fixation. In consequence, common bean in symbiosis is considered a sensitive crop. According to this response, proline accumulation is not evidence of tolerance but only of a degree of the plant's sensitivity. With respect to the total soluble

¹Instituto Tecnológico Agropecuario No. 23. de Oaxaca, Apartado Postal 273, 68000 Oaxaca, Oaxaca, México. (linapliego@hotmail.com)

²Departamento de Biología Vegetal, Facultad de Ciencias, Campus Fuentenueva 18071, Universidad de Granada, España.

Recibido: Septiembre de 2001. Aceptado: Septiembre de 2002.
Publicado en Terra 21: 203-212.

[†] PEPC: fosfoenol piruvato carboxilasa; ADH, alcohol deshidrogenasa; ICDH: isocitrato deshidrogenasa; LDH: lactato deshidrogenasa; MDH: malato deshidrogenasa; 6PGDH: 6-fosfogluconato deshidrogenasa; BHBBDH: β-hidroxiobutirato deshidrogenasa.

sugar accumulation in the nodule and the inhibition of the activity of the enzymes MDH, ICDH, and 6PGDH in the bacteroid and not the cytosol nodule by the effect of the presence of salt, it is evident that the decrease in nitrogenase activity is not due to a decrease in photosynthates, but to a limitation in the supply and transport of dicarboxylic acids, biosynthetic intermediates and reducing power.

Index words: Bacteroid, common bean, Rhizobium, salinity, proline.

INTRODUCCIÓN

La fijación biológica del N (FBN) que ocurre en leguminosas cultivadas en simbiosis con bacterias del género *Rhizobium* conlleva una serie de cambios positivos en las características físicas, químicas y biológicas de los suelos, además de que permite reducir la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Hardarson, 1993; López, 1998).

Diversos factores ambientales pueden reducir la efectividad de la simbiosis *Rhizobium*-leguminosas. En la actualidad, uno de los más importantes es la salinidad, ya que afecta de manera notable a la fertilidad y productividad de los suelos y, en consecuencia, disminuye el rendimiento de los cultivos (Dudley, 1994).

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es una leguminosa tropical de gran relevancia debida a su amplia distribución geográfica, así como por consumo como fuente importante de proteínas en la dieta humana. Como ocurre en la mayoría de las leguminosas, el frijol es considerado sensible al estrés salino (Läuchli, 1984), que afecta, de manera negativa, todas las etapas implicadas en el establecimiento de la simbiosis, así como el desarrollo de los nódulos y, como consecuencia, reduce la eficiencia de la FBN (Zahran y Sprent, 1986; Elsheikh y Wood, 1990; Ikeda, 1994; Cordovilla *et al.*, 1995).

Se han sugerido diversas hipótesis para explicar el efecto del estrés salino sobre la FBN, entre las que se encuentran: disminución en el aporte de fotosintatos al nódulo (Bekki *et al.*, 1987; Georgiev y Atkins, 1993), reducción en el suministro de sustratos respiratorios a los bacteroides (Delgado *et al.*, 1994) y alteración de la barrera de difusión al oxígeno (Serraj *et al.*, 1998).

Cuando las plantas se someten a estrés salino, en general ellas responden provocando la acumulación de solutos compatibles como prolina y azúcares solubles

totales, los cuales están implicados en el mecanismo de osmoregulación (por ello llamados *osmolitos*), poniéndose de manifiesto que en muchos de los casos tal acumulación está relacionada con la tolerancia a la sal (Fougere *et al.*, 1991).

La sacarosa es el sustrato inicial y principal utilizado por el nódulo, y es rápidamente metabolizada a ácidos orgánicos como malato y succinato que son compuestos carbonados esenciales para la fijación de N₂ en el bacteroide, y se pone de manifiesto por el hecho de que mutantes de *Rhizobium* y *Bradyrhizobium* incapaces de utilizar glucosa y fructosa formaron nódulos efectivos, mientras que los imposibilitados para utilizar malato y succinato originaron nódulos inefectivos (Vance y Heichel, 1991).

El metabolismo fermentativo en el nódulo es un proceso perfectamente establecido en leguminosas (De Vries *et al.*, 1980; Tajima y La Rue, 1982), en particular, las principales enzimas de la vía fermentativa, la ADH y la LDH. Si bien en algunos casos, como en *Sesbania*, sólo se ha detectado actividad LDH, la cual mostró una alta afinidad por su sustrato, de manera adicional el lactato fue capaz de mantener la reducción de acetileno en bacteroides de esta leguminosa a valores mayores que el detectado en ausencia de sustratos exógenos. No obstante, en los casos de soya (*Glycine max*) y frijol estas características no se observaron (Trinchat y Rigaud, 1987). En la fermentación alcohólica, inicialmente detectada en nódulos de diversas leguminosas por Tajima y La Rue (1982), el etanol generado no fue capaz de proveer energía para actividad nitrogenasa en condiciones de anegamiento (Trinchat y Rigaud, 1989).

En estudios realizados por Ferri *et al.* (2000), se observó que los cambios inducidos por el estrés salino en el metabolismo carbonado en nódulos de frijol en los que se apreció un descenso en las actividades de las enzimas PEPC, MDH, ICDH y ADH, son diferentes a los observados en otras leguminosas como garbanzo (*Cicer arietinum*) (Soussi *et al.*, 1999) y chícharo (*Pisum sativum*) (Delgado *et al.*, 1993), sin embargo, no existen suficientes estudios para concluir al respecto. Por este motivo, el objetivo de este experimento fue evaluar el efecto de la salinidad sobre el crecimiento y la fijación de N, así como la respuesta de enzimas relacionadas con el metabolismo, tanto en el citosol nodular como en el

bacteroide, y la acumulación de osmolitos en plantas de *P. vulgaris*.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material Vegetal y Condiciones de Crecimiento

Semillas de *Phaseolus vulgaris* var. África se esterilizaron con una solución de hipoclorito de sodio a 5% por 3 min, posteriormente se lavaron con agua estéril y germinaron en vermiculita húmeda y estéril durante 48 h a 26 °C. Las plántulas cuyas radículas presentaron un tamaño uniforme (> 3 cm) se transfirieron a jarras Leonard (dos plantas por jarra) donde se inocularon con 1 mL de la suspensión de *Rhizobium tropici* cepa CIAT 899 con una densidad de 1×10^9 células mL⁻¹, utilizando vermiculita como sustrato. Finalmente, las plántulas transplantas se colocaron en una cámara de cultivo donde se desarrollaron en condiciones controladas (Fotoperiodo: 16 h luz/ 8 h; temperatura: 26 °C día/18 °C noche; humedad relativa 55% día/75% noche; intensidad lumínica: 450 μ mol m⁻² s⁻¹). El tratamiento salino (0, 50 y 100 mM NaCl) se aplicó desde la siembra durante 28 días, tiempo al término del cual se cosecharon y que correspondió con el inicio de la floración, coincidiendo con el máximo valor de actividad nitrogenasa en el cultivo, como lo han demostrado estudios previos. Las jarras se distribuyeron completamente al azar, regándose con solución nutritiva (Rigaud y Puppo, 1975), a la cual se le adicionaron los diferentes tratamientos de NaCl, en tanto que al testigo sólo se le aplicó la solución nutritiva. Con la finalidad de mantener las concentraciones indicadas de los tratamientos salinos, la solución nutritiva se cambió cada semana durante las dos primeras semanas del desarrollo del cultivo y cada tres días hasta la finalización del experimento. Cada tratamiento incluyó a seis plantas (3 jarras).

Preparación de la Solución Nutritiva

Para el aporte de nutrimentos necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas, se utilizó la solución nutritiva descrita por Rigaud y Puppo (1975). Las cantidades especificadas se disolvieron en 1 L de agua. Para el caso de los tratamientos salinos, se adicionó también el NaCl y, finalmente, el pH de la solución, en caso de que fuera necesario se ajustó a 7, utilizándose NaOH 1 N.

Microorganismo

El cultivo bacteriano de *Rhizobium tropici* (899) se desarrolló en matraces Erlenmeyer de 250 mL, conteniendo medio líquido de extracto levadura manitol (ELM) durante 48 h en agitación constante hasta tener 10^9 células mL⁻¹ a una temperatura de 26 °C. La población bacteriana se valoró por medición de la absorbancia (DO) a 540 nm en un espectrofotómetro Spectronic 301. Previamente, se elaboró una curva de crecimiento relacionando densidad óptica con población (número de células viables), la cual permitió estimar el tiempo necesario para lograr tener la población bacteriana especificada (Beck *et al.*, 1993).

Variables Evaluadas

Las variables evaluadas fueron: peso seco de planta (PSP), relación raíz-parte aérea (RPA), peso seco de nódulos (PSN), actividad nitrogenasa medida como actividad reductora de acetileno (ARA), contenido de prolina y azúcares solubles totales en hoja, raíz y nódulo, y las actividades enzimáticas: PEPC, MDH, ICDH, 6PGDH, ADH y LDH, tanto en el citosol nodular como en el bacteroide; en este último también se evaluó la BHBDH.

Manejo del Material Vegetal

Para la valoración de las variables relacionadas con el crecimiento y la fijación de N₂, las plantas se lavaron cuidadosamente en abundante agua para eliminar los restos de vermiculita y para separar las raíces de las plantas, evitando así que las mismas se rompieran. Posteriormente, las plantas se secaron con papel filtro y se separaron en parte aérea, raíz y nódulos, registrándose los valores del peso fresco de cada parte, enseguida se colocaron en una estufa a una temperatura de 70 °C durante 48 h para su secado y finalmente obtener el peso seco de las muestras.

Preparación del Citosol Nodular

La extracción y preparación del citosol nodular se realizó de acuerdo con la metodología propuesta por Delgado *et al.* (1993), a bajas temperaturas (2 a 5 °C), para lo cual 0.15 g de nódulos se homogeneizaron en 3 mL de tampón TRIS-HCl pH 7.4, Na₂-EDTA 10 mM, 10 mM dithiothreitol (DTT), 5 mM de MgCl₂,

1 mg mL⁻¹ de albúmina de suero bovino, glicerol a 10%. Con la finalidad de eliminar fenoles a esta mezcla, se le adicionó polivinil polipirrolidona (PVPP) en una proporción de 1/3 del peso de tejido fresco analizado. El homogeneizado se filtró a través de cuatro capas de lino y se centrifugó a 250 g por 5 min para eliminar restos celulares. El sobrenadante se centrifugó a 10 000 g para sedimentar el bacteroide. Finalmente, el sobrenadante resultante se centrifugó a 30 000 g por 30 min y se utilizó para determinar las actividades enzimáticas en el nódulo y para cuantificar el contenido de proteínas. Todas estas etapas se realizaron a temperatura baja (2 a 5 °C)

Preparación del Extracto Bacteroidal

La extracción y el aislamiento de los bacteroides se efectuaron en condiciones de microaerobiosis de acuerdo con la metodología de Delgado *et al.* (1993). En el presente estudio, 4 g de nódulos se homogeneizaron a baja temperatura (0 a 2 °C) en 10 mL de tampón Na-fosfato, pH 7.4 de la misma manera descrita con anterioridad, pero al pelet resultante se lavó con tampón Na-fosfato 50 mM pH 7.4, conteniendo sacarosa 300 mM y sulfato de magnesio 2 mM. En la siguiente etapa, los bacteroides se resuspendieron en un volumen de 4 mL de tampón 25 mM de fosfato de sodio (pH 7.4) y se sonicaron con un ultrasonido por espacio de 5 min a intervalos de 15 s a 80 W y 4 °C y finalmente centrifugados a 30 000 g por 30 min; el sobrenadante se utilizó para determinar las actividades enzimáticas en el bacteroide y la determinación del contenido de proteínas.

Actividades Enzimáticas

La valoración de las actividades enzimáticas en estudio se hizo por la aparición o desaparición de NADP(H) registrando el cambio de absorbancia a 340 nm en el medio de reacción a 30 °C. En todas las determinaciones, a excepción de la β-hidroxiacetato deshidrogenasa, se utilizó tampón bicina-KOH 100 mM a pH 8.5 para la mezcla de reacción, ya que se observó que se obtenían valores más altos de las actividades que utilizando los citados originalmente. La valoración de la 6PGDH (EC 1.1.1.42) se llevó a cabo por el método de Anthon y Emerich (1990). La

actividad PEPC (EC 4.1.1.31) y MDH (EC 1.1.1.37) se realizó de acuerdo con el método de Vance *et al.* (1983). Para la determinación de la actividad ICDH (EC 1.1.1.42), se optimizó el procedimiento descrito por Chen *et al.* (1988). En la determinación de las actividades ADH y LDH, se utilizó el método de Trinchat y Rigaud (1989). La actividad BHBDH (EC 1.1.1.30) se determinó por el método de Copeland *et al.* (1989) con la siguiente mezcla de reacción: tampón Hepes-NaOH pH 7, 50 mM acetoacetato 10 mM y NADH 0.20 mM.

Actividad Nitrogenasa

La actividad de esta enzima (EC) (1.7.99.2) se determinó por el ensayo de la reducción de acetileno de acuerdo con la metodología de Herdina y Silsbury (1991). Una porción de raíz nodulada (2 a 4 g) se introdujo en viales sellados perfectamente a los que, previa extracción de 10% de su atmósfera, se le adicionó el mismo volumen de acetileno. Los viales se incubaron en la oscuridad durante 20 min, tiempo en el cual se tomaron muestras que se recogieron en frascos sellados. Alicuotas de 0.2 mL se extrajeron de estos frascos para cuantificar el etileno formado en un cromatógrafo de gases Perkin-Elmer 8600, equipado con una columna de Poropak R.

Análisis de Solutos Orgánicos

La concentración de prolina y azúcares solubles totales se determinó colorimétricamente de acuerdo con lo reportado por Irigoyen *et al.* (1992a). En la determinación de prolina para eliminar cualquier interferencia debido al contenido de clorofilas en la parte aérea de este material, se extrajo con una mezcla de etanol-cloroformo-agua (12:5:1), según la metodología de Tully *et al.* (1979).

Diseño Experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar. Los resultados se sujetaron a un análisis estadístico con el programa Statgraphics plus (Statgraphics, 1992), determinándose la mínima diferencia significativa. (MDS) para cada una de las variables a una significancia de 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros de Crecimiento

El peso seco de planta se vio limitado con el tratamiento salino en aproximadamente 50% con la cantidad más alta de sal, que pone de manifiesto, en cierta forma, la sensibilidad del cultivo (Cuadro 1). La relación raíz-parte aérea (RPA) se estimuló con la sal, pero sólo fue significativo para la dosis más alta, en donde el aumento resultante fue de 24%.

Referente a los parámetros relacionados con la fijación simbiótica del N, se observó una caída en el PSN con porcentajes similares al grado de afectación en los parámetros de crecimiento; la actividad nitrogenasa medida como ARA fue la variable más afectada (Cuadro 1). ARA decayó en 32 y 62% con los tratamientos 50 y 100 mM de NaCl, respectivamente.

Cordovilla *et al.* (1995), Izzo *et al.* (1993; 1996) y Soussi *et al.* (1998) han reportado que el mayor grado de sensibilidad a la sal lo presenta la parte aérea de la planta, lo que quedó de manifiesto en el presente estudio en los valores reportados de la relación raíz-parte aérea. De igual forma, en otras leguminosas se ha reportado que la salinidad afecta de manera más acentuada a la nodulación y fijación de N₂ que al crecimiento (Elsheikh y Wood, 1990; Soussi *et al.*, 1998).

La inhibición del crecimiento y fijación de N en leguminosas por la salinidad se ha observado (Elsheikh y Wood, 1990; Delgado *et al.*, 1993; Serraj *et al.*, 1997), pero en este efecto inhibitorio otros factores están involucrados, entre los que destacan: estado de crecimiento, especie usada y tiempo de salinización (Misra *et al.*, 1996; Serraj *et al.*, 1998; Cordovilla *et al.*, 1995).

Cuadro 1. Variables de crecimiento y de fijación en plantas de *Phaseolus vulgaris* var. África inoculadas con la cepa CIAT 899 de *Rhizobium tropici* tratadas con NaCl desde la siembra.

Parámetro [†]	NaCl (mM)			MDS (0.05)
	0	50	100	
PSP (g)	3.157	2.483	1.509	0.39
RPA	0.261	0.312	0.324	0.06
PSN (g)	0.155	0.121	0.058	0.02
ARA ($\mu\text{mol C}_2\text{H}_2 \text{ g PF}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	51.658	35.036	19.590	13.21

[†] PSP = peso seco de planta; RPA = relación raíz-parte aérea; PSN = peso seco de nódulos; ARA = actividad reductora de acetileno.

Contenido de Prolina y Azúcares Solubles Totales

El contenido de prolina en los tejidos analizados (Figura 1) indica que se incrementó como consecuencia de la aplicación del estrés salino; en la hoja se observó un mayor incremento (43 y 173%) con respecto al control (9 $\mu\text{g g PF}^{-1}$), aunque, en términos reales, las mayores concentraciones (25, 33 y 42 $\mu\text{g g PF}^{-1}$ para 0, 50 y 100 mM de NaCl,

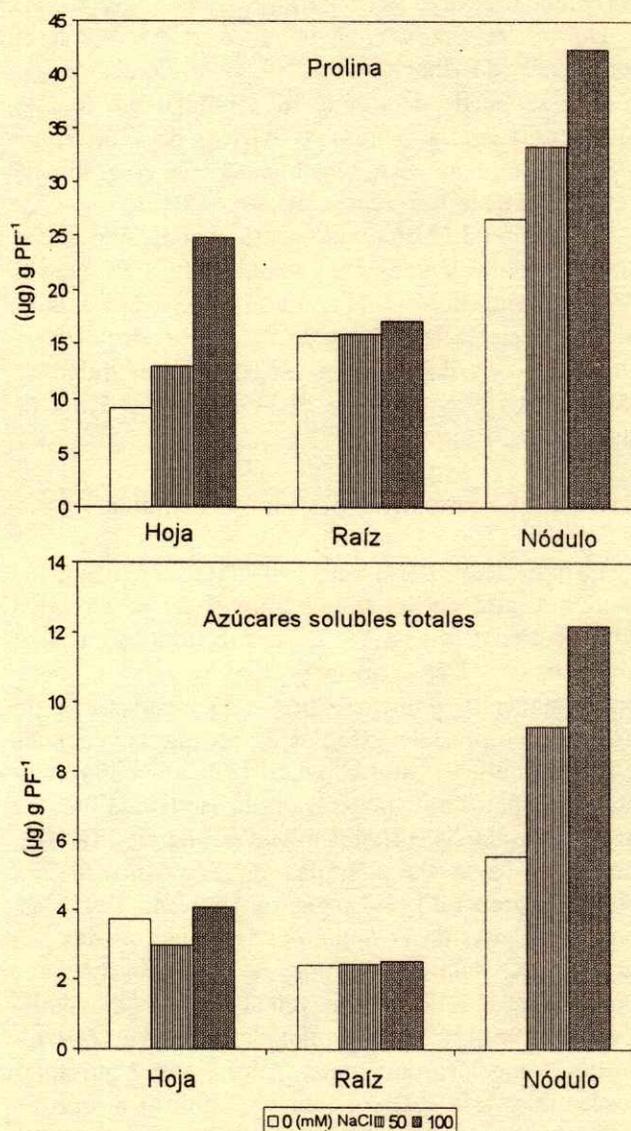


Figura 1. Contenido de prolina y azúcares solubles totales en plantas de *Phaseolus vulgaris* var. África inoculadas con la cepa CIAT899 de *Rhizobium tropici* y tratadas con NaCl desde la siembra. MDS_{0.05}: Prolina hoja = 2.805; hoja = 2.805; raíz = 0.929; nódulo = 0.389. Azúcares solubles totales hoja = 0.337; raíz = 0.215; nódulo = 0.389.

respectivamente) se alcanzaron en el nódulo. En muchas plantas se observa la acumulación de prolina cuando éstas se someten a diversas condiciones ambientales adversas, y ésta pudiera estar relacionada con la reducción de NADP celular (Hare y Cress, 1997). En condiciones de salinidad, la acumulación de prolina se ha reportado en diversos trabajos (Fougère *et al.*, 1991; Cordovilla *et al.*, 1995; Soussi *et al.*, 1998), pero no todos coinciden en que exista una correlación entre esta acumulación y la tolerancia a la sal (Pérez-Alfocea *et al.*, 1996).

De los resultados obtenidos en relación con el crecimiento, la fijación de N₂ y el contenido de prolina, se puede decir que la acumulación de este aminoácido en la variedad África de *Phaseolus vulgaris* está más bien relacionado con el grado de sensibilidad de la leguminosa al estrés salino.

La adición de NaCl incrementó el contenido de los azúcares solubles totales en nódulo en 119% con la dosis más alta de NaCl (Figura 1). Este hecho estaría indicando que la reducción de ARA por efecto de la salinidad no es debido a la escasa disponibilidad de fotosintatos (Seeman y Critchley, 1985; Hunt y Layzell, 1993).

Actividades Enzimáticas del Citosol Nodular

La aplicación de la sal (100 mM) incrementó los valores de ésta en 10%. Los valores de la actividad 6PGDH fueron semejantes a los encontrados en otras leguminosas. Una posible explicación a este comportamiento pudiera estar relacionada con lo observado en diversos estudios en los que las enzimas de la ruta de las pentosa fosfato (PP) aumentaron su actividad, pero a expensas de la actividad de las enzimas de la vía Embden-Meyer-Pharnas (EMP). Este es el caso de plántulas de *Phaseolus* de un cultivar tolerante a la sal (Misra y Dwivedi, 1995), así como en plantas de *Triticum aestivum* L. tratadas con Na₂SO₄ (Krishnaraj y Thorpe, 1996) y, además, coinciden con lo detallado por Porath y Poljakoff-Mayber (1968) y Kalir y Poljakoff-Mayber (1976), quienes encontraron que raíces de guisantes (susceptibles a la sal) y *Tamarix* (halofita) mostraron un incremento de la ruta de las PP, pero en guisante fue a expensas de EMP.

La actividad de la enzima PEPC disminuyó con la aplicación de sal en 16 y 42% para 50 y 100 mM, respectivamente (Figura 2), en tanto que la enzima MDH aumentó su actividad hasta en 78% con

100 mM; además, la actividad detectada para PEPC fue menor que la observada para MDH (262 veces), esto coincidió con lo reportado en otros trabajos (Delgado *et al.*, 1993; Soussi *et al.*, 1998; Ferri *et al.*, 2000). Es de sobra conocida la importancia de la vía PEPC-MDH en el aporte de ácidos dicarboxílicos para el funcionamiento del ciclo de ácidos tricarboxílicos (CAT), observándose una mayor sensibilidad de PEPC a la sal. La determinación de la actividad de las enzimas PEPC y MDH indica que la respuesta de estas enzimas varía dependiendo del tipo de estrés, de la especie y la variedad valorada (Irigoyen *et al.*, 1992b; Soussi *et al.*, 1998; Ferri *et al.*, 2000).

En el caso de las enzimas ADH y LDH, éstas mostraron una actividad más baja en relación con el resto de las enzimas (Figura 2). ADH se estimuló con la adición de sal hasta en 80% con 50 mM. Una respuesta similar se observó para la LDH, pero la actividad detectada resultó ser más baja (8 a 10 veces) que la de ADH, tanto en plantas control, como en las desarrolladas en condiciones salinas. Las condiciones de microaerobiosis generadas en el nódulo, por un lado evitan la inactivación de la nitrogenasa y al mismo tiempo suministran el O₂ necesario para la respiración bacteroidal, lo que explica la baja actividad de ADH encontrada en nódulos (Thynn y Werner, 1990; 1996).

La enzima ICDH también mostró una actividad moderada y, además, se estimuló de forma evidente con la dosis más alta de NaCl (82%). La importancia de esta enzima dentro del CAT se debe a que se relaciona directamente con el metabolismo del C y N, ya que produce 2-oxoglutarato para la síntesis de glutamato (Chen y Gadal, 1990). En los testigos, la enzima 6PGDH tuvo una actividad 30% menor que la de la ICDH. Con la aplicación del tratamiento 100 mM de NaCl, estas diferencias se evidenciaron aun más, ya que la actividad ICDH fue 2.4 veces mayor.

La exposición de las plantas al estrés salino estimuló, a excepción de PEPC, la actividad de las enzimas MDH, ADH y LDH en el nódulo, lo cual indica la inducción del metabolismo fermentativo, producido por el incremento de la barrera de difusión al O₂ (Serraj *et al.*, 1994; 1998).

Actividades Enzimáticas del Citosol Bacteroidal

Al valorar las actividades enzimáticas en el bacteroide, se apreció que éstas se afectaron en forma

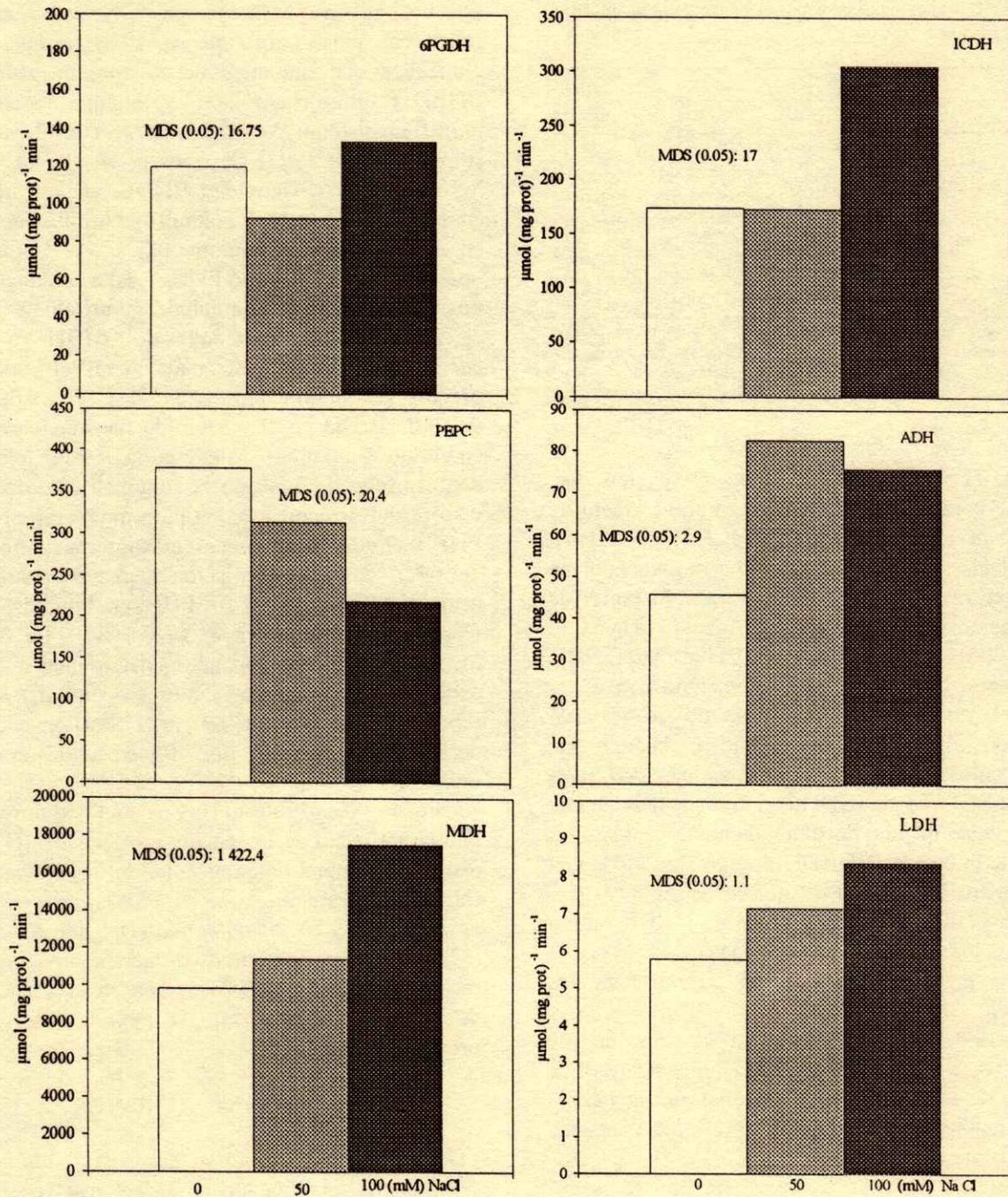


Figura 2. Actividades enzimáticas en nódulos de plantas de frijol tratadas con NaCl. 6PGDH = 6-fosfogluconato deshidrogenasa; ICDH = isocitrato deshidrogenasa; PEPC = fosfoenolpiruvato carboxilasa; ADH = alcohol deshidrogenasa; MDH = malato deshidrogenasa; LDH = lactato deshidrogenasa.

negativa con el estrés salino (Cuadro 2); excepciones fueron la ADH y la LDH.

La actividad MDH mostró los valores más altos en comparación con el resto de las enzimas (Cuadro 2) y éstos fueron comparativos con los reportados en otros

estudios (Karr *et al.*, 1984; Trinchat y Rigaud, 1989). Con la aplicación del tratamiento salino, su actividad decayó en 34% con respecto al testigo con la dosis 50 mM, en tanto que con 100 mM mostró una ligera recuperación en su actividad (Cuadro 2).

Cuadro 2. Actividades enzimáticas del bacteroide en plantas de frijol tratadas con NaCl.

Enzima [†]	NaCl (mM)			MDS (0.05)
	0	50	100	
	nmol (mg proteína) ⁻¹ min ⁻¹			
MDH	5389.70	3557.30	4158.90	226.10
ADH	2.36	0.56	3.10	0.28
LDH	2.94	0.87	4.74	0.37
6PGDH	46.96	39.03	6.95	3.45
ICDH	812.70	459.60	169.60	22.37
BHBDH	38.22	10.86	10.29	2.79

[†]MDH = malato deshidrogenasa; ADH = alcohol deshidrogenasa; LDH = lactato deshidrogenasa; 6PGDH = 6-fosfogluconato deshidrogenasa; ICDH = isocitrato deshidrogenasa; BHBDH = beta hidroxil butirato deshidrogenasa.

Los resultados obtenidos con relación a las enzimas ADH y LDH determinadas en bacteroides, indican una escasa actividad, misma que se afectó de manera positiva con 100 mM NaCl (31 y 61%). Aunque ADH es considerada un buen bioindicador de bajas concentraciones de oxígeno y, por lo tanto, de una limitación de difusión del mismo (Thynn y Werner, 1996), la actividad de ADH es baja como para considerar que tenga una función significativa.

Para el resto de las enzimas, no se observó recuperación alguna de su actividad, cuando las plantas se cultivaron en condiciones salinas. Así, para el caso de 6PGDH y de ICDH con la dosis más alta de sal, su actividad declinó aproximadamente en 85%. La actividad de la enzima BHBDH decayó casi 30%, con la misma intensidad con 50 y 100 mM de sal.

La actividad ICDH dependiente de NADP estuvo presente en los bacteroides de la variedad África a valores semejantes encontrados en otras referencias (Karr *et al.*, 1984; Saroso *et al.*, 1986; Kim y Copeland, 1996). Además en bacteroides aislados de *Pisum sativa*, Kurz y La Rue (1977) encontraron que el máximo de actividad de las enzimas nitrogenasa e ICDH coincidieron y dedujeron que probablemente sería una fuente de poder reductor.

En estudios llevados a cabo por Saroso *et al.* (1986) y Romanov *et al.* (1994), no se detectó actividad de la enzima 6PGDH en bacteroides; en el presente trabajo se encontró actividad de esta enzima en bacteroides aislados, apreciándose además un alto grado de sensibilidad de esta enzima a la sal.

El polihidroxibutirato (PHB) ayuda a mantener las demandas respiratorias del bacteroide y, al mismo tiempo, a soportar la fijación de N₂ en aquellos casos donde el aporte de fotosintatos decae como sucede con el llenado de vaina en leguminosas. Sin embargo,

esto no implica que la fijación de N₂ esté relacionada con la capacidad para sintetizar PHB, ya que estudios realizados con mutantes de *Rhizobium meliloti* sin BHBD resultaron ser Nod⁺ y, aunque su capacidad para fijar disminuyó ligeramente, se consideraron Fix⁺ (Povolo *et al.*, 1994; Cevallos *et al.*, 1996). Aunque los valores de la actividad BHBD, enzima implicada en la degradación del polihidroxibutirato, detectados en el bacteroide fueron bajos, se expresa la operatividad del ciclo de PHB, y estaría indicando una posible acumulación de polihidroxibutirato.

La elevada actividad de MDH e ICDH encontradas está relacionada con el aporte de precursores intermediarios en el CAT. Además, el valor de ICDH en el bacteroide fue más elevado que en el citosol nodular, lo que pudiera estar relacionado con el hecho de que estaría suministrando acetil CoA y su posterior condensación para intervenir en ciclo de PHB y el de proveer precursores intermediarios dentro del CAT, aunque información acerca del control en su utilización hacia CAT o PHB es limitado (Kim y Copeland, 1996; Karr *et al.*, 1984). La actividad metabólica de las enzimas determinadas en este experimento presentó valores similares a los reportados por Romanov *et al.* (1994) en bacteroides de *Rhizobium tropici* CFN299 y en células crecidas en vida libre.

Ferri *et al.* (2000) observaron en nódulos de frijol, que la actividad de las enzimas MDH, PEPC e ICDH disminuyó como consecuencia de la aplicación del estrés salino, mientras que en *Cicer arietinum* (Soussi *et al.*, 1999) y en *Pisum sativa* (Delgado *et al.*, 1993) el metabolismo fermentativo incrementó presumiblemente atribuido a una reducción en la concentración de oxígeno en el nódulo, como se observó en el presente trabajo.

CONCLUSIONES

- Debido al efecto negativo del estrés salino sobre el crecimiento y la fijación de N₂, el frijol en simbiosis se considera como un cultivo sensible a la salinidad, por lo que el aumento en la concentración de prolina no es un indicio de tolerancia, sino más bien del grado de sensibilidad del mismo. Con respecto a la acumulación de azúcares solubles totales en el nódulo, se evidencia que la caída en la actividad nitrogenasa no es debida a una limitación en el aporte de fotosintatos al nódulo, ni al metabolismo de los mismos, ya que las enzimas valoradas no se afectaron por efecto del estrés salino. La alta actividad de MDH

e ICDH detectada en bacteroides de *Rhizobium tropici* en los testigos apoyan la idea general que asimilan ácidos dicarboxílicos. Por lo tanto, la inhibición de la actividad de las enzimas MDH, ICDH, 6PGDH en el bacteroide y no el citosol nodular, como consecuencia de la adición de NaCl, y su efecto sobre ARA se debe más bien a una limitación en la disponibilidad y transporte de ácidos dicarboxílicos, intermediarios biosintéticos y poder reductor al bacteroide en nódulos de *Phaseolus vulgaris* de la variedad África.

AGRADECIMIENTOS

La autora principal agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología el apoyo financiero otorgado para la realización de sus estudios de doctorado. Este proyecto fue financiado también por los proyectos PB95-1159 y INCO950717 de la CEE.

LITERATURA CITADA

- Anthon, G.E. y D.W. Emerich. 1990. Developmental regulation of enzymes of sucrose and hexose metabolism in effective and ineffective soybean nodules. *Plant Physiol.* 92: 346-351.
- Beck, D.P., L.A. Materon y F. Afandi. 1993. Manipulation of *Rhizobium*. pp. 56-104. *In: Practical Rhizobium-Legume Technology Manual*. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas. Aleppo, Syria.
- Bekki, A., J.C. Trinchat y J. Rigaud. 1987. Nitrogen fixation (C_2H_2 reduction) by *Medicago* nodules and bacteroids under sodium chloride stress. *Physiol. Plant* 71: 61-67.
- Cevallos, M.A., S. Encarnación, A. Laija y J. Mora. 1996. Genetic and physiological characterization of a *Rhizobium etli* mutant strain unable to synthesize poly- β -hydroxybutyrate. *J. Bacteriol.* 178: 1646-1654.
- Chen, R.D. y P. Gadal. 1990. Do the mitochondria provide the 2-oxoglutarate needed for glutamate synthesis in higher plant chloroplasts? *Plant Physiol. Biochem.* 28: 141-145.
- Chen, R.D., J.V. Maréchal, J.P. Jacquot y P. Gadal. 1988. Purification and comparative properties of the cytosolic isocitrate dehydrogenases (NADP) from pea (*Pisum sativum*) root and green leaves. *Eur. J. Biochem.* 175: 565-572.
- Copeland, L., J. Vella y Z. Hong. 1989. Enzymes of carbohydrate metabolism in soybean nodules. *Phytochem.* 28: 56-71.
- Cordovilla, M.P., A. Ocaña, F. Ligerio y C. Lluch. 1995. Growth stage response to salinity in symbiosis *Vicia faba-Rhizobium leguminosarum* bv. *Viciae*. *Plant Physiol. (Life Sci. Adv.)* 14: 105-111.
- De Vries, G.E., P. In'Tveld y J.W. Kijne. 1980. Production of organic acids in *Pisum sativum* root nodules as a result of oxygen stress. *Plant Sci. Lett.* 20: 115-123.
- Delgado, M.J., J.M. Garrido, F. Ligerio y C. Lluch. 1993. Nitrogen fixation and carbon metabolism by nodules and bacteroids of pea plants under sodium chloride. *Physiol. Plant* 89: 824-829.
- Delgado, M.J., F. Ligerio y C. Lluch. 1994. Effects of salt stress on growth and nitrogen fixation by pea, faba bean, common bean and soybean plants. *Soil Biol. Biochem.* 26: 371-376.
- Dudley, L.M. 1994. Salinity in the soil environment. pp. 13-30. *In: M. Pessarakli (ed.). Handbook of Plant and Crop Stress*. Marcel Dekker. New York.
- Elsheikh, E.A.E. y M. Wood. 1990. Effect of salinity on growth, nodulation and nitrogen yield of chickpea (*Cicer Arietinum* L.). *J. Exp. Bot.* 41: 1263-1269.
- Ferri, A., C. Lluch y A. Ocaña. 2000. Effect of salt stress on carbon metabolism and bacteroid respiration in root nodules of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) *Plant Biol.* 2: 396-402.
- Fougère, F., D. Le Rudulier y J.G. Streeter. 1991. Effects of salt stress on amino acids, organic acids, and carbohydrates composition of root, bacteroids and cytosol of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant Physiol.* 96: 1228-1236.
- Georgiev, G.I. y C.A. Atkins. 1993. Effects of salinity on N_2 fixation, nitrogen metabolism and export and diffusive conductance of cowpea root nodules. *Symbiosis* 15: 239-255.
- Hardarson, G. 1993. Methods for enhancing symbiotic nitrogen fixation. *Plant Soil* 152: 1-17.
- Hare, P.D. y W.A. Cress. 1997. Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regulation* 21: 79-102.
- Herdina, J.A. y J.H. Silsbury. 1991. Estimating nitrogenase activity of faba bean (*Vicia faba* L.) by acetylene reduction (ARA) assay. *Aust. J. Plant Physiol.* 17: 489-502.
- Hunt, D. y D.B. Layzell. 1993. Gas exchange of legume nodule and the regulation of nitrogenase activity. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 344: 483-511.
- Ikedá, J. 1994. The effect of short-term withdrawal of NaCl stress on nodulation of white clover. *Plant Soil* 158: 23-27.
- Irigoyen, J.J., D.W. Emerich y M. Sánchez-Díaz. 1992a. Water stress induced changes in concentration of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiol. Plant* 84: 55-60.
- Irigoyen, J.J., D.W. Emerich y M. Sánchez-Díaz. 1992b. Phosphoenolpyruvate carboxylase, malate and alcohol dehydrogenase activities in alfalfa (*Medicago sativa*) nodules under water stress. *Physiol. Plant* 84: 61-66.
- Izzo, R., A. Scagnozzi, A. Belligno y F. Navari-Izzo. 1993. Influence of NaCl treatment on Ca, K, and Na interrelations in maize shoots. p. 577. *In: M.A.C. Frago y M.L. van Beusichem (eds.). Optimization of plant nutrition*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- Izzo, R., A. Belligno, F. Muratore y F.N. Izzo. 1996. Seedlings growth and Ca^{2+} , K^+ and Na^{2+} accumulation in maize roots as affected by NaCl. *Agrochimica* XL: 25-32.
- Kalir, A. y A. Poljakoff-Mayber. 1976. Effect of salinity in respiratory pathways in root tips of *Tamarix tetragyna*. *Plant Physiol.* 57: 167-170.
- Karr, D.B., J.K. Waters, F. Suzuki y D.W. Emerich. 1984. Enzymes of the poly-hydroxybutyrate and citric acid cycles of *Rhizobium japonicum* bacteroids. *Plant Physiol.* 75: 1158-1162.
- Kim, S.A. y L. Copeland. 1996. Enzymes of poly-hydroxybutyrate metabolism in soybean and chickpea bacteroides. *Appl. Environ. Microbiol.* 62: 4185-4190.
- Krishnaraj, S. y T.A. Thorpe. 1996. Salinity stress effects on [^{14}C -1] and [^{14}C -6]-glucose metabolism of a salt-tolerant and

- salt-susceptible variety of wheat. *Int. J. Plant Sci.* 157: 110-117.
- Kurz, W.G.W. y T.A. La Rue. 1977. Citric acid cycle enzymes and nitrogenase in nodules of *Pisum sativum*. *Can. J. Microbiol.* 23: 1197-1200.
- Läuchli, A. 1984. Salt exclusion: An adaptation of legumes for crops and pastures under saline conditions. pp. 171-188. *In*: R.C. Staples y G.H. Toenniessen (eds.). Salinity tolerance in plants: Strategies for crop improvement. John Wiley. New York.
- López B., L. 1998. Leguminosas y agricultura sostenible. pp. 401-408. *In*: R. Jiménez Díaz y J. Lamo de Espinosa (eds.). Agricultura sostenible. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Misra, N. y U.N. Dwivedi. 1995. Carbohydrate metabolism during seed germination and seedling growth in green gram under saline stress. *Plant Physiol. Biochem.* 33: 33-38.
- Misra, A.N., B. Murmu, P. Singh y M. Misra. 1996. Growth and proline accumulation in mung bean seedlings as affected by sodium chloride. *Biol. Plant* 38: 531-536.
- Pérez-Alfocea, F., M.E. Balibrea, A. Santa Cruz y M.T. Estañ. 1996. Agronomical and physiological characterization of salinity tolerance in a commercial tomato hybrid. *Plant Soil* 180: 251-257.
- Porath, E. y A. Poljakoff-Mayber. 1968. The effect of salinity in the growth medium on carbohydrate metabolism in pea root tips. *Plant Cell Physiol.* 9: 195-203.
- Povolo, S., R. Tombolini, A. Morea, A.J. Anderson, S. Casella y M.P. Nuti. 1994. Isolation and characterization of mutants of *Rhizobium meliloti* unable to synthesize polyhydroxybutyrate. *Can. J. Microbiol.* 40: 823-829.
- Rigaud, J. y A. Puppo. 1975. Indole-3-acetic acid catabolism by soybean bacteroids. *J. Gen. Microbiol.* 88: 223-228.
- Romanov, V.I., I. Hernández-Lucas y E. Martínez Romero. 1994. Carbon metabolism enzymes of *Rhizobium tropici* cultures and bacteroids. *Appl. Env. Microbiol.* 60: 2339-2342.
- Saroso, S., M.J. Dilworth y A.R. Glenn. 1986. The use of activities of carbon catabolic enzymes as a probe for the carbon nutrition of snakebean nodule bacteroids. *J. Gen. Microbiol.* 132: 243-249.
- Seeman, J.R. y C. Critchley. 1985. Effects of salt stress on the growth, ion content, stomatal behaviour and photosynthetic of salt sensitive species, *Phaseolus vulgaris* (L.). *Planta* 164: 151-162.
- Serraj, R., G. Roy y J.J. Drevon. 1994. Salt stress induces a decrease in the oxygen uptake of soybean nodules in their permeability to oxygen. *Physiol. Plant.* 91: 161-168.
- Serraj, R., S. Bona, L.C. Purcell y T.R. Sinclair. 1997. Nitrogen fixation response to water-deficits in field-grown "Jackson" soybean. *Field Crops Res.* 52: 109-116.
- Serraj, R., H. Vásquez-Díaz y J.J. Drevon. 1998. Effect of salt stress on nitrogen fixation, oxygen diffusion, and ion distribution in soybean, common bean and alfalfa. *J. Plant Nutr.* 21: 475-488.
- Soussi, M., A. Ocaña y C. Lluch. 1998. Effect of salt stress on growth, photosynthesis and nitrogen fixation in chick-pea (*Cicer arietinum* L.). *J. Exp. Bot.* 49: 1329-1337.
- Soussi, M., A. Ocaña y C. Lluch. 1999. Comparative study of nitrogen fixation and carbon metabolism in two chick-pea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under salt stress. *J. Exp. Bot.* 50: 1701-1708.
- Statgraphics. 1992. User Manual, version 6. Manugistics. Cambridge, MA.
- Tajima, S. y T.A. La Rue. 1982. Enzymes for acetaldehyde and ethanol formation in legume nodules. *Plant Physiol.* 70: 388-392.
- Thynn, M. y D. Werner. 1990. A more rapid increase of alcohol dehydrogenase activity in seedling roots of *Vicia faba* by addition of ethylene compared to anaerobiosis expression of the maize alcohol dehydrogenase. *Angew. Bot.* 64: 123-131.
- Thynn, M. y D. Werner. 1996. Chickpea root and nodule alcohol dehydrogenase activities as very reactive systems monitoring oxygen concentrations. *Angew. Bot.* 70: 185-187.
- Trinchat, J.C. y J. Rigaud. 1987. Acetylene reduction by bacteroids isolated from stem nodules of *Sesbania rostrata*. Specific role of lactate as an energy-yielding substrate. *J. Gen. Microbiol.* 133: 37-43.
- Trinchat, J.C. y J. Rigaud. 1989. Alternative energy yielding substrates for bacteroids isolated from stem and root nodules on *Sesbania rostrata* submitted to restricted conditions. *Plant Soil* 59: 141-149.
- Tully, R., A. Hanson y C. Nelsen. 1979. Proline accumulation in water-stressed barley leaves in relation to translocation and the nitrogen budget. *Plant Physiol.* 63: 518-523.
- Vance, C.P. y G.H. Heichel. 1991. Carbon in N₂ fixation: Limitation or exquisite adaptation. *Annu. Rev. Plant Mol. Biol.* 42: 373-392.
- Vance, C.P., S. Stade y C.A. Maxwell. 1983. Alfalfa root nodule carbon dioxide fixation. I. Association with nitrogen fixation and incorporation into amino acids. *Plant Physiol.* 72: 469-473.
- Zahrán, H.H. y J.J. Sprent. 1986. Effects of sodium chloride and polyethylene glycol on root-hair infection and nodulation of *Vicia faba* L. plants by *Rhizobium leguminosarum*. *Planta* 167: 303-309.

CRECIMIENTO, FIJACIÓN DE NITRÓGENO, ACUMULACIÓN Y ASIMILACIÓN DE NITRATOS CON DOSIS DE NITRÓGENO EN FRIJOL

Growth, Nitrogen Fixation, Nitrate Accumulation and Assimilation with Nitrogen Levels in Common Bean

Lina Pliego¹, Antonio Ocaña² y Carmen Lluch²

RESUMEN

Se inocularon plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) var. África con *Rhizobium tropici* (CIAT 899) y se cultivaron en condiciones controladas en una cámara de crecimiento. Se ensayaron cinco dosis de KNO₃ (0, 1, 2, 5 y 10 mM) que se adicionaron al medio de cultivo inmediatamente después de la siembra y durante el desarrollo del experimento. Se estudió el efecto de la adición del nitrato en cuatro muestreos (18, 28, 34 y 40 días después de la siembra), registrando variables de crecimiento, fijación de nitrógeno estimada por la actividad reductora de acetileno, la acumulación de NO₃⁻ y su asimilación, en raíz y nódulo. El crecimiento de las plantas resultó favorecido al aplicar el nitrato al medio de cultivo, haciéndose más evidente con la edad de la planta. La cantidad de biomasa nodular (PSN, peso seco de nódulos) se incrementó desde los 18 días del cultivo con las dosis 1 y 2 mM. La adición de 1 mM de KNO₃ aumentó la actividad de la nitrogenasa (ARA) en el periodo vegetativo. Dosis elevadas de nitrato estimularon la acumulación de nitrato en hoja, raíz y nódulo. La actividad nitrato reductasa en raíz (NRr) resultó inducida con los tratamientos 5 y 10 mM, mientras que en el nódulo (NRn) la máxima actividad ocurrió con 1 mM de KNO₃. La actividad nitrito reductasa en raíz (NiRr) también se estimuló con los tratamientos 5 y 10 mM. Los resultados obtenidos indican que existe una relación entre la actividad de la nitrogenasa y nitrato reductasa en el nódulo. Además, aplicaciones tempranas de dosis bajas de KNO₃, etapa en la que la planta no está aún en posibilidades de beneficiarse del N₂ que procede de

la fijación simbiótica, favorecen el desarrollo del nódulo, la fijación de nitrógeno y la actividad nitrato reductasa. La contribución de la actividad NRn en la reducción del NO₃⁻ fue considerable. Las leguminosas tienen la posibilidad de beneficiarse del nitrógeno (NO₃⁻) del suelo y del procedente de la fijación biológica del nitrógeno.

Palabras clave: Fertilización nitrogenada, nitrato reductasa, nitrito reductasa, *Phaseolus vulgaris*, *Rhizobium tropici*.

SUMMARY

Common bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Africa were inoculated with *Rhizobium tropici* strain CIAT-899 and grown in an environment-controlled chamber. Five concentrations of KNO₃ (0, 1, 2, 5, and 10 mM) were added to the growth medium immediately after sowing and during all the experiment. The effect of nitrate was studied at four sampling dates (18, 28, 34, and 40 days after sowing). Plant growth, nitrogen fixation, accumulation and assimilation of nitrate, in root and nodule were registered. Plant growth was stimulated with the application of nitrate to the growth medium. The nodular biomass (NDW) increased 18 days after sowing with 1 and 2 mM. The supply of 1 mM KNO₃ increased nitrogenase activity (ARA) during vegetative stage. The highest dose of nitrate stimulated nitrate accumulation in leaves, root, and nodule. Nitrate reductase activity in root (NRr) was enhanced with 5 and 10 mM NO₃⁻, while in nodule the maximum activity was recorded with 1 mM KNO₃. Nitrite reductase activity in root (NiRr) was also stimulated with treatments of 5 and 10 mM KNO₃. The results indicated that there is a relationship between ARA and NR in nodules. In addition, a supply of early and low doses of KNO₃ favored nodule growth, nitrogenase activity, and NR in nodule. The contribution of NRn in the reduction of NO₃⁻ was significant. In legumes it is possible to

¹ Instituto Tecnológico Agropecuario No. 23 de Oaxaca. Apartado Postal 273, 68000 Oaxaca, Oaxaca. México. (linapliego@hotmail.com)

² Departamento de Biología Vegetal, Facultad de Ciencias, Campus Fuentenueva, Universidad de Granada. 18071 Granada, España.

obtain benefits from soil-N and N-N₂ from biological fixation.

Index words: Nitrogen fertilization, nitrate reductase, nitrite reductase, *Phaseolus vulgaris*, *Rhizobium tropici*.

INTRODUCCIÓN

Para las leguminosas en simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*, las principales fuentes de nitrógeno son: aquélla que procede del suelo y la que se genera durante la fijación biológica del nitrógeno (FBN). No obstante, la FBN resulta más costosa en términos energéticos, por lo que la planta utiliza preferentemente el N inorgánico del suelo, y es el nitrato la forma más común de aportar este nutrimento (Becana y Bedmar, 1991).

La primera enzima que interviene en la reducción del nitrato es la nitrato reductasa. En leguminosas como *Glycine* y *Vigna* se ha observado esta actividad, tanto en el citosol nodular, como bacteroidal; mientras que *Phaseolus*, *Lotus*, *Pisum* y *Vicia* sólo la expresan en el citosol nodular (Becana y Bedmar, 1991). En una segunda etapa, el nitrito generado es reducido por la nitrito reductasa a amonio. Esta enzima se localiza en la fracción soluble de los nódulos y aumenta su actividad con el contenido de nitrito, presumiblemente inducida por éste (Caba *et al.*, 1991).

Phaseolus vulgaris presenta una amplia distribución que va desde América hasta Asia. Su importancia radica en el hecho de que representa la mayor fuente de proteínas vegetales para la población de bajos recursos económicos, como es el caso de otras leguminosas (Mahé *et al.*, 1994). Un porcentaje importante de la superficie destinada a este cultivo corresponde a suelos marginales, donde el nitrógeno es el nutrimento que limita la productividad de esta leguminosa (Bliss, 1993). Además, como en el caso de otras leguminosas, el frijol se cultiva en zonas destinadas a rotación de cultivos, donde se incluyen los cereales a los que generalmente se aplican elevadas concentraciones de nitrógeno, razón por la que suelen encontrarse altas cantidades de nitrato en estos suelos (Herridge *et al.*, 1994) y que, como se ha probado, afecta de manera negativa la FBN. De manera general, esta leguminosa es considerada pobre para la FBN (Bliss, 1993). No obstante, estudios previos muestran que algunos genotipos son capaces de fijar cantidades elevadas de nitrógeno (Hardarson, 1993).

No es posible generalizar una dosis de nitrato adecuada en los cultivos de leguminosas, ya que diversos factores están involucrados: el genotipo (Cherney y Duxbury, 1994; Ocaña *et al.*, 1998); la forma de aplicar el nitrato (Tanacka *et al.*, 1985; Da Silva *et al.*, 1993); la etapa de desarrollo en que se aporta el nitrógeno y se realiza la cosecha (Truchet y Dazzo, 1982; Tirado *et al.*, 1990); el tiempo del tratamiento (Caba *et al.*, 1995); la especie de leguminosa (Sagan *et al.*, 1993); la cepa de *Rhizobium* utilizada (Hervás *et al.*, 1991); las condiciones nutricionales del suelo (Tsai *et al.*, 1993), entre otros factores. El objetivo del presente estudio fue analizar las variaciones e interrelaciones observadas por exposición al KNO₃ aplicado a lo largo del desarrollo del cultivo, en el crecimiento, la fijación de nitrógeno, la asimilación de nitratos y la relación entre estas variables, en plantas de frijol inoculadas con bacterias del género *Rhizobium*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron semillas de *Phaseolus vulgaris* var. África (proporcionadas por Interlagasa, S.A. Valencia, España) que se esterilizaron con hipoclorito de sodio a 5% por 3 min y se germinaron en condiciones estériles en charolas con vermiculita húmeda por 48 h a 26 °C. Las plántulas seleccionadas por el tamaño de la radícula (3 cm) se transfirieron a jarras de Leonard, utilizando vermiculita como sustrato. Enseguida, se inocularon con 1 mL de la suspensión de 10⁹ cél mL⁻¹ de *Rhizobium tropici* (CIAT 899). Esta suspensión se obtuvo por inoculación en medio líquido de extracto de levadura manitol (ELM) e incubación a 26 °C durante 48 h y en agitación constante. El número de células viables en el inóculo se logró determinar por medición de la absorbancia a 540 nm en un espectrofotómetro Spectronic 301, previa elaboración de una curva de crecimiento, relacionando densidad óptica con población, permitiendo así, estimar el tiempo necesario para lograr tener la población bacteriana especificada. Las jarras se colocaron, con una distribución completamente al azar, en una cámara de cultivo en condiciones controladas (fotoperiodo: 16 h luz/8 h oscuridad; intensidad lumínica: 450 µmol m⁻² s⁻¹; temperatura: 26 °C día/18 °C noche; humedad relativa 55% día/75% noche). Se regaron con solución nutritiva estéril (Rigaud y Puppo, 1975) que contenía nitrato de potasio en las dosis 0, 1, 2, 5 y 10 mM durante todo el desarrollo del cultivo. Se realizaron cuatro cosechas: a

18, 28, 34 y 40 días después de la siembra (DDS), las que coincidieron con diferentes etapas fenológicas del cultivo (período vegetativo, inicio de floración, inicio de fructificación y plena fructificación, respectivamente). Cada tratamiento incluyó seis repeticiones.

En cada cosecha se registraron las variables: peso seco de planta (PSP), área foliar (AF), peso seco de nódulos (PSN), actividad reductora de acetileno (ARA), contenido de nitrato en hoja (Nith), raíz (Nitr) y nódulo (Nitrn), actividad nitrato reductasa en raíz (NRr) y en el nódulo (NRn) y actividad nitrito reductasa en raíz (NiRr) y en el nódulo (NiRn). El área foliar registrada se obtuvo por medio de un planímetro foto electrónico LICOR 3000.

La actividad de la nitrogenasa (EC 1.7.99.2) se determinó por medio de la prueba de la actividad reductora de acetileno (Herdina y Silsbury, 1991). Porciones de raíces noduladas (2 a 4 g) de seis plantas se incubaron en viales perfectamente sellados a los que se les extrajo 10% del volumen de aire y se sustituyó con acetileno; enseguida, los viales se colocaron en la oscuridad a temperatura ambiente. Se tomaron alícuotas (0.2 mL) del medio de incubación a 10 y 20 min, valorándose el etileno formado por medio de un cromatógrafo de gases (Perkin Elmer 8600) equipado con un detector de ionización de llama y una columna de Poropak de 2 mm de diámetro interno y 2 m de longitud.

Para la determinación de nitrato se realizó una extracción acuosa, de acuerdo con Soares *et al.* (1985) con ligeras modificaciones. El material vegetal se maceró en agua hirviendo (1:5 p/v) y después de filtrar el extracto se centrifugó utilizando una centrifuga Sorvall Superspeed RC-5B (Dupont Instruments) y se determinó el nitrato de acuerdo con Cataldo *et al.* (1975).

La actividad NR (EC 1.6.6.2) en raíz y nódulo se determinó *in vitro* por el método descrito por Caba *et al.* (1990). Porciones de 1 g de nódulos o raíces se homogeneizaron en un mortero con arena, PVPP y 10 mL de tampón fosfato 50 mM y pH 7.5, Na₂-EDTA 2 mM, DTT 2 mM, caseína a 1.5% (p/v). El filtrado se centrifugó dos veces (la primera a 2500 g durante 5 min y la segunda a 30 000 g por 30 min). En este caso se valoró la actividad con el nitrito generado en el medio de reacción (2 mL) de acuerdo con Snell y Snell (1949), utilizando tampón fosfato 50 mM y pH 7.5, KNO₃ 10 mM, cisteína 1 mM y NADH 0.2 mM y un volumen de extracto de 0.4 mL, incubando la mezcla por 30 min en un baño

con temperatura regulada (30 °C). La actividad de la enzima se expresó en micromoles de nitrito generados en el medio de reacción por gramo de peso fresco y por hora.

Para la determinación *in vitro* de la actividad nitrito reductasa (EC 1.6.6.4) en raíz y nódulo, se siguió la metodología de Caba *et al.* (1990), valorándose la desaparición de nitrito en el medio de reacción. El medio de extracción utilizado a razón de 1:12 para el caso de nódulos y 1:6 en raíz fue: tampón maleico-KOH 100 mM, β-mercaptoetanol a 2% (v/v) y etilenglicol a 15% (v/v). Después de centrifugar de acuerdo con lo sugerido por Caba *et al.* (1990), el extracto vegetal se incubó con tampón fosfato 50 mM pH 7.5, KNO₂ 2 mM, metil viológeno 0.75 mM y Na₂S₂O₄ 21 mM a 28 °C durante 30 min, la reacción se detuvo por agitación vigorosa de los tubos hasta la completa oxidación del ditionito de sodio, tras lo cual se adicionaron 8 mL de agua y se determinó el contenido de nitrito en la mezcla. Para la determinación del nitrato y de las actividades enzimáticas, se utilizó un espectrofotómetro Shimadzu UV-1603.

Se utilizó un diseño completamente al azar y los datos registrados se sometieron a análisis estadístico con el programa Statgraphics plus (STSC Inc., Rockville, Maryland USA) por medio del cual se realizaron: a) Análisis de varianza multifactorial; b) Prueba de mínimas diferencias significativas (MDS) entre medias ($P \leq 0.05$); c) Coeficiente de correlación simple entre variables; y d) Análisis de regresión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El nitrato promovió significativamente el crecimiento de la planta desde la segunda cosecha, acentuándose el efecto con el tiempo, no siendo proporcional a la dosis de NO₃ aplicada, ya que el PSP a 28 DDS con las dosis 5 y 10 mM de KNO₃ resultó sólo 50 y 86% mayor. En todos los muestreos, la magnitud del área foliar fue del doble con 10 mM en comparación a los controles (Cuadro 1). El efecto promotor observado de la aplicación de nitrato sobre el crecimiento de las plantas de frijol se conservó a lo largo de todo el desarrollo del cultivo, esto coincidió con lo reportado por Müller *et al.* (1993). Sin embargo, en algunas especies de leguminosas la inducción del crecimiento no se aprecia, lo cual indica que esas especies son capaces de adquirir suficiente N a través de la FBN (Blumenthal *et al.*, 1997).

Cuadro 1. Efecto del nitrato de potasio aplicado desde la siembra sobre el crecimiento (PSP y AF) y la fijación biológica de N₂ (PSN y ARA), en plantas de *Phaseolus vulgaris* var. África inoculadas con la cepa CIAT 899 de *Rhizobium tropici*.

DDS	KNO ₃	PSP	AF	PSN	ARA
	mM	g	cm ² planta ⁻¹	g	μmol C ₂ H ₄ g PF ⁻¹ h ⁻¹ †
18	0	1.00	147	0.030	17.5
	1	1.62	208	0.066	74.8 *
	2	1.53	245	0.070	53.6 *
	5	1.54	266	0.018	52.1 *
	10	1.89	317	0.014	45.5 *
28	0	2.80	440	0.200	103.1
	1	2.93	515	0.185	102.7
	2	3.02	534	0.170	69.2
	5	4.19	804 *	0.105 *	60.5 *
	10	5.22 *	1038 *	0.033 *	38.8 *
34	0	3.43	796	0.209	68.0
	1	3.88	835	0.189	66.4
	2	4.07	742	0.177	56.1
	5	5.91 *	1351 *	0.110 *	24.8 *
	10	6.82 *	1857 *	0.090 *	18.0 *
40	0	4.31	961	0.312	30.7
	1	5.14	1076	0.288	26.4
	2	5.97 *	1317 *	0.254 *	21.3
	5	7.84 *	1483 *	0.195 *	14.6
	10	9.03 *	2420 *	0.089 *	2.1
MDS (0.05)		1.18	232	0.055	40.2

DDS: días después de la siembra; PSP: peso de la planta; AF: área foliar; PSN: peso seco de nódulos; ARA: actividad reductora de acetileno.

* Diferencias significativas a 0.05.

† Actividad por gramo de peso fresco de nódulos (PF).

Se ha reportado al área foliar como la variable que se correlaciona mejor con el contenido de N total en plantas noduladas de *Pisum sativum*, en tanto que en

Cuadro 2. Matriz de coeficiente de correlación simple entre las variables relacionadas con el crecimiento, la fijación de nitrógeno y el metabolismo del nitrato en plantas de *Phaseolus vulgaris* de la var. África inoculadas con la cepa CIAT 899 de *Rhizobium tropici* tratadas con nitrato potásico.

	PSP	AF	PSN	ARA	Nith	Nitr	Nitn	NRr	NRn	NiRr	NiRn
PSP	1.00										
AF	0.97	1.00									
PSN	0.23	0.14	1.00								
ARA	-0.61	-0.64	0.12	1.00							
Nith	0.19	0.22	0.56	-0.23	1.00						
Nitr	0.20	0.26	-0.67	-0.29	0.81	1.00					
Nitn	0.68	0.55	0.28	-0.21	-0.05	-0.03	1.00				
NRr	0.70	0.74	-0.44	-0.50	0.70	0.72	0.74	1.00			
NRn	-0.19	-0.27	0.07	0.51	-0.02	-0.04	0.05	-0.17	1.00		
NiRr	0.28	0.31	-0.55	-0.28	0.47	0.48	0.16	0.58	-0.05	1.00	
NiRn	0.03	0.04	-0.18	-0.08	0.21	0.18	-0.03	0.03	-0.01	0.42	1.00

Variables: PSP, peso seco de la planta; AF, área foliar; PSN, peso seco de nódulos; ARA, actividad reductora de acetileno; Nith, concentración de nitrato en hoja; Nitr, concentración de nitrato en raíz; Nitn, concentración de nitrato en nódulo; NRr, actividad nitrato reductasa en raíz; NRn actividad nitrato reductasa en nódulo; NiRr, actividad nitrito reductasa en raíz; NiRn, actividad nitrito reductasa en nódulo.

Vicia faba se correlaciona mejor con el PSP (Caba *et al.*, 1994); esta última aseveración coincide con lo observado en el presente trabajo (Cuadro 2). Del análisis de regresión realizado para las variables de crecimiento, PSP y AF, se deduce que tienen una estrecha relación con la aplicación de KNO₃ (Cuadro 3).

Para las variables directamente relacionadas con la fijación de nitrógeno: PSN y ARA, su respuesta al nitrato en el medio de cultivo dependió de la dosis y del estado fenológico del cultivo (Cuadro 1). A 18 días, las dosis 1 y 2 mM incrementaron el PSN en 100%; no obstante, este incremento no fue significativo. Sin embargo, a partir de 28 DDS con todas las dosis se redujo el PSN, efecto que fue más notorio con las dosis 5 y 10 mM con las que se registraron reducciones de 50 a 84% en comparación con el control. En concordancia con estos resultados, el análisis de regresión indica una relación lineal negativa con la aplicación del KNO₃ (Cuadro 3). A 18 DDS, la aplicación de nitrato incrementó la actividad de la nitrogenasa, resultando las dosis 1 y 2 mM de KNO₃ con los valores más altos. Para todos los tratamientos, excepto 10 mM, el máximo de actividad de la nitrogenasa ocurrió a 28 DDS, en el resto de las cosechas la aplicación de las dosis altas de NO₃ (5 y 10 mM) la inhibieron. La variable ARA respondió a la aplicación del nitrato siguiendo una tendencia parabólica, como lo indica el modelo de regresión (Cuadro 3). El comportamiento observado de la evolución del PSN y ARA corrobora el hecho de que en el frijol, durante el establecimiento de la

Cuadro 3. Análisis de regresión entre los niveles de KNO₃ y las variables dependientes relacionadas con el crecimiento, la fijación biológica del N₂ y la asimilación de nitratos.

Variable dependiente	Ecuación de regresión	Coefficiente de determinación (R ²)	Nivel de significancia
PSP	$y = 3.087 + 0.284x$	96.22	0.0032 **
AF	$y = 568.613 + 83.107x$	99.75	0.0001 **
PSN	$y = 0.192 - 0.0148x$	98.56	0.0007 **
ARA	$y = 66.75 - 5.51x + 0.34x^2$	98.34	0.0166 *
Nith	$y = 5.022 + 1.144x$	97.19	0.0020 **
Nitr	$y = -0.617 + 3.689x$	97.34	0.0019 **
Nitr	$y = 2.88 + 0.17x - 0.016x^2$	99.16	0.0084 **
NRr	$y = 0.0399 + 0.0211x$	96.94	0.0023 **
NiRr	$y = 29.811 + 2.147x$	93.64	0.0069 **
NiRn	$y = 234.57 - 40.2x + 3.85x^2$	99.87	0.0012 **

PSP: peso seco de la planta; AF: área foliar; PSN: peso seco de nódulos; ARA: actividad reductora de acetileno; Nith: contenido de nitrato en hoja; Nitr: concentración de NO₃ en raíz; Nitr: contenido de NO₃ en nódulo; NRr: actividad nitrato reductasa en raíz; NiRr: actividad nitrito reductasa en raíz; NiRn: actividad nitrito reductasa en nódulo.

* P ≤ 0.05. ** P ≤ 0.01.

simbiosis, la planta sufre un período de deficiencia de nitrógeno, que hace necesario el aporte de N-NO₃ en esa etapa (Hungria *et al.*, 1991; Pacovsky y Fuller, 1991). En adición, se puede decir que para esta leguminosa en etapas tempranas de desarrollo, la planta puede beneficiarse de una acción cooperativa entre el N₂ fijado simbióticamente y el aportado a través de la fertilización nitrogenada.

Resultó claro que la estimulación del crecimiento vegetativo como consecuencia de la aplicación del nitrato ocurrió en detrimento de la producción de biomasa nodular (Cuadros 1 y 3) y, en consecuencia, de la fijación de N₂, como lo reportaron Arrese-Igor *et al.* (1997), mostrando un efecto sinérgico entre el NO₃⁻ y la fijación de N₂ (Stamford *et al.*, 1995), pero que en el presente estudio no se vio reflejado en la correlación entre ambas variables (Cuadro 2). El efecto benéfico de la aplicación de dosis bajas de KNO₃ sobre la FBN se evidenció cuando aún no había un abundante crecimiento nodular (18 DDS) y la planta por sí misma no era capaz de fijar cantidades apreciables de nitrógeno atmosférico.

Kaiser *et al.* (1997) propusieron que el efecto del nitrato en la fijación simbiótica en nódulos de *P. sativum* conlleva dos mecanismos separados, uno inicial relacionado con la limitación de oxígeno (Wycoff *et al.*, 1998) y otro inducido por la presencia prolongada del nitrato, relacionado con su metabolismo. Bacanamwo y Harper (1997) propusieron que el control de la nodulación y de la fijación de nitrógeno en nódulos de soya está mediado por un mecanismo de retroalimentación en el que se involucra la acumulación de asparagina y glutamato en el nódulo. De acuerdo con lo propuesto por Parsons

et al. (1993), si un aminoácido en especial es exportado desde el xilema a la parte aérea, de donde nuevamente podrá retornar a la raíz y nódulo, en estos tejidos y en el sistema vascular, su concentración será dependiente de la tasa de producción, liberación y utilización dentro del nódulo.

En el control, el mayor contenido de nitrato en hojas se registró en la etapa vegetativa, triplicando su valor con la aplicación de 5 y 10 mM de KNO₃ (Figura 1) y declinando el contenido con la edad de la planta en el caso de la dosis más elevada. En raíz, para todos los tratamientos, la mayor acumulación del nitrato ocurrió al inicio de la fructificación y alcanzó su máximo [50.04 μmol (g PF)⁻¹] con la dosis más alta. Sin embargo, los mayores porcentajes de incremento con respecto al control se observaron al inicio de la floración (cuatro a 50 veces), el valor máximo se alcanzó con la dosis 10 mM al inicio de la fructificación. En las plantas control y en las tratadas con 1 mM de KNO₃, el contenido de nitrato en nódulo fue similar. El resto de las dosis, a excepción de 10 mM, provocaron un incremento en el contenido de nitrato en la tercera y cuarta cosecha. Con base en estos resultados, la acumulación de nitrato en los tejidos de plantas de frijol ocurrió en el orden: raíz < hoja < nódulo. La acumulación de nitrato en diferentes tejidos vegetales como consecuencia de la fertilización nitrogenada se reporta en diversos estudios (Caba *et al.*, 1995; Svenning *et al.*, 1996), con un comportamiento que coincide con lo observado en este trabajo. La exposición prolongada a nitrato provoca que la absorción de éste decaiga, lo que indica que el proceso está controlado por un mecanismo de retroalimentación negativo (Siddiqui *et*

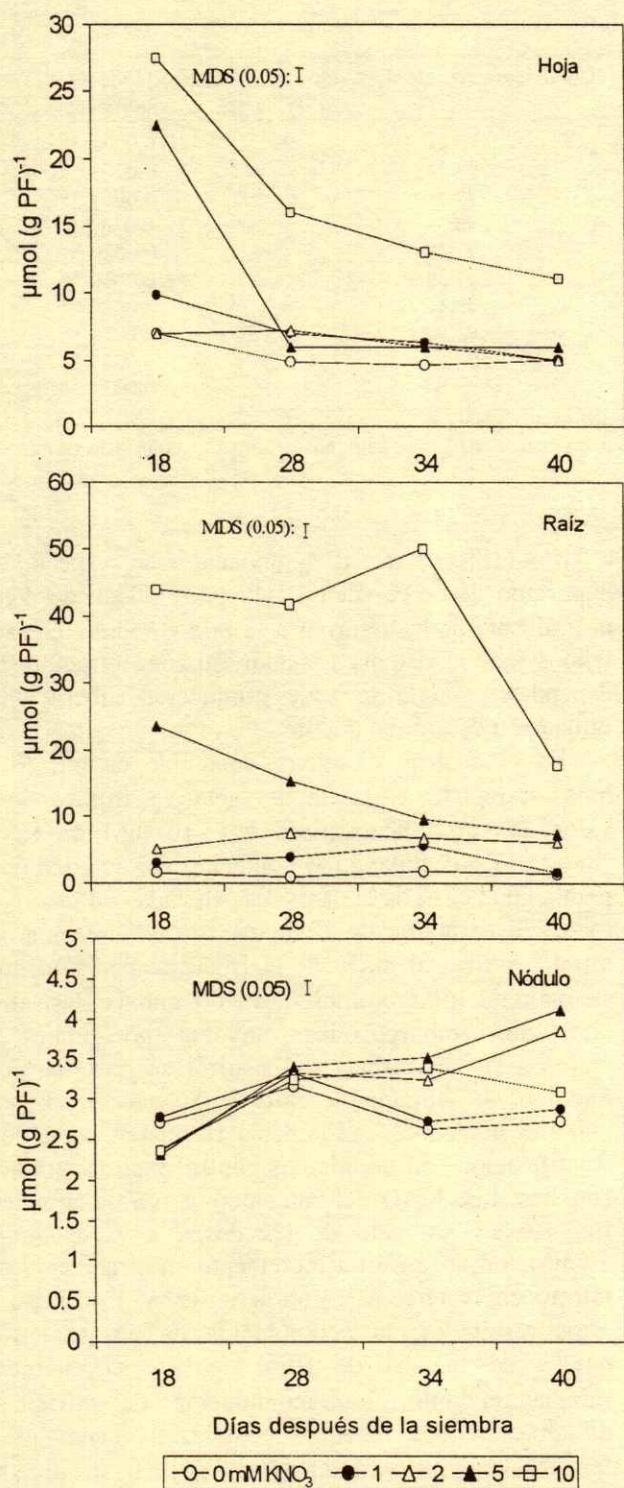


Figura 1. Concentración de nitrato en hoja (Nith), raíz (Nitr) y nódulo (Nitr) en plantas de *Phaseolus vulgaris* var. Africa inoculadas con la cepa CIAT 899 de *Rhizobium tropici*, tratadas nitrato de potasio.

al., 1989). El efecto se revierte cuando se elimina la aplicación de nitrato (Teyker *et al.*, 1988). La molécula señal responsable de este mecanismo, en primera instancia, pudiera ser el propio nitrato, o bien otras especies de nitrógeno como lo son el amonio y nitrito (Aslam *et al.*, 1996; King *et al.*, 1993). Esto explicaría el hecho de que la concentración de nitrato en hoja y raíz, en especial con las dosis más elevadas de nitrato, decayera con el tiempo, sobre todo en la última cosecha (Figura 1). Los modelos de regresión indican una relación lineal significativa de las variables contenido de nitrato en hoja y raíz, y parabólica de la variable en nódulos, con respecto a la aplicación de KNO₃ (Cuadro 3).

La actividad nitrato reductasa en raíz (NRr), en ausencia de KNO₃, presentó dos picos de actividad máxima, al iniciar de la floración y en plena fructificación (Figura 2). La aplicación de 5 y 10 mM de KNO₃ estimuló la actividad NRr (dos a cinco veces), acentuándose el efecto a 34 días, sin embargo, decae en la última evaluación, lo que coincide con lo reportado por Traore y Maranville (1999). Se registró correlación significativa ($P \leq 0.05$) entre el PSP y la NRr, lo que refleja la contribución de estos tejidos al metabolismo del nitrato y al desarrollo de la planta, en especial con los valores más altos de KNO₃ y en las dos últimas evaluaciones, etapas en las que existe un metabolismo intenso dado el estado fenológico en el que se encuentra el cultivo (etapa reproductiva). Además, la correlación negativa entre NRr y ARA (Cuadro 2), sugiere la preferencia de la planta por metabolizar el NO₃⁻ en lugar del N₂ atmosférico, por el alto costo energético que representa la reducción de este último.

La determinación de la actividad de la enzima NRn en la variedad África de *Phaseolus vulgaris* indica que ésta no es constitutiva. A 18 DDS con la dosis 10 mM no fue posible determinar la actividad de la enzima NRn, dado el escaso desarrollo nodular causado por el efecto inhibitorio del NO₃⁻. De manera contraria a lo que ocurrió en raíz, los valores más altos de actividad de esta enzima se alcanzaron con la dosis 1 mM de nitrato, en tanto que con dosis moderadas y altas, los valores encontrados fueron entre una a cuatro veces menores (Figura 2). El valor de actividad máximo se obtuvo a 28 días después de la siembra lo que coincide con el valor alcanzado en ARA.

Se ha detectado actividad inducida y constitutiva de la enzima NRn en diferentes leguminosas. Así, en

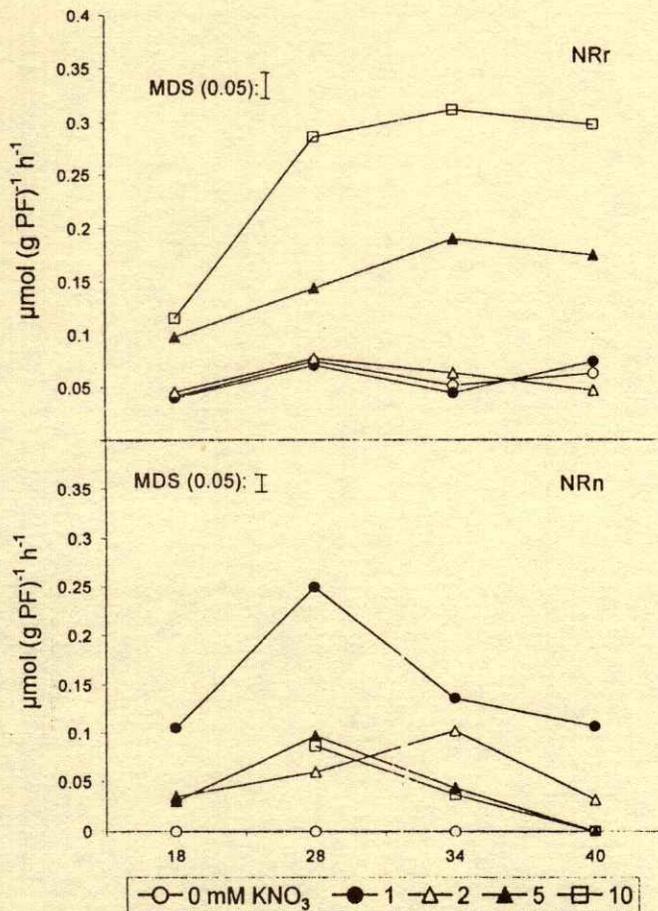


Figura 2. Actividad de la nitrato reductasa en raíz (NRr) y nódulo (NRn) en plantas de *Phaseolus vulgaris*, tratadas con nitrato de potasio aplicado desde la siembra.

nódulos de alfalfa se ha comprobado que esta enzima es inducida (Becana *et al.*, 1988), en tanto que en nódulos de soja fue constitutiva (Evans, 1954). De los estudios llevados a cabo con diferentes genotipos de *Vicia faba* puede deducirse que la actividad *in vitro* de la enzima NR nodular puede ser constitutiva (en la mayoría de los genotipos), inhibida por la aplicación de NO_3^- aun en bajas concentraciones (2 mM de KNO_3), independientemente de que el tratamiento sea de corta o mediana duración y su actividad casi nula (Caba *et al.*, 1990; 1994; 1995). No obstante, sólo en algunas de las líneas se estimuló la actividad NRn con la dosis mínima (2 mM). De ésta y otras investigaciones se deduce que debido a la gran variabilidad en las condiciones experimentales, así como la leguminosa tratada y la cepa de *Rhizobium* utilizada, se han obtenido resultados que resultan contradictorios. Esto en cierta forma explica el aumento en la actividad NRn por 1 mM de KNO_3 observado en el presente trabajo.

Los resultados obtenidos indican que la actividad de la NRn fue considerable (41 a 78%) con la aplicación de bajas dosis de KNO_3 (1 mM), lo mismo se observó para la fijación biológica de nitrógeno medida como actividad de la nitrogenasa, en particular antes de que se tenga un buen desarrollo de masa nodular (Cuadro 1). Esto corrobora el hecho de que la planta puede aprovechar ambas fuentes de nitrógeno para tener un buen desarrollo y crecimiento (N-inorgánico) y, finalmente, una buena producción de grano (N-atmosférico) de acuerdo con lo reportado por Tirado *et al.* (1990).

En ocasiones, la actividad de la enzima NRn no es inducida por el nitrato, lo cual se explica por el hecho de que esta enzima pudiera estar involucrada en el metabolismo de ureidos (Li y Gresshoff, 1990). Los ureidos son compuestos orgánicos (principalmente alantoína y ácido alantoico) que resultan ser los primeros productos de la fijación de nitrógeno en leguminosas tropicales, como es el caso del frijol (Schubert y Boland, 1990). Después de su síntesis en el nódulo, los ureidos son exportados a la parte aérea, donde serán utilizados para la síntesis de aminoácidos y proteínas (Herridge *et al.*, 1978; Streeter, 1979; Pate *et al.*, 1980). Li y Gresshoff (1990) observaron que, en soja, el ácido alantoico inhibe la actividad de la enzima nitrato reductasa constitutiva en hojas, pero no la inducida, hecho que en parte explicaría lo acontecido en *P. vulgaris*, en donde ocurrió el máximo valor de ARA, pero una nula actividad de la enzima NR constitutiva. Sin embargo, persiste la interrogante respecto a los resultados obtenidos de la enzima NRn inducida por NO_3^- , ya que con la dosis 1 mM presentó su máxima actividad en cada una de las evaluaciones y también para la evolución de ARA, que tuvo valores similares al control.

En estudios realizados por Khadri (1997) se encontró que, para esta misma variedad de frijol, la aplicación de NO_3^- no favoreció la acumulación de ureidos en nódulos y savia, pero sí incrementó la concentración de aminoácidos, lo que pudiera explicar que, para esta variedad, NRn no haya sido afectada por ARA, hecho que se puso de manifiesto por la correlación positiva que muestran ambas variables (Cuadro 2). Puesto que la fijación de N_2 fue muy sensible a la presencia de NO_3^- en el medio, es lógico suponer que exista una estrecha relación entre la actividad de las enzimas NR y ARA (Stamford *et al.*, 1995). Sin embargo, como lo señalaron Salsac *et al.* (1984), esto no descarta la posibilidad de que en la planta pueda haber competencia entre ambos procesos

por los substratos energéticos, como puede apreciarse en la tendencia de la NRr, lo que se corrobora por la correlación negativa entre esta variable y ARA (Cuadro 2).

En raíz, la actividad de la enzima NiRr fue constitutiva, mostrando dos picos de actividad máxima, a 18 DDS y a 34 DDS, lo que pudiera deberse al estado fenológico del cultivo. A 18 DDS había un escaso desarrollo de los nódulos y, por lo tanto, no se presentaría la competencia que pudiera darse entre la reducción del nitrato y la fijación de N_2 . Este hecho se ve reflejado en la correlación significativa ($P \geq -0.55$) que presentan el PSN y NiRr (Cuadro 2). A 34 DDS había una intensa actividad metabólica como consecuencia de la formación del fruto, concentrándose toda energía en este sumidero de materiales y energía, razón por la cual la reducción del NO_3^- ocurriría de preferencia en la fijación de N_2 , que resulta más costosa desde un punto de vista energético. Las tendencias mostradas por el patrón de comportamiento de NiRr en plantas tratadas fueron similares a las observadas en el control; se aprecia, además, que la actividad de esta enzima resultó promovida por la aplicación de nitrato (Figura 3). Esta respuesta se evidenció con mayor claridad desde el inicio de la floración, donde las dosis de 2 a 10 mM aumentaron su actividad de 29 a 77%. Los valores más altos de actividad de esta enzima, tanto en el control, como en los diferentes tratamientos de nitrato, se obtuvieron en el inicio de la fructificación. Este efecto positivo se ha reportado en otras leguminosas (Chalifour y Nelson, 1988). La actividad NiRr se correlacionó de manera positiva con el contenido de nitrato en este órgano, así como su actividad NR (Cuadro 2). El análisis de regresión muestra que existe una relación lineal significativa en la respuesta de la actividad NiRr y la aplicación de KNO_3 (Cuadro 3).

A diferencia de lo observado en raíz, la respuesta de la actividad NiR en nódulo no fue clara, ya que los valores de actividad de esta enzima no correlacionaron con la dosis de KNO_3 aplicada ni con el contenido del nitrato del tejido en cuestión (Cuadro 2). En todos los tratamientos, incluyendo al control, se presentaron dos puntos de actividad máxima: a 18 DDS, es decir, en el estado vegetativo, y a 34 DDS o inicio de fructificación. Además, los valores registrados de NiR fueron mayores en nódulo que en raíz (Figura 3). La actividad NiR, tanto en nódulo, como en raíz, fue mucho mayor que la registrada para la actividad de la enzima NR, lo que coincide con lo reportado por Becana y Sprent (1987)

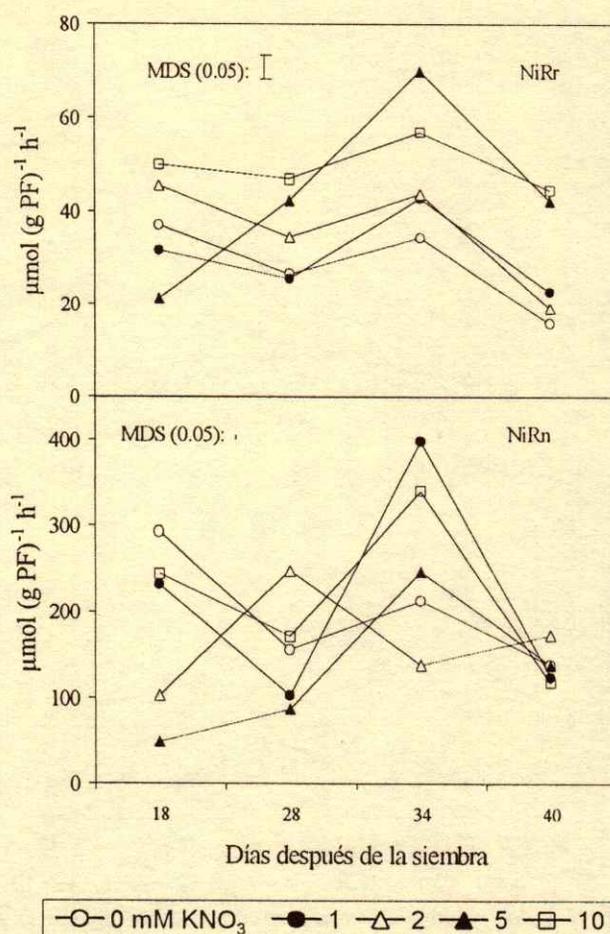


Figura 3. Actividad nitrito reductasa en raíz (NiRr) y nódulo (NiRn) en plantas de *Phaseolus vulgaris* tratadas con nitrato de potasio aplicado desde la siembra.

y Barro *et al.* (1994), por lo que se considera que el paso limitativo en la reducción del nitrato es el que involucra a la NR, además de descartar la posibilidad de una acumulación de nitrito en el nódulo que pudiera afectar directamente la fijación de nitrógeno (Arrese-Igor *et al.*, 1997).

En *Glycine max*, la actividad nitrito reductasa nodular incrementó en la zona bacteroidal y en la corteza al exponerse durante cuatro días al NO_3^- , después de lo cual su actividad decayó (Arrese-Igor *et al.*, 1998). La mayor actividad NiR en nódulo comparada con la de raíz puede atribuirse a una diferencia en la sensibilidad a la toxicidad del nitrito entre estos órganos. Mientras que el nódulo presenta capacidad de destoxificar el nitrito y, por lo tanto, impide que interfiera con la leghemoglobina. Esta capacidad no es observada en la raíz (Kanayama *et al.*, 1990).

Del análisis de los resultados referentes a las variables relacionadas con la fijación simbiótica del N₂: PSN y ARA, y de aquéllas relativas a la reducción del nitrato: NRn y NiRn, se apreció que la aplicación temprana (18 días del cultivo) de dosis bajas de nitrato permitió que la planta se beneficiara de ambas fuentes, si bien, esto no se reflejó en las correlaciones que tales variables presentaron (Cuadro 2). Este comportamiento no se registró en etapas tardías, como fueron el inicio y la plena fructificación, en las que los valores para las referidas variables declinaron.

CONCLUSIONES

- Los resultados registrados en el presente estudio indican que, en el caso concreto de *Phaseolus vulgaris*, la aplicación de KNO₃ favoreció el crecimiento a lo largo del desarrollo del cultivo y con todos los valores utilizados. Este efecto benéfico ocurrió en detrimento de la nodulación y la fijación biológica de N₂ (medida como actividad de la nitrogenasa). No obstante, ambas variables aumentaron notablemente con la aplicación de 1 mM de KNO₃, en especial en el estado vegetativo cuando aún no existe un abundante desarrollo de la masa nodular. La acumulación de nitrato resultó favorecida de forma proporcional con las dosis de fertilización nitrogenada, de forma más notoria en el nódulo, seguido en la hoja y en menor proporción en la raíz.

- En raíz, la enzima NRr fue constitutiva, además, respondió positivamente a la fertilización nitrogenada, en particular a dosis elevadas de KNO₃. Por otro lado, este cultivo no presentó actividad NRn constitutiva, en tanto que la inducida alcanzó su valor máximo con la dosis 1 mM y en el inicio de la etapa reproductiva, lo que coincidió también con la tasa más alta de ARA. La contribución del nódulo a la reducción del nitrato fue considerable, pero la participación de la raíz (NRr) fue mayor. Los procesos de reducción de nitratos y fijación biológica de N₂ ocurren de manera simultánea en el nódulo, e incluso los valores más altos de las actividades de las enzimas involucradas en los mismos (ARA y NRn) pueden coincidir. Sin embargo, no puede descartarse una posible competencia entre ambos procesos, en especial en el inicio y plena fructificación. Por lo tanto, dosis bajas de nitrato durante el periodo vegetativo favorecen el desarrollo de los nódulos, la fijación de nitrógeno y la actividad nitrato reductasa en nódulos de frijol, permitiendo a la planta beneficiarse, tanto de la fijación biológica de N₂, como de la reducción de nitratos.

AGRADECIMIENTOS

El autor responsable del presente trabajo agradece al CONACYT por la beca otorgada para la realización de estudios de Doctorado. Este estudio fue financiado por los proyectos PB95-1159 de la DGICYT (España) e INCO-9507 de la Comunidad Europea.

LITERATURA CITADA

- Arrese-Igor, C., F.R. Minchin, A.J. Gordon y A.K. Nath. 1997. Possible causes of the physiological decline in soybean nitrogen fixation in the presence of nitrate. *J. Exp. Bot.* 48: 905-913.
- Arrese-Igor, C., A.J. Gordon, F.R. Minchin y R.F. Denison. 1998. Nitrate entry and nitrite formation in the infected region of soybean nodules. *J. Exp. Bot.* 49: 41-48.
- Aslam, M., R.I. Travis, D.W. Rains y R.C. Huffaker. 1996. Effect of ammonium on the regulation of nitrate and nitrite transport systems in root of intact barley seedlings. *Plant Physiol.* 99: 1124-1133.
- Bacanawwo, M. y J.E. Harper. 1997. The feedback mechanism of nitrate inhibition of nitrogenase activity in soybean may involve asparagine and/or products of its metabolism. *Physiologia Plantarum* 100: 371-377.
- Barro, F., A.G. Fontes y J.M. Maldonado. 1994. Nitrate uptake and reduction by durum wheat (*Triticum turgidum*) and tritordeum (*Hordeum chilense* X *Triticum turgidum*). *Plant Physiol.* 143: 313-317.
- Becana, M. y E.J. Bednar. 1991. Metabolismo del nitrato y oxígeno en nódulos de leguminosas. pp. 19-23. In: Olivares, J. y J.M. Barea (eds.). Fijación y movilización de nutrientes VII. Colección Nuevas Tendencias. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España.
- Becana, M. y J.I. Sprent. 1987. Nitrogen fixation and nitrate reductase in the root nodules of legumes. *Physiologia Plantarum* 70: 757-765.
- Becana, M., P.M. Aparicio-Tejo y M. Sánchez-Díaz. 1988. Nitrate and hydrogen peroxide metabolism in *Medicago sativa* nodules and possible effect of leghemoglobin function. *Physiol. Plant.* 82: 755-761.
- Bliss, F.A. 1993. Utilizing the potential for increased nitrogen fixation in common bean. *Plant Soil* 152: 157-160.
- Blumenthal, J.M., M.P. Russilli y C.P. Vance. 1997. Localized and internal effect of nitrate on symbiotic dinitrogen fixation. *Physiologia Plantarum* 101: 59-66.
- Caba, J.M., C. Lluch, A. Hervás y F. Ligeró. 1990. Nitrate metabolism in roots and nodules of *Vicia faba* in response to exogenous nitrate. *Physiologia Plantarum* 79: 531-539.
- Caba, J.M., C. Lluch, A. Hervás y F. Ligeró. 1991. Acumulación de nitratos y actividad nitrato reductasa en diferentes cultivares de *Vicia faba* L. *Suelo y Planta* 1: 105-116.
- Caba, J.M., C. Lluch y F. Ligeró. 1994. Variability in symbiotic performance of *Vicia faba* genotypes. *Soil Science (Trends in Agric. Sci.)* 2: 37-43.
- Caba, J.M., C. Lluch y F. Ligeró. 1995. Distribution of nitrate activity in *Vicia faba*: Effect of nitrate and plant genotype. *Physiologia Plantarum* 93: 667-672.
- Cataldo, D.A., M. Haroon, L.E. Schrader y V.L. Youngs. 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissues by

- nitration of salicylic acid. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 6: 71-80.
- Chalifour, F.P. y L.M. Nelson. 1988. Short-term effects of nitrate reductase activity and symbiotic dinitrogen fixation of faba bean and pea. *Can. J. Bot.* 66: 1639-1645.
- Cherney, J.H. y J.M. Duxbury. 1994. Inorganic nitrogen supply and symbiotic dinitrogen in alfalfa. *J. Plant Nutr.* 17: 2053-2067.
- Da Silva, P.M., S.M. Tsai y R. Bonetti. 1993. Response to inoculation and N fertilization for increased yield and biological nitrogen fixation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Soil* 152: 123-130.
- Evans, H.J. 1954. Diphosphopyridine nucleotide nitrate reductase from soybean nodules. *Plant Physiol.* 29: 298-301.
- Hardarson, G. 1993. Methods for enhancing symbiotic nitrogen fixation. *Plant Soil* 152: 1-17.
- Herdina, J.A. y J.H. Silsbury. 1991. Estimating nitrogenase activity of faba bean (*Vicia faba* L.) by acetylene reduction (AR) assay. *Austr. J. Plant Physiol.* 17: 489-502.
- Herridge, D.F., C.A. Atkins, J.S. Pate y R. Rainbird. 1978. Allantoin and allantoic acid in the nitrogen economy of the cowpea (*Vigna unguiculata*). *Plant Physiol.* 62: 495-498.
- Herridge, D.F., O.P. Rupela, R. Serraj y D.P. Back. 1994. Screening techniques and improved biological nitrogen fixation in cool season food legumes. *Euphytica* 73: 95-108.
- Hervás, A., F. Ligeró y C. Lluch. 1991. Nitrate reduction in pea plants: Effects of nitrate application and *Rhizobium* strains. *Soil Biol. Biochem.* 23: 695-699.
- Hungria, M., C.A.A. Barradas y R.M. Wallsgrove. 1991. Nitrogen fixation, assimilation and transport during the initial growth stage of *Phaseolus vulgaris*. *J. Exp. Bot.* 42: 839-844.
- Kaiser, B.N., D.B. Layzell y B.J. Shelp. 1997. Role of oxygen limitation and nitrate metabolism in the nitrate inhibition of nitrogen fixation by pea. *Physiologia Plantarum* 101: 45-50.
- Kanayama, Y., I. Watanabe y Y. Yanamoto. 1990. Inhibition of nitrogen fixation in soybean plants supplied with nitrate. 1. Nitrite accumulation and formation of nitrosylhemoglobin in nodules. *Plant Cell Physiol.* 31: 341-346.
- Khadri, M. 1997. Metabolismo de los ureidos en nódulos de judía. pp. 235-242. *In: Vega, J.M., P.J. Aparicio, F. Castillo, J.M. Maldonado (eds.). Avances en el metabolismo de nitrógeno: De la fisiología a la biología molecular.* Sevilla, España.
- King, B.J., M. Siddiqui, T.J. Ruth, L.R. Warner y A.D.M. Glass. 1993. Feedback regulation of nitrate influx in barley roots by nitrate, nitrite and ammonium. *Plant Physiol.* 102: 1279-1286.
- Li, Z.Z. y P.M. Gresshoff. 1990. Developmental and biochemical regulation of "constitutive" nitrate reductase activity in leaves of nodulating soybean. *J. Exp. Bot.* 231: 1231-1238.
- Mahé, S., N. Gausseres y D. Tome. 1994. Legume proteins for human requirements. *Grain Legumes (Paris)* 7: 15-17.
- Müller, S., P.A.A. Pereira y P. Martin. 1993. Effect of different levels of mineral nitrogen on nodulation and N₂ fixation of two cultivars of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Soil* 152: 139-143.
- Ocaña, A., J.M. Caba, F. Ligeró y C. Lluch. 1998. Effect of plant genotype on nitrogen fixation and carbon metabolism in *Vicia faba* root nodules. *Agr. Med.* 128: 241-249.
- Pacovsky, R.S. y G. Fuller. 1991. Nitrogen assimilation and partitioning in two nitrogen-fixing cultivars of *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Soil* 132: 139-148.
- Parsons, R., A. Stanforth, J.A. Raven y J.J. Sprent. 1993. Nodule growth and activity may be regulated by a feedback mechanism involving phloem nitrogen. *Plant, Cell Environ.* 16: 125-136.
- Pate, J.S., C.A. Atkins, S.T. White, R.M. Rainbird y K.C. Woo. 1980. Nitrogen nutrition and xylem transport of nitrogen in a ureid-producing grain legume. *Plant Physiol.* 65: 961-965.
- Rigaud, J. y A. Puppo. 1975. Indol-3-acetic acid catabolism by soybean bacteroids. *J. Genet. Microbiol.* 88: 223-228.
- Sagan, M., A. Messenger y G. Duc. 1993. Specificity of the *Rhizobium*-legume symbiosis obtained after mutagenesis in pea (*Pisum sativum* L.). *New Phytol.* 125: 757-761.
- Salsac, L., J.J. Drevon, M. Zengbé, J.C. Cleyet-Marel y M. Obaton. 1984. Energy requirements of symbiotic nitrogen fixation. *Physiol. Végétal* 22: 509-521.
- Schubert, K.R. y M.J. Boland. 1990. The ureides. *Biochem. Plant* 16: 197-282.
- Siddiqui, M.Y., A.D.M. Glass y T.J. Ruth. 1989. Studies of the regulation of nitrate influx by barley seedlings using ¹³NO₃. *Plant Physiol.* 90: 806-813.
- Snell, F.D. y C.T. Snell. 1949. *Colorimetric methods of analysis.* Van Nostrand, New York.
- Soares, M.I., S.H. Lips y C.F. Cresswell. 1985. Endogenous nitrate loss as an assay for nitrate reduction in vivo. *Physiologia Plantarum* 64: 487-491.
- Stamford, N.P., M. Chamber-Pérez y M. Camacho Martínez. 1995. Symbiotic effectiveness of several tropical *Bradyrhizobium* strains on cowpea under a long-term exposure to nitrate: Relationships between nitrogen fixation and nitrate reduction activities. *J. Plant Physiol.* 147: 378-382.
- Streeter, J.G. 1979. Allantoin and allantoic acid in tissues and stem exudates from field-grown soybean plants. *Plant Physiol.* 63: 478-480.
- Svenning, M., O. Junttila y J.H. Macduff. 1996. Differential rates of inhibition of N₂ fixation by sustained low concentrations of NH₄ and NO₃ in northern ecotypes of white clover (*Trifolium repens* L.). *J. Exp. Bot.* 47: 729-738.
- Tanacka, A., K. Fujita e I. Terasawa. 1985. Growth and dinitrogen fixation of soybean root system affected by partial exposure to nitrate. *Soil Sci. Plant Nutr.* 31: 637-645.
- Teyker, R.H., W.A. Jackson, R.J. Volk y R.H. Moll. 1988. Exogenous ¹⁵NO₃ influx and endogenous ¹⁴NO₃ efflux by two maize inbreds during nitrogen deprivation. *Plant Physiol.* 86: 778-781.
- Tirado T., J.L., G. Conejero y G. Alcántar. 1990. Efecto del nitrógeno mineral y el déficit hídrico sobre las dos vías de asimilación del nitrógeno en plantas de soya. *Terra* 8: 182-192.
- Traore, A. y J.A. Maranville. 1999. Nitrate reductase activity of diverse grain sorghum genotypes and its relationship to nitrogen use efficiency. *Agron. J.* 91: 863-869.
- Truchet, G.L. y F.B. Dazzo. 1982. Morphogenesis of lucerne root nodules incited by *Rhizobium meliloti* in the presence of combined nitrogen. *Planta* 154: 352-360.
- Tsai, S.M., R. Bonetti, S.M. Agabala y R. Rossetto. 1993. Minimizing the effect of mineral nitrogen on biological nitrogen fixation in common bean by increasing nutrient levels. *Plant Soil* 152: 131-138.

Vance, C.P. y G.H. Heichel. 1991. Carbon in N₂ fixation: Limitation or exquisite adaptation. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42: 373-392.

Wycoff, K.L., S. Hunt, M.B. Gonzalez, K.A. Layzell y A.M. Hirsch. 1998. Effects of oxygen on nodule physiology and expression of nodulins in alfalfa. *Plant Physiol.* 117: 385-395.

MODELO LOGÍSTICO: HERRAMIENTA PARA DIAGNOSTICAR EL CUÁNTO Y CUÁNDO FERTIRRIGAR

Logistic Model: Tool to Diagnose How Much and When to Fertigate

Moisés Alonso Báez¹, Leonardo Tijerina Chávez^{1‡}, Prometeo Sánchez García¹, Ángel Martínez Garza², Lorenzo A. Aceves Navarro¹ y J. Alberto Escalante Estrada¹

RESUMEN

En la actualidad, la agricultura en fertirriego enfrenta el problema de cómo hacer la distribución de la dosis de fertilización de cultivos a fin de satisfacer sus requerimientos óptimos nutrimentales a través de su ciclo. Al respecto, se han obtenido las curvas de absorción nutrimental para algunos cultivos dentro de una región determinada, en las que se estiman las tasas de absorción nutrimental durante el desarrollo del cultivo y, con base en estas cantidades, se sugiere la distribución de los nutrimentos para estos cultivos en otra región. Por lo anterior, se ajustó el modelo logístico a una serie de valores de absorción de nitrógeno y potasio registrados en el chile jalapeño (*Capsicum annuum*) en fertirriego durante su ciclo, con los que se estimaron sus tasas promedio y absolutas de absorción de nitrógeno y potasio en este período. Los altos coeficientes de determinación del modelo y de correlación entre valores observados y ajustados, confirman la capacidad del modelo para diagnosticar el cuánto y cuándo fertirrigar el chile jalapeño en función de sus etapas fenológicas. De esta forma, dada una dosis de fertilización del chile jalapeño, ésta se puede distribuir en función de las tasas absolutas de absorción estimadas por el modelo, cuyas cantidades aplicadas corresponden estrictamente a cada una de sus etapas fenológicas a través de su ciclo en condiciones de fertirriego, y es posible extender el uso del modelo hacia otros cultivos en las mismas condiciones.

Palabras clave: Fertilización de cultivos, nitrógeno, potasio, tasas de absorción, *Capsicum annuum*.

¹ Instituto de Recursos Naturales, ² Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados, Km 36.5 carr. México-Texcoco, 56230 Montecillo, Texcoco, estado de México. ‡ (tijerina@colpos.mx)

Recibido: Enero de 2002. Aceptado: Septiembre de 2002.
Publicado en Terra 21: 225-231.

SUMMARY

Today, fertigation agriculture confronts the problem of how to distribute the dosage of fertilization of crops in order to satisfy the optimum nutrient requirements throughout the crop cycle. Nutritional absorption curves have been obtained for some crops within a given region. On this basis, the absorption nutrient rates are estimated during the crop cycle, and with this amount of nutrients the nutrient distribution for these crops in another region is suggested. For this reason, the logistic model was adjusted to a series of nitrogen and potassium absorption values of jalapeno pepper during its growth cycle; with these values, nitrogen and potassium averages and absolute absorption rates were estimated. The high determination and correlation coefficients of the model between the observed and adjusted values confirm the capacity of this model to diagnose how much and when to fertigate jalapeno pepper, as a function of its phenological stages. Given the fertigation dosage for jalapeno pepper, the dosage can be distributed as a function of the absolute absorption rates estimated by the model, which applied quantities strictly corresponding to each phenological stage of the crops' cycle under fertigation, and it is possible to extend the use of the model to other crops under the same conditions.

Index words: Crops fertilization, nitrogen, potassium, absorption rates, *Capsicum annuum*.

INTRODUCCIÓN

Los diferentes enfoques utilizados para estimar y sugerir recomendaciones de fertilización de cultivos, sin duda, han demostrado resultados satisfactorios en la agricultura moderna; uno de ellos es el método racional propuesto por Rodríguez *et al.* (2001) que permite hacer estimaciones de la dosis de fertilización de los cultivos muy cercana a sus requerimientos reales en la agricultura convencional (Etchevers *et al.*, 1991). Sin embargo, en condiciones de fertirriego

existen algunos cuestionamientos relacionados con la distribución de esta dosis de fertilización durante el ciclo de cultivo, de acuerdo con sus demandas en función de sus diferentes etapas fenológicas.

Por una parte, la demanda nutrimental de un cultivo puede estimarse en función de los requerimientos hídricos mediante la curva acumulada de uso consuntivo (UC), cuyo comportamiento temporal guarda estrecha relación con el desarrollo vegetal del cultivo particular (Alonso *et al.*, 2002). Por otra parte, el crecimiento se evalúa en el tiempo en función de su producción de materia seca (Fink y Feller, 1998), y se cuantifica la absorción de los nutrientes por el cultivo durante su ciclo (Feller y Fink, 1996, 1998; Le Bot *et al.*, 1998); este comportamiento graficado en un sistema de coordenadas es mejor conocido como curva de absorción nutrimental. La forma de esta curva tiene un significado biológico similar a la curva de crecimiento vegetal (Richard, 1959) y conlleva a hacer deducciones cuantitativas sobre el crecimiento de los cultivos en general, y en función del crecimiento se estima la demanda nutrimental del cultivo durante su ciclo. Con este propósito, se utilizó el modelo logístico que permite utilizar parámetros que son fácilmente deducidos de sus constantes, y tiene la particularidad de que su primera derivada proporciona la tasa absoluta de crecimiento o tasa absoluta de absorción según sea el objetivo de estudio.

Este análisis aproximado para predecir la absorción de los nutrientes de un cultivo durante su ciclo utilizando el modelo logístico, se fundamenta en el estudio cuantitativo del crecimiento vegetal por medio de una curva de crecimiento, la cual proporciona una descripción general de un cultivo en una región particular y, en esta curva, pueden relacionarse los parámetros climáticos y pueden tratarse otros estudios específicos de interés como son: riego, nutrición y fertirrigación (Richard, 1959; Causton y Venus, 1981; Milthorpe y Moorby, 1982; Robert y Daniel, 1989; Thornley y Johnson 1990).

Con relación a lo anterior, en la actualidad se sugiere el uso de modelos simples, a fin de disminuir el tiempo y el trabajo utilizado convencionalmente en la investigación en fertirriego con fines de dar respuesta a las interrogantes cuánto y cuándo regar. El uso de estos modelos sólo requiere de su validación y, dependiendo de su confiabilidad estadística o coeficiente de determinación, se sugiere su uso o rechazo para los objetivos propuestos. Así por ejemplo, el modelo logístico adopta en el tiempo un

comportamiento similar al crecimiento de los cultivos y, debido a la simplicidad de su manejo, permite la obtención de resultados rápidos y confiables, haciendo más ágil la labor de investigación en este campo del conocimiento.

Con base en lo anterior, en este trabajo se analizó el crecimiento cuantitativo del chile jalapeño bajo fertirriego (en riego por goteo), en función de su producción promedio de materia seca a través de su ciclo (de 135 días) y, por medio de ésta, se estimó la curva de absorción nutrimental: nitrógeno y potasio. Esta curva se ajustó por el modelo logístico con el objetivo de determinar su aplicación o rechazo con fines de dar respuesta a las interrogantes cuánto y cuándo regar el chile jalapeño durante su desarrollo y producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo Logístico

Se analizó brevemente el modelo logístico, el cual tiene implícitas tres fases: una fase de crecimiento exponencial, una fase de crecimiento lineal y una fase final de crecimiento total o absoluto (Richard, 1959; Rodríguez, 1989; Lieth *et al.*, 1996).

Si se considera a W como una magnitud en el tiempo t y $W+\Delta W$ en el tiempo subsecuente $t+\Delta t$, entonces el cambio de dicha magnitud ΔW puede esperarse que sea proporcional al tiempo transcurrido $\Delta W = kW\Delta t$. Reordenando la expresión anterior se tiene: $\Delta W/\Delta t = kW$. Este es el modelo más simple para describir el crecimiento en este contexto. En el crecimiento vegetal, se asume que el cambio ΔW también es proporcional a la magnitud presente o actual, W , de donde k es una constante de proporcionalidad. En lo sucesivo, si se realiza un cambio de la razón promedio de la función $W = f(W)$ por la razón de cambio instantáneo se tiene:

$$\frac{dW}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} = f'(W) \quad (1)$$

De donde:

$$\frac{dW}{dt} = kW \quad (2)$$

además, se tiene la siguiente expresión $[(A-W)/A]$ que significa el incremento de peso por unidad de peso

presente (W) o, de otra manera, es la contribución que hace cada individuo actual (al tiempo t) hasta alcanzar el tamaño tope máximo (A). Agregando ésta a la Ecuación 2, se obtiene la Ecuación 3:

$$\frac{dW}{dt} = k \frac{W}{A} (A - W) \quad (3)$$

Ésta es la ecuación diferencial de donde parte el modelo logístico o sigmoide que expresa lo siguiente: "la velocidad o tasa de crecimiento de un sistema biológico (planta, animal, etc.) es proporcional al producto del por ciento del crecimiento actual por la diferencia entre el crecimiento máximo y el actual"; éste es el modelo logístico de Verhulst (1848) (Gutiérrez y Sánchez, 1998). En este modelo, la tasa de crecimiento absoluto es el marco en que se desarrolló este estudio, la diferencia ($A-W$) mide el incremento de materia seca, $W(t)$, hasta alcanzar el valor límite máximo, A , dividido entre, A , referido a este valor máximo. Re-arreglando la Ecuación 3, se obtiene la tasa de crecimiento relativo:

$$\frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = \frac{k}{A} (A - W) \quad (4)$$

Otro análisis de la Ecuación 3 expresa lo siguiente: inicialmente el crecimiento es mínimo, cercano a cero, de donde se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{A - W}{A} = 1 \quad (5)$$

lo cual significa que cuando el crecimiento es mínimo, éste puede ser representado por la siguiente función si el crecimiento fuera ilimitado (primera fase):

$$W(t) = W_0 e^{kt} \quad (6)$$

sin embargo, como el crecimiento vegetal de plantas anuales en general se considera limitado; cuando $W(t)$ aumenta, dW/dt disminuye hasta un punto en el cual $W_\infty = A$. Se tiene que:

$$\frac{A - W}{A} = 0 \quad (7)$$

De la Ecuación 3, separando variables e integrando, se obtiene la siguiente expresión:

$$A \left[\ln \left(\frac{W}{A - W} \right) \right] = kt + c \quad (8)$$

ahora, cuando $t = 0$; $W(t) = W_0$ y la constante toma el siguiente valor:

$$c = A \left[\ln \left(\frac{W_0}{A - W_0} \right) \right] \quad (9)$$

re-ordenando las Ecuaciones 8 y 9, y declarando la siguiente función $\eta = [(W_\infty - W_0)/W_0]$; donde W_0 es el valor inicial de la variable cuando $t = 0$; por otro lado, $W_\infty = A$. Entonces se tiene:

$$\frac{A - W(t)}{W(t)} = \frac{A - W_0}{W_0 e^{kt}} \quad (10)$$

$$\frac{A - W(t)}{W(t)} = \eta e^{-kt} \quad (11)$$

En la Ecuación 11, el cociente del primer miembro es una función decreciente con el tiempo, siendo más cercana a cero cuando $W(t)$ esté más cerca de W_∞ . Sin embargo, en el contexto en que se enmarca el crecimiento vegetal de cultivos anuales (crecimiento limitado), se establece el dominio de las variables que la función describe. Si W_0 es diferente de cero y de la dimensión límite, es decir, $0 < W_0 < W_\infty$ puede verificarse que $0 < W(t) < W_\infty$ para todo t :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} W(t) = W_\infty \quad (12)$$

En relación con la Ecuación 11, después de realizar el álgebra respectiva, resulta la ecuación o modelo logístico, analizado profundamente por Richard (1959):

$$W(t) = \frac{A}{1 + \eta e^{-kt}} \quad (13)$$

Donde: W representa el tamaño en el tiempo t [$W(t)$]; A es el valor límite de crecimiento; k es una tasa constante que determina la amplitud de la curva y η no tiene significado biológico y sólo toma lugar en el tiempo inicial cuando $t = 0$.

En el modelo logístico, $W(t)$, nunca puede ser mayor que A , por lo tanto, el denominador de la función debe ser mayor que 1, y η debe limitarse a valores positivos. Así, dicha magnitud crece monótonamente, puesto que la Ecuación 3 implica que $dW/dt > 0$; de donde surgen dos situaciones: cuando $t \rightarrow -\infty$, $W(t) \rightarrow 0$ y cuando $t \rightarrow \infty$, $W(t) \rightarrow A$.

En relación con el comportamiento de la Ecuación 13, el crecimiento empieza lentamente, luego se hace más rápido (segunda fase) y, finalmente, disminuye (tercera fase). El crecimiento es más rápido en el entorno del punto de inflexión ($A/2$), el cual se obtiene igualando a cero la segunda derivada de la Ecuación 3 y estableciendo la siguiente relación $k/A = \lambda$.

$$\frac{d^2W}{dt^2} = \lambda(A - 2W) = 0 \quad (14)$$

$$W = \frac{A}{2} \quad (15)$$

ahora, sustituyendo este valor en el modelo logístico (Ecuación 13), se obtiene el tiempo donde la tasa de crecimiento es máxima:

$$t = \frac{\ln \eta}{k} \quad (16)$$

Otro resultado importante es la primera derivada del modelo logístico, de la cual resulta la tasa de crecimiento absoluto (TCA):

$$TCA = \frac{dW}{dt} = \frac{A \eta k e^{-kt}}{\left[1 + \eta e^{-kt}\right]^2} \quad (17)$$

Validación del Modelo Logístico

Para realizar la validación del modelo logístico, se contó con una serie de valores unitarios de materia seca (g planta⁻¹; compuesto: hoja, tallo y raíz) producida quincenalmente (ocho muestreos), obtenida

del análisis cuantitativo de crecimiento del chile jalapeño en condiciones de fertirriego en campo y, por medio de estos valores, se determinó la concentración de nitrógeno y potasio por los métodos microkjeldahl y absorción atómica, respectivamente (Bremner, 1965; Issac y Kerber, 1971); de este modo, se cuantificaron las tasas de absorción del cultivo durante su ciclo. Estos valores se convirtieron a $kg\ ha^{-1}$ con una densidad de población de 65 000 plantas por hectárea. La información disponible (localidad, fecha de siembra, y variedad) se localiza en Alonso *et al.* (2002).

Al inicio, el procedimiento de validación consistió en construir, a partir de los valores determinados de absorción de nitrógeno y potasio en el tiempo, la curva de absorción nutrimental que hizo el cultivo de chile jalapeño a través de su ciclo. Esta curva se ajustó por el modelo logístico y, por medio de las Ecuaciones 13 y 17, se determinaron las tasas promedio ajustadas de absorción (TABS) y absolutas de absorción (TAABS) de nitrógeno y potasio que hizo el cultivo durante su ciclo. Finalmente, se hizo una correlación entre los valores promedio observados y estimados de absorción de nitrógeno y potasio, para conocer el grado de asociación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo logístico, con base en sus características, describe con mucha precisión el comportamiento del crecimiento vegetal y, debido a que la dinámica de absorción de los nutrimentos por la planta en el tiempo obedece a este mismo fenómeno, de manera similar, pudo observarse que el modelo estimó la absorción de los nutrimentos por la planta de chile jalapeño a través de su ciclo (curva de absorción nutrimental) y, de esta forma, dado el modelo resuelto, se estimaron las tasas promedio de absorción (TABS) y absolutas de absorción (TABAS) de nitrógeno y potasio, respectivamente. Los parámetros del modelo para cada caso se presentan en el Cuadro 1. En este cuadro, los altos coeficientes de determinación (R^2) indican la bondad del modelo para utilizarse con fines de predicción, para simular el crecimiento vegetal y, en función de sus tasas absolutas de producción de materia seca, se puede hacer la distribución de la dosis de fertilización del cultivo en el tiempo, cuyas cantidades son proporcionales a cada una de las etapas fenológicas del cultivo.

Cuadro 1. Parámetros del modelo logístico obtenidos mediante el programa CURXPT V 1.3.

Parámetros del modelo	N	K
	----- kg ha ⁻¹ -----	
A	44.26	23.28
η	102.70	18.71
k	0.05	0.03
S	3.01	0.51
R ²	0.98	0.99

A, η y k son parámetros del modelo; S es la desviación estándar; R² es el coeficiente de determinación; N máx. = A y K máx. = A.

Por otra parte, en los Cuadros 2 y 3, se presentan los valores observados de absorción de nitrógeno y potasio en función de la producción de materia seca en el tiempo, las tasas promedio de absorción (TABS) y absolutas de absorción (TAABS) de nitrógeno y potasio obtenidas mediante ajuste por el modelo logístico.

En el Cuadro 2, con base en el comportamiento físico del modelo, similar al crecimiento real del cultivo en el tiempo, se observa que en función del estado de desarrollo del chile jalapeño, la tasa absoluta de absorción de nitrógeno por la planta fue de valores menores en las etapas iniciales de su desarrollo e inicio de la floración, hasta su absorción máxima alrededor de 90 días después del trasplante (DDT), cuando la floración fue máxima y el desarrollo de los frutos inició. Después, su absorción disminuyó drásticamente como lo reporta la literatura especializada sobre la función principal del nitrógeno en los cultivos hortícolas (Montag, 1997; Villarreal *et*

Cuadro 2. Valores observados[†] y tasas promedio de absorción (TABS) y absolutas de absorción (TAABS) de nitrógeno (N) del cultivo de chile jalapeño a través de su ciclo en condiciones de fertirriego.

DDT [†]	ABS-N observado [†]	TABS-N ajustado	TAABS-N
	----- kg ha ⁻¹ -----		kg ha ⁻¹ d ⁻¹
0		0.0427	0.02197
15	3.058	0.9203	0.40684
30	4.080	1.9589	0.09732
45	4.837	4.0160	0.19167
60	9.495	7.9884	0.34029
75	10.259	14.3607	0.50426
90	21.832	22.6427	0.57484
105	34.351	30.7835	0.48720
120		36.8603	0.32031
135	39.165	40.5289	0.17757

[†] días después del trasplante.

Cuadro 3. Valores observados[†] y tasas promedio de absorción (TABS) y absolutas de absorción (TAABS) de potasio (K) del cultivo de chile jalapeño a través de su ciclo en condiciones de fertirriego.

DDT [†]	ABS-K observado [†]	TABS-K ajustado	TAABS-K
	----- kg ha ⁻¹ -----		kg ha ⁻¹ d ⁻¹
0		1.1813	0.03352
15	1.849	1.1781	0.04959
30	2.611	2.6974	0.07129
45	3.322	3.9637	0.09831
60	6.322	5.6609	0.12807
75	7.741	7.7918	0.15496
90	10.632	10.2579	0.17154
105	12.319	12.8569	0.17211
120		15.3391	0.15646
135	17.631	17.4964	0.13001

[†] días después del trasplante.

al., 1997; Bar-Yosef, 1999). Después del crecimiento máximo, la absorción del nitrógeno sólo contribuyó al mantenimiento fisiológico de la planta como corresponde a su naturaleza, para que ésta concluyera con su ciclo de vida.

En el Cuadro 3, se pudo observar que efectivamente la tasa absoluta de absorción de potasio (K) en el tiempo, obedeció a la particularidad de sus funciones específicas sobre el cultivo de chile jalapeño, así como en otros cultivos hortícolas, en el sentido de que la demanda de potasio es mayor en las etapas más avanzadas de su desarrollo (105 DDT), obedeciendo fundamentalmente a su función esencial en el cultivo, precisamente en la etapa de desarrollo de los frutos, debido a que promueve su calidad y sanidad.

Con base en los resultados y considerando los altos coeficientes de determinación para ambos nutrimentos (Cuadro 1; sexta hilera), a fin de precisar en la bondad de ajuste del modelo, finalmente se hizo una correlación entre los valores promedio observados y promedio estimados por el modelo, de donde se determinaron altos coeficientes de correlación (Cuadro 4), lo cual confirma la aplicación del modelo logístico para el objetivo señalado. Éste, es un modelo simple que puede utilizarse como una aproximación en fertirriego para hacer la distribución racional de la dosis de fertilización de cultivos a través de su ciclo, cuando, para un caso particular, se cuente con la curva discreta de valores de absorción de los nutrimentos del cultivo durante este período; pues como se mostró en los Cuadros 2 y 3, el ajuste del modelo predice en el tiempo las cantidades de nutrimentos mayores que

Cuadro 4. Resultados de correlación entre valores promedio observados de absorción (Y) y estimados de absorción (X) de nitrógeno y potasio (N y K; kg ha⁻¹) por el modelo logístico en chile jalapeño en condiciones de fertirriego.

Nutrimiento	Ecuación	(r)
N	$Y = 1.0107 * X + 0.5789$	0.9789
K	$Y = 0.9736 * X + 0.3685$	0.9924

deben de aplicarse técnicamente al cultivo de chile jalapeño en condiciones de fertirriego y en consecuencia es posible extender este mismo principio a otros cultivos en función de su crecimiento.

Hasta ahora, los resultados muestran la capacidad del modelo para predecir la distribución racional de la dosis de fertilización de cultivos anuales cuando se establecen en fertirriego. Sin duda, el modelo es aceptable si se tiene como antecedente que la curva discreta de valores de absorción (curva de absorción nutrimental) refleja las demandas nutrimentales que tiene un cultivo particular en función de sus diferentes etapas fenológicas, y la misma se sugiere para establecer los programas de fertirriego para un cultivo particular (Villarreal *et al.*, 1997). De esta forma, en la práctica del fertirriego, como se mostró en el presente trabajo, de la curva de absorción ajustada se obtienen las tasas promedio de absorción y absolutas de absorción en el tiempo y, cuando ya se ha definido el programa de riego, por ejemplo en chile jalapeño, a partir de las tasas absolutas de absorción mencionadas se obtienen las cantidades de nutrimentos que deben de aplicarse al cultivo en cada fertirriego, lo cual refleja evidentemente que dichas cantidades son directamente proporcionales a los requerimientos nutrimentales del cultivo en función de su crecimiento a través de su ciclo.

CONCLUSIONES

- El modelo logístico simula con bastante precisión el crecimiento y la dinámica de absorción de nitrógeno y potasio del cultivo de chile jalapeño en condiciones de fertirriego durante su ciclo, y la extensión de su aplicación con este propósito para otros cultivos.
- El modelo tiene capacidad predictiva, debido a que puede diagnosticar el cuánto y cuándo suministrar los nutrimentos nitrógeno y potasio al cultivo de chile jalapeño con fertirriego en función de sus diferentes etapas fenológicas a través de su ciclo.

LITERATURA CITADA

- Alonso B., M., L. Tijerina Ch., P. Sánchez G., L.A. Aceves N., A.J. Escalante E. y A. Martínez G. 2002. Producción de chile jalapeño con fertirriego como función de la tensión de humedad del suelo, nutrición nitrogenada y potásica. *Terra* 20: 209-215.
- Bar-Yosef, B. 1999. Nutrient concentration in fertigation and soil solutions. *Adv. Agron.* 65: 41-49.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. *In*: C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part. 2. Agronomy* 9. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Causton, D.R. y C.J. Venus. 1981. *The biometry of plant growth.* Series. Edward Arnold. London, UK.
- Etchevers B., J., J. Rodríguez y A. Gálvis. 1991. Generación de recomendaciones de fertilización mediante un enfoque sistemático racional. *Terra* 9: 3-10.
- Feller, C. y M. Fink. 1996. Nitrogen uptake of vegetable crops estimated by means of simple mathematical models. *Acta Horticulturae* 428: 243-251.
- Feller, C. y M. Fink. 1998. Estimation of nitrogen uptake of field vegetables. *Acta Horticulturae* 506: 117-121.
- Fink, M. y C. Feller. 1998. A simple model for describing growth and nitrogen uptake of white cabbage. *Scientia Horticulturae* 73: 75-88.
- Gutiérrez S., J.L. y F. Sánchez G. 1998. *Matemáticas para las ciencias naturales. Aportaciones matemáticas.* Sociedad Matemática Mexicana. Instituto de Matemáticas, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Issac, R.D. y J.D. Kerber. 1971. Atomic absorption and flamephotometry: techniques and uses in soil, plant and water analysis. pp. 125-253. *In*: L.M. Walsh (ed.). *Instrumental methods for analysis of soil, plant tissue.* Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Le Bot, J., S. Adamowicz, P. Robin, J.L. Andriolo y C. Gary. 1998. Modelling nitrate uptake by greenhouse tomato crops at short and long time scales. *Acta Horticulturae* 456: 237-245.
- Lieth, J., H. Fisher y P.R. Heins. 1996. A phasic model for the analysis of sigmoid patterns of growth. *Acta Horticulturae*, 417: 113-118.
- Milthorpe, F. y L. Moorby S. 1982. *Introducción a la fisiología de los cultivos.* Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina.
- Montag, U.J., 1997. *Guidelines for preparation of dry soluble fertilizer blend and fertilizer solutions.* Haifa Chemicals. Haifa, Israel.
- Richard, F. 1959. A flexible growth function for empirical use. *J. Exp. Bot.* 10: 290-300.
- Robert, J.J. y T.H. Daniel. 1989. An empirical model for leaf expansion in cacao i relation to plant water deficit. *Ann. Bot. (London)* 64: 1-8.
- Rodríguez A., J. 1989. *Modelos matemáticos aplicados a la agricultura.* Confederación de Asociaciones Agrícolas del Estado de Sinaloa. Comisión para la Investigación y Defensa de las Hortalizas en Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.
- Rodríguez S., J., D. Pinochet T. y F. Matus B. 2001. *Fertilización de los cultivos.* Santiago-Talca-Valdivia. Santiago de Chile, Chile.

Thornley, J.H.M. e I.R. Johnson. 1990. A mathematical approach to plant and crop physiology. Academic Press. London, UK.
Verhulst, P.F. 1848. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. Correspondance Mathématique et Physique Publié par M.A. Quételet 10: 113-121.

Villarreal R., M., G. Alcantar G., G. Baca C., J. Martínez H., V. Volke H. y L. Tijerina Ch. 1997. Nutrición balanceada en fertirrigación y su efecto en la producción y calidad de tomate. pp. 65-72. *In*: Memorias del 2° Simposium Internacional de Ferti-irrigación. Querétaro, México.

INTEGRACIÓN DE LA EUPS A UN SIG PARA ESTIMAR LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA DE TEPATITLÁN, JALISCO, MÉXICO

Integration of the USLE to a GIS to Estimate the Soil Erosion by Water in a Watershed of Tepatitlán, Jalisco, Mexico

Hugo Ernesto Flores López^{1†}, Mario Martínez Menes¹, J. Luis Oropeza Mota¹, Enrique Mejía Sáenz¹ y Rogelio Carrillo González¹

RESUMEN

La pérdida de suelo por erosión hídrica es uno de los problemas que puede afectar fuertemente la actividad agropecuaria a mediano y largo plazo, ya que las estimaciones más conservadoras proponen que 45% de los suelos tienen algún grado de erosión. La observación continua para identificar las áreas críticas a escala de cuenca, puede ayudar a la toma de decisiones en el control de este proceso, por lo que en este trabajo se evaluó una aproximación metodológica para ello. Se estimó la erosión hídrica actual, potencial y tolerante en la cuenca El Jihuite en Tepatitlán, Jalisco, México, por medio de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) integrada a un sistema de información geográfica (SIG). La modelación de la pérdida de suelo con SIG requiere que los factores de EUPS sean funciones matemáticas o que puedan expresarse con valores en una imagen 'raster'. Es necesario incorporar algoritmos que permitan calcular el factor L de acuerdo con su concepción original para su aplicación en SIG, y el uso de modelos de elevación digital con alta resolución para disminuir el efecto de pendientes cóncavas. La percepción remota aplicada a la identificación de la distribución espacial de la vegetación permitirá determinar con mayor detalle el factor C. En general, se encontró baja disponibilidad de información local confiable para la aplicación de EUPS a escala de cuenca con SIG.

Palabras clave: Manejo de cuencas, EUPS, SIG, erosividad, erodabilidad.

¹Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, México. †(floresh@colpos.colpos.mx)

Recibido: Octubre de 2001. Aceptado: Septiembre de 2002.
Publicado en Terra 21: 233-244.

SUMMARY

Water erosion is a concern, because soil losses can affect farming and livestock in the medium and long term. The most conservative assessments estimate that 45% of Mexican soils are eroded to some degree. Continuous monitoring to identify critical areas on the scale of an entire watershed could help decision-making in the control of soil erosion. This study evaluates a method for monitoring soil erosion. Current, potential, and tolerable erosion were estimated in the watershed El Jihuite, Tepatitlán, state of Jalisco, Mexico, using the universal soil loss equation (USLE) integrated to the geographical information system (GIS). Modeling soil losses with GIS requires USLE factors expressed as mathematical functions or values in a raster image. It is necessary to incorporate algorithms that allow calculating the L factor according to the original conception for its application in GIS, and the use of digital elevation models with high resolution would decrease the effect of concave gradients. The remote perception to identify spatial distribution of vegetation will allow determination the C factor with greater detail. In general, we found little reliable local information available to apply USLE to GIS.

Index words: Watershed management, USLE, GIS, erosivity.

INTRODUCCIÓN

En México, la pérdida de la capa arable de los suelos es uno de los principales problemas. La causa principal se debe al común denominador del mal manejo del suelo por el hombre, causando la erosión hídrica, con el consecuente empobrecimiento del suelo y la pérdida de su productividad. Por estas razones, la

erosión incrementa los costos de producción agrícola, por disminuir los beneficios al agricultor o por elevar los precios de los alimentos a los consumidores. El efecto ocurre en forma directa al causar bajos rendimientos de cultivos o forrajes, incremento en el requerimiento de fertilización, dificultad en la labranza y aumento de los gastos por mantenimiento de las unidades de producción (USDA-SCS, 1990).

El problema de la erosión del suelo en México es de gran magnitud, el cual se ha observado desde 45 hasta 98% de la superficie, la variación en la cantidad estimada es debida al enfoque de evaluación (Figueroa *et al.*, 1991). En Jalisco, Flores *et al.* (1996) observaron a partir de un muestreo sistemático de suelos en la cuenca hidrográfica El Jihuite, que 99.4% del área tiene algún grado de erosión.

La erosión del suelo es un fenómeno complejo gobernado por factores como la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la topografía del terreno, el uso del suelo y las medidas de conservación (Singh *et al.*, 1992). Para su evaluación, se han generado diversos métodos (SARH-CP, 1982), pero sin duda alguna, la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) ha sido el método más utilizado para diseñar planes de manejo acorde a las condiciones propias de cada lugar. Figueroa *et al.* (1991) adaptaron la EUPS a las condiciones de México, utilizando información accesible que ha permitido su aplicación a los paisajes del país. Además, diversos autores han hecho esfuerzos para obtener la información requerida en los parámetros de EUPS (Ríos y Martínez, 1990; Osuna y Esquivel, 1996), con el fin de apoyar el diseño de estrategias de manejo para el control de la erosión del suelo a escala de predio. En la actualidad, la simplicidad de EUPS ha permitido su integración a herramientas como los sistemas de información geográfica (SIG), con resultados satisfactorios para la elaboración de planes de manejo y conservación de suelo (FAO, 1993; Bhan *et al.*, 2000; Eiumnoh, 2000; Mati *et al.*, 2000). Sin embargo, este enfoque requiere que los factores de EUPS se expresen de manera matemática o en mapa 'raster' para poder hacer modelos en un SIG, como el factor K que en el presente caso utiliza la distribución espacial del tipo de textura del suelo y considerando cada píxel como un predio agrícola con dimensiones indicadas por la distancia entre píxeles. El objetivo de este trabajo es presentar un procedimiento para integrar los factores de la EUPS a un SIG para estimar mediante modelos las pérdidas potenciales, actuales y toleradas del suelo, dentro de la cuenca El Jihuite, en Jalisco, México.

REVISIÓN DE LITERATURA

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

La ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) se diseñó para calcular la erosión laminar y en surcos de terrenos (Wischmeier, 1976); consiste en un modelo matemático multifactorial que integra seis procesos que intervienen en la erosión hídrica, como los que indica la expresión:

$$A = R K L S C P$$

Donde: A es el promedio anual de pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$), R es el factor de erosividad de la lluvia ($MJ\ mm\ (ha\ h)^{-1}$), K es el factor de erosionabilidad del suelo ($t\ ha\ h\ (MJ\ mm\ ha)^{-1}$), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional), S es el factor del grado de la pendiente (adimensional), C es el factor de manejo del cultivo (adimensional), P es el factor de prácticas mecánicas para el control de la erosión (adimensional).

Descripción de los Factores de la EUPS

Factor R. El factor de erosividad de la lluvia R es la suma de valores de erosividad de tormentas individuales, expresado como:

$$R = \sum_{i=1}^n (EI_{30})_i$$

Donde: E es la energía cinética de la lluvia en $kg\ m\ (m^2\ mm)^{-1}$, I_{30} es la intensidad de la lluvia en 30 min en $mm\ h^{-1}$ y n es el número de tormentas en el año (Figueroa *et al.*, 1991).

Uno de los problemas en muchos países, entre ellos México, es la falta de instrumentación que mida la intensidad de la lluvia y, en consecuencia, la carencia de datos, por lo que se han desarrollado diversos modelos que estimen el índice de erosividad R con elementos del clima como la lluvia anual (Ulsaker y Onstad, 1984), la lluvia máxima diaria en un periodo de retorno de dos años, el promedio anual de la lluvia del mes más lluvioso de cada año y factores de zonificación (TRAGSA, 1994), el uso del modelo logístico que involucra el tiempo y los parámetros empíricos que describen las características: variación anual de la erosión, duración del periodo de tiempo de mayor erosión del año e intensidad de la erosión en ese lapso de tiempo (Hu *et al.*, 2000).

Factor K. El factor de erodabilidad del suelo (K), indica la susceptibilidad de los suelos a erosionarse. Para un suelo particular, K se define como la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad cuando es medido en una parcela estándar. La parcela estándar es la parcela de 22.1 m de longitud, con una pendiente uniforme de 9%, de labranza continua y a lo largo de la pendiente (Wischmeier y Smith, 1978).

Los resultados de estudios conducidos con simuladores de lluvia se utilizaron para producir un nomograma de erodabilidad de suelo basado en textura y estructura del suelo (Brooks *et al.*, 1993). Cuando no se disponga de información para hacer uso del nomograma, Figueroa *et al.* (1991) sugirieron al método propuesto por FAO (1980) para determinar el valor de K, el cual sólo requiere conocer la unidad de suelo y su textura. Otra opción es aplicar la función utilizada en el modelo EPIC, la cual demanda los porcentajes de carbón orgánico, de arena, limo y arcilla, de la capa superficial del suelo (Williams *et al.*, 1990).

Factor LS. Este factor representa el efecto de la topografía sobre la erosión del suelo. La erosión aumenta conforme se incrementa la longitud del terreno (L) en el sentido de la pendiente y la inclinación de la superficie (S) se hace mayor (Figueroa *et al.*, 1991). Los dos efectos se evalúan en campo por separado y son considerados en la EUPS también en forma separada como L y S, aunque se recomienda considerarla como un solo factor LS. El factor L es definido como la distancia del punto de origen del flujo superficial al punto donde la pendiente decrece hasta que ocurre sedimentación o el escurrimiento entra a una red de drenaje o a un canal construido. El factor S indica el grado de inclinación de la pendiente. La pérdida de suelo se aumenta más rápidamente con la inclinación de la pendiente que con la longitud (Wischmeier y Smith, 1978).

Cuando se utilizan los SIG's para evaluar la erosión de los suelos a escala de cuenca, se ha tenido dificultades para obtener el valor del factor topográfico LS, en particular al atender la definición del factor L, por lo que han hecho esfuerzos para calcularlo con algoritmos de programación y el uso de modelos de elevación digital (MED) (Hickey, 2000; Van Remortel *et al.*, 2001), aunque en la mayoría de los casos se ha optado por la aplicación directa de las funciones antes mencionadas para el cálculo de LS en MED manejado en un SIG (Mati *et al.*, 2000).

Factor C. El factor C de manejo de cultivo y cobertura del suelo, es la relación de pérdidas de un terreno cultivado en condiciones específicas, con respecto a las

pérdidas de un suelo desnudo y con barbecho continuo en las mismas condiciones de suelo, pendiente y lluvia (Wischmeier y Smith, 1978). Figueroa *et al.* (1991) presentaron un procedimiento para el cálculo del factor C a partir de la integración de factores que afectan la erosión como las etapas de crecimiento vegetal, los efectos de cultivos y manejo, las pérdidas relativas de suelo y el índice de erosividad de la lluvia.

Brooks *et al.* (1993) mencionaron que en los lugares donde no se dispone de guías para el establecimiento de valores de C en cultivos de campo, es más fácil correlacionar las tasas de pérdida de suelo con las cantidades de materia orgánica seca por unidad de área y el porcentaje de cobertura de suelo. También existe en la literatura una amplia variedad de valores del factor C que pueden seleccionarse de acuerdo con las condiciones particulares del sitio (Wischmeier y Smith, 1978; Mitchell y Bubenzer, 1980; Figueroa *et al.*, 1991; TRAGSA, 1994; Morgan, 1997).

Factor P. Este factor indica la proporción del suelo perdido en las prácticas mecánicas de manejo del suelo específicas con relación a las pérdidas de suelo en cultivos a lo largo de la pendiente (Wischmeier y Smith, 1978). Las prácticas más importantes para reducir el escurrimiento de agua y, por consecuencia, la erosión del suelo son: el surcado en contorno, el cultivo en fajas en contorno y las terrazas. Figueroa *et al.* (1991) presentaron cuadros con el valor de P para cada una de estas prácticas de acuerdo con su combinación con las condiciones de pendiente, longitud máxima del surcado, rotación de cultivo, sistema de labranza, número de fajas, ancho de fajas y su longitud máxima, intervalo horizontal de las terrazas. Este tipo de valores son utilizados en el modelo EPIC para el cálculo de erosión del suelo (Williams *et al.*, 1990).

Erosión potencial. La erosión hídrica potencial se estima de EUPS, al utilizar únicamente los factores RKLS (Wischmeier y Smith, 1978), expresada como $A = RKLS$. La razón es que los factores CP de la EUPS representan las actividades atenuantes del proceso erosivo y en la medida que se diseñen prácticas agronómicas y mecánicas, la erosión potencial podrá reducirse a valores tolerables.

Erosión tolerable. La erosión tolerable se refiere a la proporción máxima de pérdida de suelo que pueda ocurrir y aún permita que la productividad del cultivo sea económicamente sostenida (Renard *et al.*, 1996). Estos autores indicaron que este concepto considera la pérdida de productividad causada por la erosión, pero también incluye la tasa de formación del suelo del material parental, la formación de suelo en la parte

superficial, la pérdida de nutrimentos y el costo de reemplazarlos, la tasa a la que la erosión por cárcavas podría esperarse comience y las prácticas para el control de la erosión que los agricultores podrían implementar.

La evaluación de tolerancias de pérdida de suelo en un terreno es un aspecto básico para determinar el uso y manejo más adecuado de éste. Wischmeier y Smith (1978) mencionaron que la tolerancia para la pérdida de suelo para los Estados Unidos varía de 2.50 a 12.36 t (ha año⁻¹), aunque suelos profundos que favorecen el desarrollo radical de los cultivos podrían exceder 12.36 t de tolerancia en la pérdida de suelo. Con este criterio se han propuesto valores de tolerancia a la pérdida de suelo, como el enfoque indicado por Heimlich y Bills (1984), quienes, al despejar el factor CP de EUPS, buscaron encontrar la erosión potencial en sistemas de producción intensivos donde sin prácticas de manejo y conservación del suelo no se rebasará la erosión tolerable de 12.36 t (ha año⁻¹), así como en sistemas de cultivo intensivos que sí lo requirieran; los valores de CP asignados fueron 0.7 y 0.1, respectivamente, rango observado en un alto porcentaje de los terrenos agrícolas de la faja maicera de los Estados Unidos. El resultado fue una clasificación de la erosión del suelo indicada en el Cuadro 1.

Sistemas de Información Geográfica e Integración de la EUPS

Un sistema de información geográfica (SIG) es una herramienta poderosa para coleccionar, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real a propósitos particulares (Burrough y McDonnell, 1998), con la finalidad de

contribuir con información para la toma de decisiones y considerarse como una fuente para los sistemas expertos (Bocco *et al.*, 1991). La integración de EUPS a un SIG ha empezado a tomar importancia, pues esta interrelación permite cuantificar la pérdida de suelo de manera rápida a escala de cuenca, con un mínimo de trabajo de campo y con la complejidad de las escalas grandes (FAO, 1996; Mati *et al.*, 2000).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La cuenca EL Jihuite se localiza en el municipio de Tepatitlán, al noreste del estado de Jalisco, entre los paralelos 20° 50' 57" y 20° 55' 50" N, los meridianos 102° 36' 50" a 102° 43' O y una altitud de 1900 a 2280 m (Figura 1).

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1988), el clima se define como (A)C(w₁)(w)(e)g, templado subhúmedo con temperatura media del mes más caliente superior a 22 °C y temperatura media anual menor que 18 °C, con menos de 5% de lluvia invernal con relación al promedio anual.

La precipitación promedio anual es de 822.1 mm con 88 días de lluvia apreciable; la estación de crecimiento con 70% de probabilidad de excedencia de lluvia es de 135 días del 16 de junio al 28 de octubre. El promedio anual de temperaturas máxima, mínima y media es de 25.6, 7.6 y 16.6 °C, respectivamente; para la estación de crecimiento, la media de temperaturas máxima, mínima y media es de 25.1, 10.5 y 17.8 °C, respectivamente (Flores *et al.*, 1996).

Cuadro 1. Clases de pérdidas de suelo de acuerdo con dos enfoques de clasificación (Heimlich y Bills, 1984).

Clases de erosión	Enfoque de clasificación		Significado
	Erosión potencial	Erosión actual	
	----- t(ha·año) ⁻¹ -----		
No erosivo	< 17.30	Erosión debajo de todos los niveles con factores CP.	
Moderadamente erosivo:			
Manejo debajo de la tolerancia	> 17.30	< 12.36	Erosión debajo de la tolerancia para bajo CP [†]
Manejo arriba de la tolerancia.	17.30 < RKLS < 123.55	> 12.36	Erosión arriba de la tolerancia para bajo CP
Altamente erosivo	> 123.55	> 12.36	Erosión arriba de la tolerancia para todos los niveles de CP

[†] Factores de cobertura del suelo (C) y prácticas de manejo (P) de EUPS (Ecuación universal de pérdida de suelo).

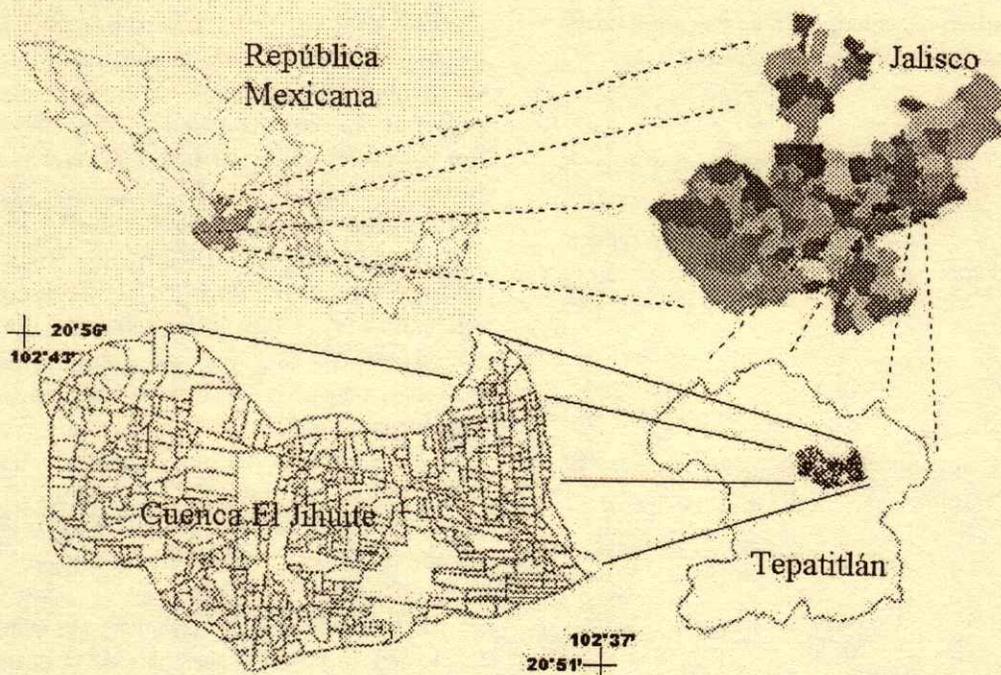


Figura 1. Localización geográfica de la cuenca hidrográfica El Jihuite.

La topografía de la cuenca es lomerío con pendientes de 1 a 58%. De acuerdo con la cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el suelo en gran parte de la cuenca es Luvisol férrico, de textura arcillosa o migajón arcilloso, con profundidad de hasta 1 m. Otro tipo de suelo que se presenta en la parte norte es el Planosol eútrico, de textura arcillosa con profundidad de 40 cm o menos.

Según los estudios realizados por la Comisión Técnica Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostadero de la República Mexicana (COTECOCA), la vegetación en la superficie de la cuenca corresponde a los tipos: Bosque Esclerófilo Caducifolio y Selva Baja Caducifolia. El uso del suelo indica que cerca de 30% de la superficie está dedicada a cultivos anuales, 10% es de praderas de temporal, 55% es de agostadero con especies nativas y 5% se utiliza con caminos, construcciones y otros usos. La totalidad de los predios que conforman la superficie de la cuenca El Jihuite están bajo el régimen de pequeña propiedad, con tamaño promedio estimado de 20 hectáreas.

Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Los factores que componen la EUPS se estimaron como sigue: El factor de erosividad de la lluvia R se evaluó utilizando la ecuación que presentaron Figueroa *et al.* (1991), que corresponde a la región VII de la república mexicana, en la cual se localiza la cuenca El Jihuite. El modelo aplicado fue:

$$Y = -0.0334X + 0.006661X^2, \text{ con } R^2 = 0.98$$

Donde: Y es el valor de EI_{30} anual en $MJ \cdot mm (ha \cdot hr)^{-1}$ y X es la lluvia anual en mm.

El factor de erosionabilidad del suelo (K) se estimó utilizando la función indicada por Williams *et al.* (1990):

$$K = \left[0.2 + 0.3 \cdot e^{-0.0256 \cdot SAN \left(1 - \frac{SIL}{100} \right)} \right] \cdot \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \cdot \left(1 - \frac{0.25 \cdot C}{C + e^{(3.72 - 2.95 \cdot C)}} \right) \cdot \left(1 - \frac{0.7 \cdot SN1}{SN1 + e^{(-5.51 + 22.9 \cdot SN1)}} \right)$$

Donde: SAN es el porcentaje de arena, SIL es el porcentaje de limo, CLA es el porcentaje de arcilla, C es el porcentaje de carbón orgánico, SN1 se calcula a partir del porcentaje de arena con la relación siguiente:

$$SN1 = 1 - \frac{SAN}{100}$$

Para calcular el factor de longitud de la pendiente (L) se utilizó la función:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

Donde: λ es la longitud de la pendiente en m, m es un exponente con la modificación hecha por Foster *et al.* (1977):

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)} \text{ y } \beta = \left[\frac{\left(\frac{\text{sen}\theta}{0.0896} \right)}{3.0(\text{sen}\theta)^{0.8} + 0.56} \right]$$

Donde: θ es el ángulo de la pendiente. El valor de λ se obtuvo utilizando el modelo de elevación digital (MED) de INEGI (1999); con una distancia entre pixeles de 90 m. La longitud de la pendiente se calculó con la relación siguiente:

$$\lambda = \frac{90}{\cos\theta}$$

El factor inclinación de la pendiente (S), se calculó con las ecuaciones siguientes:

$$S = 10.8 \text{ sen } \theta + 0.03, \text{ si } s < 9\% \text{ y}$$

$$S = 16.8 \text{ sen } \theta - 0.50 \text{ si } s \geq 9\%.$$

El factor de cobertura y manejo del cultivo (C) se determinó para terrenos con uso agrícola y pecuario; en el uso agrícola, el maíz y agave son los cultivos principales en la cuenca; las áreas de uso pecuario incluye los terrenos con agostadero principalmente (Alemán *et al.*, 1996). Mediante fotografía aérea escala 1:75 000 (vuelo de INEGI de 1993) se delimitaron estos usos y con imagen de satélite LANDSAT ETM+ se determinó la cobertura del suelo. Estas condiciones de cobertura del suelo y algunas características de los cultivos se utilizaron

para determinar el factor C de acuerdo con la metodología propuesta por Figueroa *et al.* (1991).

Flores *et al.* (2000) indicaron que el maíz es de producción continua, donde la preparación de la cama de siembra se realiza con arado de discos y un rastreo posterior; la cosecha se hace en el mes de diciembre, por lo que el valor del factor C para este cultivo que resultó fue de 0.596. En el cultivo de agave no se encontraron valores del factor C, por lo que se consideró como parte del área de agostadero con 33 a 66% de cobertura. Para los terrenos con agostadero, Alemán *et al.* (1996) indicaron características como el sobrepastoreo, excesiva carga animal sin rotación de potreros, consumo total de forraje, poca superficie de pasto mejorado y presencia de arbustos y árboles. Con esta base, los valores de C seleccionados para suelos con agostadero fueron 0.17, 0.06, 0.013 y 0.003, que corresponden a coberturas de 0 a 33%, 33 a 66%, 66 a menos de 100% y 100% de la imagen "LANDSAT", respectivamente.

El factor prácticas mecánicas (P) para el control de la erosión en terrenos agrícolas de la cuenca se presenta en el Cuadro 2, como una relación entre el porcentaje de la pendiente, los valores P y la longitud máxima de los surcos trazados en contorno. En terrenos de uso ganadero, el valor de P se consideró igual a 1, pues en estos terrenos no se desarrollan prácticas mecánicas.

Datos Utilizados

La información de lluvia anual para el cálculo del factor R procedió de los registros de la estación agrometeorológica del Campo Experimental Altos de Jalisco de INIFAP, ubicada dentro de la cuenca, en el periodo de 1983 a 2000.

Las fracciones de textura y la materia orgánica (MO) del suelo utilizadas se obtuvieron de un muestreo

Cuadro 2. Valores del factor P de acuerdo con el porcentaje de la pendiente y límites de longitud máxima de los surcos en contorno (Williams *et al.*, 1990).

Pendiente del terreno	Valores de P	Longitud máxima
%		pies
1 a 2	0.60	400
3 a 5	0.50	300
6 a 8	0.50	200
9 a 12	0.60	120
13 a 16	0.70	80
17 a 20	0.80	60
21 a 25	0.90	50

sistemático de suelos dentro de la cuenca en una malla con puntos equidistantes cada 500 m y se localizaron geográficamente con un sistema de posicionamiento global (GPS por siglas en inglés); la muestra se tomó a una profundidad de 30 cm. A partir de este muestreo se generaron mapas tipo 'raster' con resolución de píxeles cada 90 m, en programas de interpolación en TURBO C. El porcentaje de carbón orgánico (C) se obtuvo a partir de la disponibilidad espacial de MO en el área en estudio y las fórmulas para el cálculo del porcentaje de MO y C, indicadas por León y Aguilar (1987), de las que se obtuvo la expresión:

$$C = \frac{MO}{1.72}$$

(Porta *et al.*, 1999). La información espacial de MO, arena, limo y arcilla en la cuenca El Jihuite, se obtuvo de la base de datos de la cuenca generados por Flores *et al.* (1996).

Sistema de Información Geográfica

Los mapas 'raster' obtenidos se manejaron con el sistema de información geográfica IDRISI 32 y la presentación final se preparó con ARCVIEW3.2 y COREL DRAW 8.0. Para la determinación de la cobertura del suelo se utilizaron imágenes LANDSAT ETM+ del 4 de abril de 2000.

Tolerancia a la Pérdida de Suelo

En la evaluación de la erosión tolerable, se utilizó la profundidad de los sistemas radicales y tipo de sustrato de suelo que se señalan en el Cuadro 3. En el presente trabajo se consideró un sustrato de suelo tipo a, de acuerdo con las características de profundidad, pedregosidad, pendiente, pH y contenido de MO del suelo, obtenidas en el muestreo sistemático que realizaron Flores *et al.* (1996).

Para evaluar el riesgo por erosión de los suelos, se utilizaron los valores indicados en el Cuadro 1 propuestos por Heimlich y Bills (1984). Estos reflejan el efecto de los factores cobertura del suelo (C) y prácticas de manejo (P) de EUPS, con valores de CP en el rango de 0.1 a 0.7, que cubren casi todas las condiciones encontradas en el área de estudio y de muchas zonas de México.

Cuadro 3. Guía de valores de tolerancia de pérdidas de suelo para distintas profundidades de raíces y sustratos (TRAGSA, 1994).

Profundidad de raíces cm	Valores de tolerancia de pérdida de suelo según sustrato	
	a	b
0 - 25	2.2	2.2
25 - 50	4.5	2.2
50 - 100	6.7	4.5
100 - 150	9.0	6.7
> 150	11.2	11.2

a = suelo con sustrato favorable que puede ser renovado por labores, fertilizantes, adición de materia orgánica y otras prácticas de cultivo.
b = suelos con sustrato desfavorable como el caso de rocas descompuestas en las que no resulta económica su renovación artificial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)

Los factores K, LS, C y P, que integran la EUPS y que se obtuvieron para la cuenca el Jihuite, se presentan en las Figuras 2, 3, 4 y 5.

La importancia de estos datos radica en que la calidad de los resultados es función directa de ellos. Wischmieir (1976) mencionó que la fuente potencial más grande de error en la predicción de EUPS es la superficialidad en la selección de los valores de los factores que la componen, por lo que sugiere precisar las condiciones a ser evaluadas y que estén de acuerdo con las características de la cuenca, ya que de no precisarlos, los errores se acentúan más al aplicarlos en un SIG, como se indica en el análisis de cada uno de los factores de EUPS.

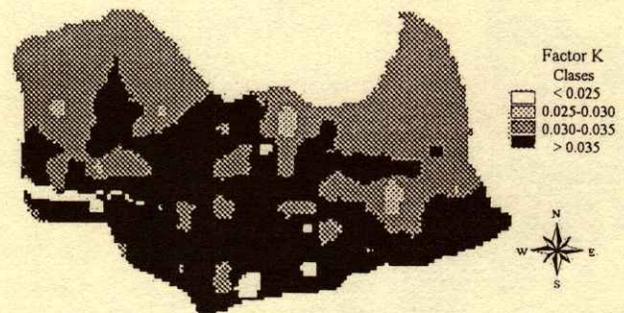


Figura 2. Distribución espacial del factor K de EUPS (ecuación universal de pérdida de suelo) en la cuenca hidrográfica El Jihuite.

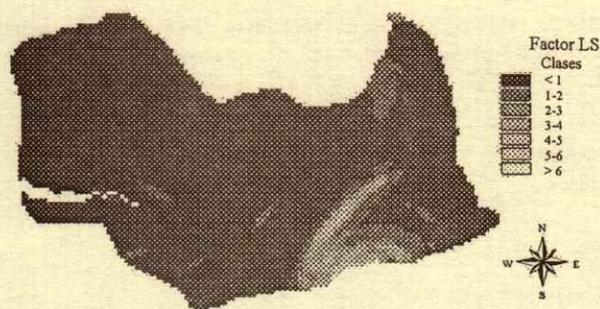


Figura 3. Distribución espacial del factor LS de EUPS (ecuación universal de pérdida de suelo) en la cuenca hidrográfica El Jihuite.

Con respecto al factor R, el valor de $4475 \text{ (MJmm)}^{-1} \text{ (ha}\cdot\text{h)}^{-1}$ que resultó, guarda concordancia con las mostradas en el mapa de isoerosividad (líneas de igual erosividad) indicado por Figueroa *et al.* (1991). En este factor se tiene la seguridad que los datos de lluvia utilizados corresponden a una estación meteorológica localizada dentro de la cuenca, condición de importancia para lograr resultados coherentes con la realidad (Wanielista *et al.*, 1997). Sin embargo, no deja de ser una estimación del factor R, por lo que es necesario obtenerlo con el uso de pluviogramas (Wischmeier y Smith, 1978) o algún factor dependiente de la intensidad de lluvia, como datos horarios de lluvia (Colotti, 1998), lluvia acumulada en 5 min (Chow *et al.*, 1994) y el uso de una red pluviométrica para incluir el efecto topográfico (Wanielista *et al.*, 1997), que mejoraría la distribución en tiempo y espacio de R.

El valor de factor K en la cuenca varió de 0.025 a $0.035 \text{ tha h (ha MJ mm)}^{-1}$, con una marcada susceptibilidad de los suelos de la parte norte de la cuenca, lugar donde se localizan las unidades de suelo

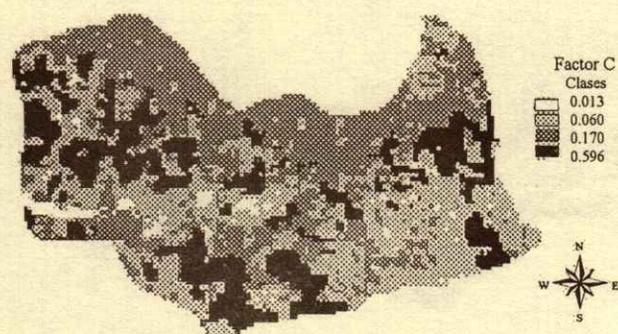


Figura 4. Distribución espacial del factor C de EUPS (ecuación universal de pérdida de suelo) en la cuenca hidrográfica El Jihuite.

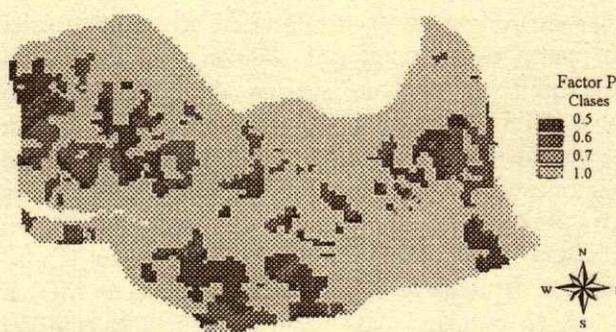


Figura 5. Distribución espacial del factor P de EUPS (ecuación universal de pérdida de suelo) en la cuenca hidrográfica El Jihuite.

Planosol eútrico. Figueroa *et al.* (1991) mencionaron que los Planosoles de textura fina tienen el valor de K del orden de 0.026, mientras que en los Luvisoles férricos de textura media y fina es de 0.020 y 0.007, respectivamente. Los valores anteriores guardan una estrecha relación con los presentados en la Figura 3; no obstante, se requiere evaluar K con enfoques donde interactúen otros factores como la erosividad de la lluvia, el factor topográfico o la humedad del suelo, como el usado en el modelo RUSLE (Römkens *et al.*, 1996).

En la Figura 4, se muestra la distribución espacial del factor LS. Esta figura indica que en la mayor parte de la cuenca el factor LS es menor que la unidad, excepto en las laderas de los cerros donde es mayor. Aún con lo pequeño de estos valores, es probable que se tenga alguna sobreestimación de este factor debido a que el componente longitud de la pendiente (L) se consideró uniforme a lo largo de cada píxel. De acuerdo con el concepto de L, debería identificarse el punto en que la pendiente decrece hasta que ocurre sedimentación o el escurrimiento entra a una red de drenaje, condición requerida para que la EUPS pueda mejorar la precisión del factor LS en el SIG (Dunn y Hickey, 1998; Hickey, 2000). Estos autores mencionaron también la importancia que tiene la distancia entre píxeles del modelo de elevación digital, recomendándose resoluciones altas, es decir, distancia entre píxeles cortas, en particular cuando se tiene pendientes cóncavas, pues las depresiones inducen grandes errores, además del error generado por el cambio de escala y el ajuste del área mínima cartografiable.

Los valores de los factores C y P, que se presentan en las Figuras 4 y 5, hacen referencia a condiciones puntuales de cobertura y manejo del suelo, así como a las prácticas de soporte, situación que se considera una

fuente de error potencial para el cálculo de la pérdida de suelo (Wischmeier, 1976). En el presente trabajo, no obstante que el porcentaje de cobertura del suelo (factor C) se obtuvo con el uso de imagen de satélite, se requiere un trabajo más detallado con esta herramienta para identificar con mayor precisión la distribución espacial de la cobertura y manejo del suelo, condición indispensable que se ha observado mejora la predicción de la erosión hídrica (Eiumnoh, 2000; Mati *et al.*, 2000), pues la agregación de píxeles en imágenes de satélite y modelos de elevación digital hacen que se pierda información respecto a la cantidad del objeto que representan; buscando además, mantener la misma resolución de las diferentes capas de información que se procesan en el SIG para disminuir el error de la imagen resultante (Zhang *et al.*, 2000).

Erosión Potencial

La erosión potencial del suelo constituida por los factores RKLS, se encuentra distribuida como se muestra en la Figura 6; el Cuadro 4 presenta el grado y la superficie con erosión.

La mayor superficie de la cuenca tiene una susceptibilidad moderada a la erosión (77.2%), 13.1% tiene alto potencial erosivo y sólo 9.6% de la superficie es menor que la erosión tolerable. Es notorio el efecto que tiene el factor LS mostrado en la Figura 3, con las áreas de alto potencial de erosión, por la semejanza que guardan las áreas de mayor LS. La erosión potencial es de suma importancia para encontrar los factores C y P, que pueden reducir la erosión a niveles tolerables (Wischmeier, 1976). También es un indicador de las áreas donde los factores RKLS promueven con mayor intensidad la pérdida de suelo.

Cuadro 4. Pérdida de suelo, superficie con erosión hídrica potencial (RKLS) y grado de erosión en la cuenca El Jihuite.

Pérdida de suelo t (ha año) ⁻¹	Superficie ha (%)	Grado de erosión hídrica
< 17.3	564 (9.63%)	No erosiva
17.3 – 123.5	4520 (77.23%)	Moderado potencial erosivo
> 123.5	769 (13.14%)	Alto potencial erosivo

Erosión Actual del Suelo

La distribución espacial de la erosión actual del suelo (RKLSCP) se muestra en la Figura 7 y la pérdida de suelo, superficie afectada y grado de erosión se muestran en el Cuadro 5.

En los terrenos donde la erosión actual calculada con EUPS no supera la erosión tolerable, se considera sin deterioro de este recurso. Para el presente caso, sólo 40.4% de la superficie tiene una condición libre de erosión, 42% del área tiene erosión moderada y más de 17.5% tiene alta erosión. Este tipo de resultados dan la oportunidad a quienes desarrollan planes para el manejo de recursos naturales, de proyectar los cambios e inclusive modelarlos y evaluar su impacto antes de implementarlos, como en el manejo y desarrollo agrícola sostenible (Bhan *et al.*, 2000), y la evaluación del riesgo de erosión para el manejo de cuencas (Singh *et al.*, 1992; Eiumnoh, 2000; Mati *et al.*, 2000). Para identificar la cobertura y práctica de manejo de suelo a implementarse con el objeto de disminuir la erosión actual a valores tolerables, Wischmeier y Smith (1978) sugirieron obtener el valor del factor C y/o P, considerando la proporción entre la erosión tolerable

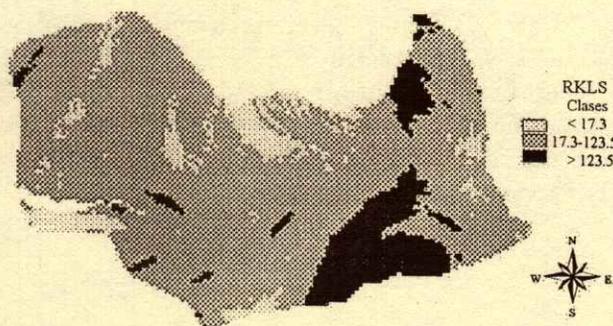


Figura 6. Distribución espacial de la erosión potencial (RKLS) de la cuenca El Jihuite.

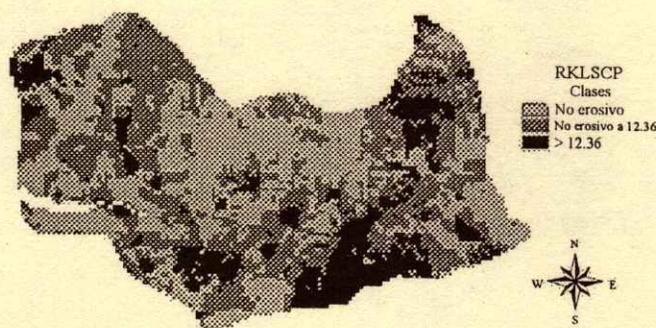


Figura 7. Distribución espacial de la erosión actual (RKLSCP) en la cuenca El Jihuite.

Cuadro 5. Pérdida de suelo, superficie con erosión hídrica ACTUAL (RKLSCP) y grado de erosión en la cuenca El Jihuite.

Pérdida de suelo t (ha año) ⁻¹	Superficie ha (%)	Grado de erosión hídrica
Menor a tolerante	2367 (40.43)	No erosiva
Menor a tolerante hasta 12.36	2459 (42.02)	Moderado potencial erosivo
> 12.36	1027 (17.55)	Alto potencial erosivo

y la erosión potencial. Mediante la modelación de cambios en los factores C y/o P, pueden identificarse los cambios de coberturas y prácticas de manejo o prácticas mecánicas pertinentes, que produzcan erosión debajo de la tolerable.

Erosión Tolerante del Suelo

La distribución espacial de la erosión hídrica tolerable del suelo se muestra en la Figura 8 y en el Cuadro 6 se presenta la superficie que ocupa en la cuenca el Jihuite.

El 8.54% de la superficie tiene menos de 2.2 t (ha año)⁻¹ de erosión tolerable, 37.76% permite una erosión de 2.2 a 4.5 t (ha año)⁻¹ y 53.69% del área tolera de 4.5 a 6.7 t (ha año)⁻¹. En el presente caso, la erosión tolerable es un reflejo de la profundidad del suelo, aspecto puramente físico y biológico de las tierras, pero que debería involucrar otros elementos de tipo social o económico. Al respecto, FAO (1993) propuso una metodología para la evaluación de la producción de cultivos en zonas agroecológicas, donde incluye a la erosión tolerable como un factor que reduce el rendimiento, considerando dicha reducción económicamente aceptable como una función de la

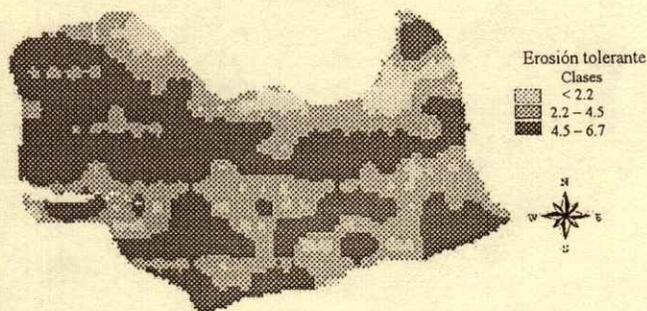


Figura 8. Distribución espacial de la erosión tolerable en la cuenca El Jihuite.

Cuadro 6. Superficie con erosión hídrica tolerable de acuerdo con la profundidad de las raíces en la cuenca El Jihuite.

Pérdida de suelo t (ha año) ⁻¹	Superficie ha (%)
< 2.2	500 (8.54)
2.2 - 4.5	2210 (37.77)
4.5 - 6.7	3142 (53.69)

pérdida total de la capa de suelo, la densidad aparente del suelo y el tiempo (en años) sobre el cual toma lugar la reducción.

En general, el procedimiento presentado demostró que es posible integrar modelos simples y puntuales como la EUPS a los SIG's, en particular cuando las variables del modelo pueden expresarse con funciones matemáticas o información a la que pueda darse una expresión espacial, donde la calidad del producto dependerá de la precisión de los datos utilizados. En el caso de la cuenca El Jihuite, la información requerida por la EUPS se tomó de parámetros medidos en ellas, muchos disponibles con expresión espacial, por lo que la estimación de la distribución de la erosión del suelo puede considerarse adecuada. Sin embargo, a escala nacional, regional o estatal, mucha de la información con las características antes mencionadas no está disponibles, con el consecuente demérito de la calidad del producto o limitada integración de la EUPS a un SIG.

En todo momento, debe considerarse que el modelo EUPS se concibió para estudios de erosión puntuales (escala de predio) y no debe cambiarse tal percepción, aún en un cambio de escala como es el de cuenca. En este caso, se mantuvo la concepción original al considerar cada píxel como un predio al que aplicó EUPS; sin embargo, faltan aspectos por mejorar en el cálculo de factores, pero lo importante es que se validó que EUPS es factible integrarla a un SIG con las ventajas de su simplicidad de aplicación y consecución de información fácilmente accesible e inclusive la posibilidad de calcular factores como K con la aplicación de modelos, cuando se dispone de la información pertinente.

CONCLUSIONES

-El procedimiento de integración de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) con factores expresados en imágenes tipo 'raster' y procesadas en un sistema de información geográfica, permitió la

estimación de pérdida de suelo a escala de cuenca hidrográfica.

- Es factible la modelación de la pérdida de suelo cuando los factores de EUPS sean funciones matemáticas o que puedan expresarse con valores en una imagen 'raster'.

- Se requiere mejorar el cálculo de factores como L de acuerdo con su concepción original para su aplicación en SIG, pues de otra manera es posible que sobreestime la erosión al considerar ésta con un valor mayor que el real, y al considerar procesos continuos cuando en realidad son puntuales.

- Aunque es factible la aplicación de EUPS en el SIG con resultados satisfactorios en pequeñas áreas como la cuenca El Jihuite, en muchas zonas de México puede ser limitada a causa de la poca disponibilidad de información; entre ellos están los datos de cantidad e intensidad de lluvia, la distribución de parámetros edáficos como la presentada en este trabajo, información local para factores como la erosionabilidad del suelo, cobertura del suelo y prácticas de manejo, que de contarse con registros y base de datos con esta información se mejoraría su desempeño de esta herramienta.

LITERATURA CITADA

- Alemán M., V., J.A. Martínez S., H.E. Flores L., P. Díaz M., H. Ramírez V. y K.F. Byerly M. 1996. Estudio socioeconómico de la cuenca El Jihuite. pp. 18-24. *In: Manejo integral de la cuenca agropecuaria y forestal El Jihuite. Publicación Especial 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Pacífico Centro-Campo Experimental Altos de Jalisco. Tepatlán, Jalisco, México.*
- Bhan, S.K., S.K. Saha, L.M. Pande y J. Prasad. 2000. Use of remote sensing and GIS technology in sustainable agriculture management and development. Indian Institute of Remote Sensing, NRSA. DEHRADUN, India. 10 pags. <http://www.itc.nl/suslup/thema5/617/617.pdf> (fecha de acceso: 23/03/02)
- Bocco V., G., J.L. Palacio P. y C.R. Valenzuela. 1991. Integración de la percepción remota y los sistemas de información geográfica. *Ciencia y Desarrollo* 17-97: 79-88.
- Brooks, K.N., P.F. Ffolliott, H.M. Gregersen y J.L. Thames. 1993. Hydrology and the management of watersheds. Cuarta reimpression. Iowa State University Press. Ames, Iowa.
- Burrough, P.A. y R.A. McDonnell. 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press. Nueva York.
- Chow, V.T., D.R. Maidment y L.W. Mays. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill. Bogotá, Colombia.
- Colotti B., E. 1998. Determinación de la energía cinética de la lluvia con datos horarios. Universidad Central de Venezuela. *Revista Terra*, 16(23): 55-72.
- Dunn, M. y R. Hickey. 1998. The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. *Cartography* 27: 9-15.
- Eiunnoh, A. 2000. Integration of geographic information systems (GIS) and satellite remote sensing (SRS) for watershed management. Asian Institute of Technology. Pathumthani, Thailand. <http://www.agnet.org/library/abstract/tb150.html> (fecha de acceso: 11/03/02)
- FAO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.
- FAO. 1993. Zonación agroecológica: Guía general. Boletín de suelos de la FAO 73. Roma, Italia.
- FAO. 1996. Agroecological assessment for national planning: The example of Kenya. FAO Soils bulletin 67. Roma, Italia.
- Figueroa S., B., A. Amante O., H.G. Cortés T., J. Pimentel L., E.S. Osuna C., J.M. Rodríguez O. y F.J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Colegio de Posgraduados. Salinas, San Luis Potosí, México.
- Flores L., H.E., J.A. Martínez S., H. Ramírez V., V. Alemán M., P. Díaz M., J.A. Ruiz C. y K.F. Byerly M. 1996. Diagnóstico agroclimático y edafológico de la cuenca El Jihuite. pp. 6-10. *In: Manejo integral de la cuenca agropecuaria y forestal El Jihuite. Publicación Especial 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Pacífico Centro-Campo Experimental Altos de Jalisco. Tepatlán, Jalisco, México.*
- Flores L., H.E., H. Ramírez V. y F.K. Byerly M. 2000. Diagnóstico del sistema de producción de maíz de temporal en la cuenca El Jihuite, México. *Bitácora Pecuaria* 2(2): 33-45.
- Foster, G.R., D.K. Meyer y C.A. Onstad, 1977. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Trans ASAE* 20(4): 683-687.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4a edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Heimlich, R.E. y N.L. Bills. 1984. An improved soil erosion classification for conservation policy. *J. Soil Water Conserv.* 39: 261-266.
- Hickey, R. 2000. Slope angle and slope length solutions for GIS. *Cartography* 29: 1-8.
- Hu, Q., C.J. Gantzer, P.K. Junk y B.L. Lee. 2000. Rainfall erosivity in the republic of Korea. *J. Soil Water Conserv.* 55: 115-120.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1999. Modelo de elevación de digital, escala 1:50 000. Cartas f13d57 y f13d58. CD-Rom. México, D.F.
- León A., R. y A. Aguilar S. 1987. Materia orgánica. pp. 85-91. *In: Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.*
- Mati, B.M., R.P.C. Morgan, F.N. Gichuki, J.N. Quinton, T.R. Brewer y H.P. Liniger. 2000. Assessment of erosion hazard with USLE and GIS: A case study of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya. *JAG* 2(1): 1-9. <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/iwe/documents/mati.pdf> (fecha de acceso: 23/03/02)
- Mitchell, J.K. y G.D. Bubenzer. 1980. Estimación de la pérdida de suelo. pp. 35-88. *In: Kirkby, M.J. y R.P.C. Morgan (eds.). Erosión de suelos. Limusa. México, D.F.*
- Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. 2a edición. Mundi-Prensa. Madrid, España.

- Osuna C., E.S. y F. Esquivel V. 1996. Cobertura vegetal y erosión del suelo en Aguascalientes. *Agricultura Técnica en México* 22(2): 127-144.
- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 2a edición. Mundi-Prensa. Bilbao, España.
- Renard, K.G., L.D. Meyer y G.R. Foster. 1996. Chapter 1. Introduction and history. pp. 1-18. *In: Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with revised universal soil erosion equation*. Agriculture Handbook 703. US Department of Agriculture-ARS. Tucson, AZ.
- Ríos B., J.D. y M.R. Martínez M. 1990. Efecto de la cobertura vegetal en el proceso erosivo. *Agrociencia, serie Agua-Suelo-Planta* 1: 61-73.
- Römkens, M.S.M., R.A. Young, R.A. Poesen, J.W.A. McCool, S.A. El-Swaify y J.M. Bradford. 1996. Chapter 3. Soil erodability factor (K). pp. 67-99. *In: Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with revised universal soil erosion equation*. Agriculture Handbook 703. US Department of Agriculture-ARS. Tucson, AZ.
- SARH-CP. Secretaría de Agricultura y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados. 1982. *Manual de Conservación del Suelo y del Agua*. 2a edición. Dirección General de Conservación del Suelo y Agua. Colegio de Postgraduados. México, D.F.
- Singh, G.R., R. Babu, P. Narain, L.S. Bhushan e I.P. Abrol. 1992. Soil erosion rates in India. *J. Soil Water Conserv.* 41: 97-99.
- TRAGSA. 1994. *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Ulsaker, L.G. y C.A. Onstad. 1984. Relating rainfall erosivity factors to soil loss in Kenya. *Soil Sci. Soc. Am.* 48: 891-896.
- USDA-SCS. 1990. *Soil erosion by water*. Agriculture information bulletin 513. US Department of Agriculture-Soil Conservation Service. Washington, DC.
- Van Remortel, R., M. Hamilton y R. Hickey. 2001. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. *Cartography* 30: 27-35.
- Wanielista, M., R. Kersten y R. Eaglin. 1997. *Hydrology: Water quantity and quality control*. 2a edición. John Wiley. New York.
- Williams, J.R., P.T. Dyke, W.W. Fuchs, V.W. Benson, O.W. Rice y E.D. Taylor. 1990. *EPIC-- Erosion/Productivity Impact Calculator: 2 User manual*. Sharpley, A.N. y J.R. Williams (eds). Technical Bulletin 1768. US Department of Agriculture. Temple, TX.
- Wischmeier, W.H. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 31: 5-9.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook 537. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Yoder, D.C., J.P. Porter, J.M. Lallen, J.R. Simanton, K.G. Renard, D.K. McCool y G.R. Foster. 1996. Chapter 5. Cover - management factor (C). pp. 145-182. *In: Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with revised universal soil erosion equation*. Agriculture Handbook 703. US Department of Agriculture-ARS. Tucson, AZ.
- Zhang, X., N.A. Drake y J. Wainwright. 2000. Scaling issues in environmental modelling. pp. 1-28. *In: Wainwright, J. y M. Mulligan (eds.) Environmental modeling: Finding simplicity in complexity*. John Wiley. Chichester, UK.

CONOCIMIENTO LOCAL DE PEQUEÑOS PRODUCTORES SOBRE LA EROSIÓN DEL SUELO EN EL EJIDO EL TOMATAL, GUERRERO, MÉXICO

Indigenous Knowledge About Soil Erosion Among Small Farmers at El Tomatal, Guerrero, Mexico

Ricardo González Mateos¹, Carlos A. Ortiz Solorio², Víctor Volke Haller², Jesús González Ríos² y Fernando Manzo Ramos³

RESUMEN

En México, no existen estudios de erosión del suelo con base en el conocimiento local, lo cual es justificación para el presente estudio, con el objetivo de comparar los resultados de las evaluaciones de la erosión del suelo que resultan del conocimiento local de los productores y del método de Morgan usado por los técnicos. La evaluación de la erosión del suelo mediante el conocimiento local se realizó a partir de información de los productores, sobre sus clases de tierras y erosión, y para la evaluación técnica se siguió la metodología de Morgan, estratificando previamente el ambiente con base en el levantamiento fisiográfico. Los resultados indican que los productores cuentan con un conocimiento sobre la erosión del suelo, de tal modo que reconocen sus clases, las causas que la originan y su ubicación geográfica, y utilizan un término genérico para referirse a la erosión como "deslave de tierras", diferenciando cuatro clases: Acabadas, Deslavadas, poco Deslavadas y sin Deslave, mismas que se asocian con las clases de tierras definidas por ellos: Loma y Tepetate, Negra, Lama y Barro, respectivamente. Por su parte, para la clasificación técnica, se identificaron diez facetas con seis clases de erosión, agrupadas éstas arbitrariamente en cuatro grados: Muy Alta, Alta, Moderada y Ligera. Finalmente, los mapas elaborados con base en el conocimiento local y mediante el conocimiento técnico son ligeramente diferentes en superficie, pero similares en localización, además, hay correspondencia entre los conceptos técnicos y del productor, por ejemplo, las "Tierras sin Deslave" corresponden a la clase de erosión Ligera, las Tierras

poco Deslavadas a la clase de erosión Moderada, las Tierras Deslavadas a la clase de erosión Alta y las Tierras Acabadas a la clase de erosión Muy Alta.

Palabras clave: Clases de tierras campesinas, regionalización, método de Morgan.

SUMMARY

In Mexico, there are no studies dealing with farmers' knowledge of the use and degradation of their natural resources. Due to this fact, a study was designed to assess the understanding and perception farmers have about the erosion affecting their farm land, to assess the degree of erosion following the Morgan method, and to compare the results from both evaluations. Results indicated that farmers have accumulated a great deal of knowledge about their land and its types, as well as, the causes, forms, and geographic location of soil erosion. They identify soil erosion as "deslave de la tierra", which considers four types: **Tierra Acabada**, **Tierra Deslavada**, **Tierra poco Deslavada**, and **Tierra sin Deslave**. These types were related to the land classes: **Loma** and **Tepetate**, **Negra**, **Lama**, and **Barro**, respectively. According to the Morgan method, ten facets were identified, with six classes of erosion, grouped arbitrarily into four categories: **Very High**, **High**, **Moderate**, and **Light**. Finally, when maps created from indigenous and technical knowledge methods were compared, both maps were very similar, with the exception of the erosion type "**Tierra sin Deslave**" and the erosion category **Light**. When erosion categories were compared to erosion classes only small discrepancies in the amount of land and geographic location were identified. As a consequence, **Tierras sin Deslave** corresponded to **Light** erosion, **Tierras poco Deslavadas** to **Moderate** erosion, **Tierras Deslavadas** to **High** erosion, and **Tierras Acabadas** to **Very High** erosion.

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Autónoma de Guerrero. 40020 Iguala, Guerrero, México.

[†] (rgonzalezm@yahoo.com.mx)

² Instituto de Recursos Naturales, ³ Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México.

Index words: Peasant land classes, regionalization, Morgan method.

INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de la tierra agrícola, la tala inmoderada de los bosques y el sobrepastoreo están destruyendo, en forma alarmante, el recurso suelo (Ortiz, 1999), de manera que cada año desaparecen áreas agrícolas, bosques, praderas y humedales y los desiertos avanzan a una velocidad significativa en las partes secas de cada continente (Miller, 1999). La superficie mundial afectada por la degradación de los suelos es de alrededor de 28% (Oldeman *et al.*, 1991), lo que repercute negativamente en los rendimientos agrícolas, pecuarios y forestales, y causa una pérdida de la diversidad biológica (Anaya, 1998). Uno de los principales procesos de degradación lo constituye la erosión hídrica y eólica, que en el mundo afecta alrededor de 80% de la superficie agrícola (Pimentel y Kounang, 1998; Napier *et al.*, 2000), sin embargo, la erosión se presenta también en zonas ganaderas y boscosas. En México, se estima que alrededor de 83% de su superficie está afectada por algún grado de erosión (FAO, 1994; Ortiz *et al.*, 1994; INEGI, 1997).

La erosión del suelo es un fenómeno complejo, cuyo proceso comprende el desprendimiento y transporte de partículas simples por medio del agua o viento, así como su depositación en otros sitios (Morgan, 1997; Porta *et al.*, 1999), en el cual intervienen las características del suelo, las fuerzas erosivas del agua y del viento, la cobertura vegetal que protege al suelo, y el uso y el manejo de los ecosistemas y agroecosistemas por el hombre (Blaikie, 1985; Miller, 1999).

Tradicionalmente, la erosión se ha cuantificado desde un punto de vista físico, sin considerar los aspectos sociales, económicos y culturales que intervienen en la misma (Suarez, 1980), los cuales, en muchos casos, tienen gran importancia. Estos aspectos, según la FAO (1983), son: 1) presión demográfica, 2) tenencia de la tierra, 3) dificultad para admitir innovaciones, y 4) ingresos insuficientes en las actividades primarias. Veihe (2000) consideró aspectos adicionales como: 1) falta de información técnica, 2) escasez de recursos económicos para las prácticas de conservación del suelo, 3) asesoría técnica deficiente, y 4) prácticas de agricultura de subsistencia.

Estos aspectos sociales, económicos y culturales, a pesar de ser muy amplios, no consideran de manera

directa la opinión de los habitantes de las zonas afectadas, tanto en la percepción del fenómeno y sus causas, como en la participación de la solución del problema (Porta *et al.*, 1999), lo cual es importante por la estrecha relación que ellos tienen con su entorno ecológico y su uso y conservación (Mitchel, 1999).

Los productores de agricultura tradicional han desarrollado sistemas de clasificación de sus tierras basados en su conocimiento y experiencias locales, mismas que son comparables a escala local con los sistemas formales de clasificación de suelos, y pueden ser de utilidad para la planeación y el desarrollo de programas orientados al aprovechamiento adecuado de los recursos naturales (Ortiz, 1992); en ellos se mencionan también algunos aspectos de degradación de suelos, como los causados por la erosión.

El conocimiento local trata de explicar la percepción del productor sobre el fenómeno de la erosión del suelo. Cartier (1997) definió el término "erosión" del conocimiento local como un modelo construido a partir de la percepción del productor en equivalencia con la observación del conocimiento científico. Por su parte, Kiome y Stocking (1995) señalaron que los productores describen los daños causados por el proceso erosivo, los que según Veihe (2000) pueden referirse a reducción de nutrientes, declinación de la fertilidad del suelo y pérdida de la capacidad productiva de la tierra.

Estudios realizados en África por diferentes investigadores reportan que puede existir una gran diferencia entre los conocimientos local y técnico sobre el fenómeno de la erosión del suelo. En efecto, los técnicos perciben a la erosión como un problema, sin embargo, no entienden en su cabalidad sus causas y cuestionan a los agricultores de incapaces para controlar tal situación y, por otro lado, los agricultores perciben el problema y sus causas pero pueden desconocer qué acciones tomar para combatir los efectos de la erosión (Cartier y De Graaff, 1998). Sin embargo, también debe reconocerse que diversas comunidades desarrollan prácticas de conservación del suelo y agua como, por ejemplo, piedras acomodadas y represas filtrantes para retener el agua y reducir la erosión (Mazzucato y Niemeijer, 2000), terrazas en laderas para romper los flujos del escurrimiento superficial, reducir la inclinación de la pendiente del terreno y conservar la humedad del suelo (Medina y Natividad, 1998), y más recientemente han puesto atención en prácticas agronómicas y biológicas (Barrera-Bassols y Zinck,

2000). En estos términos, el conocimiento que los productores poseen puede permitir entender los procesos y las causas (WinklerPrins, 2001), y, por lo tanto, integrarse al conocimiento técnico para establecer estrategias de solución al fenómeno de la erosión.

Por otra parte, muchas de las prácticas mecánicas desarrolladas técnicamente en diferentes partes del mundo han fracasado (Mazzucato y Niemeijer, 2000), por razones entre otras, por el desconocimiento de la población local de los programas de conservación del suelo y agua, además, sus experiencias no son consideradas en el diseño y desarrollo de los proyectos, por lo que las obras quedan abandonadas e incluso destruidas por la misma gente (Ayers, 1995).

En México, a partir de la década de los 80, se inició la investigación en etnoedafología (Ortiz, 1999), referida ésta al estudio de la taxonomía campesina de suelos basada en el conocimiento del productor, encontrándose que las clasificaciones desarrolladas son comparables a escala local con sistemas formales de clasificación de suelos, y son de utilidad para planificar y realizar programas orientados al aprovechamiento adecuado de los recursos naturales. Sin embargo, aún falta esquematizar el conocimiento local del fenómeno de la erosión del suelo, que sería de gran importancia para los programas de conservación del suelo y agua desarrollados por instituciones oficiales de los gobiernos federal, estatal y municipal.

En el estado de Guerrero, la erosión es uno de los principales procesos de degradación del suelo, y alrededor de 50% de la superficie estatal (aproximadamente 3 214 100 ha) presenta algún grado de erosión (INEGI, 1997), lo cual, en mayor o menor medida, resulta válido también para el área del ejido de El Tomatal, en el municipio de Iguala de la Independencia.

La presente investigación se realizó en el ejido de El Tomatal, municipio de Iguala de la Independencia, Guerrero, con los objetivos de comparar la evaluación de la erosión del suelo mediante el conocimiento local de los productores y el conocimiento técnico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

El ejido El Tomatal se ubica en el municipio de Iguala de la Independencia, Guerrero, geográficamente se localiza entre 18° 17' 44" y 18° 20' 09" N y

99° 28' 15" y 99° 30' 07" O; tiene una superficie de 1069 ha y una altitud que varía de 780 a 880 m.

La geomorfología de la zona está constituida por un patrón de lomeríos asociados con valles, barrancas, cárcavas y pequeñas planicies aluviales. El material geológico dominante corresponde a rocas sedimentarias del tipo arenisca-conglomerado. Las unidades de suelos reportadas como dominantes son: Regosoles, Kastañozems, Luvisoles y Cambisoles (CETENAL, 1976). El clima es un Aw₀(w)(i')g, que corresponde al más seco de los cálidos subhúmedos (García, 1988), con temperatura media anual de 25.5 °C y precipitación media anual de 1017 mm, y un régimen de lluvias en verano y presencia de sequía intraestival de mediados de julio a mediados de agosto. La vegetación dominante es matorral espinoso fuertemente perturbado, compuesta por especies como: espino prieto (*Pithecellobium acatense*), espino o cubata (*Acacia cochliacantha*), uña de gato o garabatlillo (*Acacia cymbispina*), tehuixtle (*Acacia bilimekii*) y huizache (*Acacia farnesiana*), asociado con pastos nativos.

El sistema agrícola se desarrolló a partir de la tala y quema de la vegetación nativa para cultivar maíz y maíz-calabaza y el pastoreo. Sin embargo, este uso del suelo sin prácticas de conservación del suelo y agua desencadenó un proceso erosivo. El INEGI (1994a) reportó 164 ha con cárcavas, arroyos y barrancas, que han modificado el paisaje natural y cambiado la forma de las parcelas a rectángulos estrechos y extendidos a favor de la pendiente.

El sistema pecuario comprende la crianza de ganado bovino y caprino; el primero se empleó también en las actividades agrícolas y forma parte del patrimonio familiar. Su manejo fue tradicional con pastoreo libre, pero sobrepasando la capacidad de carga de los terrenos y degradando la cubierta vegetal, lo que contribuyó al proceso erosivo del suelo.

El sistema forestal es considerado por los agricultores como una actividad complementaria dedicada principalmente a extraer leña para energía de los hogares y como medio para aumentar los ingresos por la venta de la misma, lo cual degradó aun más tanto la cubierta vegetal, como el suelo.

Metodología

La metodología empleada para la realización del presente estudio constó de tres etapas: 1) evaluación del conocimiento local sobre la erosión del suelo;

- 2) evaluación técnica de la erosión del suelo; y
- 3) comparación de ambas evaluaciones.

La evaluación del conocimiento local de la erosión se realizó en tres fases:

1) Evolución del uso de la tierra. Se refiere a los cambios de uso que sufrió la tierra y su efecto sobre la erosión del suelo, según información de los pobladores, desde el origen del ejido hasta la actualidad, para lo cual se empleó la técnica de grupo de discusión. Se integraron dos grupos de cinco productores cada uno (hombres y mujeres mayores de 60 años de edad), seleccionados por su experiencia acumulada en las actividades agropecuarias y forestales. La narración y discusión que los participantes hicieron de la evolución del uso de la tierra se grabaron y transcribieron para su análisis posterior.

2) Encuestas sobre el conocimiento local de la erosión y propuestas de solución. Una vez conocido el problema de erosión del suelo desde la perspectiva histórica, se elaboró un cuestionario con preguntas cerradas, que se aplicó a 30 productores, quienes representan más de 50% del total de agricultores. Estos productores no participaron en los grupos de discusión y se seleccionaron al azar. Las preguntas del cuestionario versaron sobre la erosión y sus causas, consecuencias y estrategias de solución.

3) Ubicación geográfica del conocimiento local de la erosión. Para ubicar geográficamente al conocimiento local sobre erosión, se decidió utilizar como marco de referencia geográfico al mapa de clases de tierras del ejido, elaborado con la metodología de Ortiz *et al.* (1990). Acto seguido, se consultó a los productores,

quienes, con base en un álbum fotográfico, ubicaron en el campo los diferentes grados de erosión; además, para facilitar la comunicación con los técnicos, se registraron sus nombres locales y se realizó finalmente la cartografía de la erosión del suelo desde la perspectiva del conocimiento local.

La evaluación técnica de la erosión se realizó en dos fases:

1) Realización del levantamiento fisiográfico. Con fines de estratificar el ambiente, se siguió la metodología del levantamiento fisiográfico (Ortiz y Cuanalo, 1984), llegándose a escala de la unidad de faceta.

2) Evaluación de la erosión. Una vez elaborado el levantamiento fisiográfico, para evaluar la erosión del suelo se usó la metodología de Morgan (1997), la cual comprende siete clases codificadas de erosión (Cuadro 1). En cada faceta se realizaron muestreos al azar en cuadros de tres tamaños de superficies: de 1 m² para costras y residuos sobre el suelo, de 10 m² para áreas con cobertura de matorral, y de 100 m² para cobertura arbórea, frecuencia de canalillos y cárcavas. El número de sitios de muestreo dependió de la severidad, el grado y la forma del proceso, variando de dos a seis por faceta.

Para la comparación de las evaluaciones de la erosión del suelo basadas en el conocimiento local y en el conocimiento técnico, se procedió a comparar la terminología, los conceptos y las definiciones empleadas y se compararon los mapas obtenidos para establecer sus semejanzas y diferencias, a la vez que se comparó el efecto de disminución del rendimiento

Cuadro 1. Clases codificadas de erosión del suelo, según el método de Morgan (Morgan, 1997).

Clase	Indicador de campo
0	Raíces de árboles no expuestos; sin costra superficial, ni pedestales por salpicadura; más de 70% con cobertura vegetal.
½	Ligera exposición de raíces de árboles; poca costra superficial; sin pedestales por salpicadura; nivel del suelo ligeramente más elevado pendiente arriba o a barlovento de las plantas y rocas; cobertura vegetal de 30 a 70%.
1	Exposición de raíces de árboles; formación de pedestales por salpicadura, montículos de suelo cubiertos con vegetación; profundidades de 1 a 10 mm; ligera costra superficial; cubierta vegetal de 30 a 70%.
2	Exposición de raíces de árboles; pedestales por salpicadura y montículos de suelo de 1 a 5 cm; costra superficial; cubierta vegetal de 30 a 70%.
3	Exposición de raíces de árboles; pedestales por salpicadura y montículos de suelo a profundidad de 5 a 10 cm; costra superficial de 2 a 5 mm; hierbas sucias y enlodadas por arrastre hacia la parte baja de la pendiente; arrastre de materiales gruesos por el agua y el viento; cobertura vegetal menor que 30%.
4	Exposición de raíces de árboles, pedestales por salpicadura y montículos de suelo de 5 a 10 cm de profundidad; arrastre de materiales gruesos; canalillos hasta de 8 cm de profundidad; suelo desnudo.
5	Cárcavas: canalillos mayores que 8 cm de profundidad; arrastre por el agua; suelo desnudo.

de maíz por clase de erosión para los sistemas del conocimiento local y de Morgan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del Conocimiento Local de la Erosión del Suelo

De acuerdo con el grupo de discusión y los archivos que existen en la comisaría ejidal de El Tomatal, municipio de Iguala, Guerrero, se pudo establecer que el ejido se constituyó el 29 de septiembre de 1921, con la repartición de 1044 ha, que pertenecían a una sola persona.

El 75% de la tierra dotada al ejido es de ladera con pendientes de 8 a 20%, y 18% de terrenos ligeramente planos, con pendientes de 2 a 8%; su uso ha sido forestal y pecuario en las áreas de ladera y agrícola en las áreas de menores pendientes.

Los productores indicaron que la tierra se asignó en dos parcelas de 3 a 5 ha por ejidatario, dependiendo ello de la calidad de la tierra, y ubicadas en diferentes sitios y distancias de la comunidad. El uso predominante de la tierra ha sido el sistema de "año y vez", que consiste en sembrar en una parcela un cultivo en un año y en el siguiente dejarla en descanso con fines de agostadero, y de manera alternada con la otra parcela.

De acuerdo con los productores, las diferentes etapas en la evolución del uso de la tierra fueron: de 1921 a 1930, consolidación del ejido; de 1930 a 1950, toda la tierra desmontada se cultivó; de 1950 a 1970, las parcelas mostraron problemas de erosión, con presencia de "zanjas", disminución de rendimientos; a partir de 1970, la agricultura dejó de ser rentable; en 1975, se inició la migración de la población como respuesta al bajo ingreso de las actividades agrícolas; de 1975 a 1980, el campo tendió a quedar abandonado, a pesar de que a partir de 1975 se inició el uso de maquinaria agrícola, semilla mejorada y fertilizantes químicos, con lo cual aparentemente se incrementaron los rendimientos, pero la roturación de la tierra a favor de la pendiente contribuyó a acelerar y aumentar el proceso erosivo. En la actualidad, sólo se cultiva 20% de la tierra ejidal.

En un principio, el sistema agrícola usado era muy parecido al sistema de roza-tumba-quema, en donde una vez eliminada la cubierta vegetal, la tierra se roturaba con arado de madera y tracción animal, posteriormente éste fue sustituido por el "polko" (arado de hierro), y más adelante por maquinaria

mecanizada. El principal cultivo fue el maíz asociado con calabaza, utilizándose semilla criolla y fertilización orgánica basada en estiércoles (abono de corral), y se obtenían rendimientos altos. En la actualidad, más de 80% de los productores que aún cultivan la tierra, usan semilla de maíz mejorado, fertilizantes químicos, maquinaria agrícola, plaguicidas y herbicidas (INEGI, 1994b), pero se obtienen rendimientos medios.

En los suelos agrícolas, sobre todo aquéllos con pendiente, no se consideraron prácticas de conservación del suelo y agua, lo que dio lugar a diversos grados de erosión del suelo, hasta llegar a la presencia de cárcavas, perdiéndose su potencial agrícola y pecuario.

La ganadería es una actividad que, aunque complementaria, se realizó con base en un elevado número de cabezas de ganado bovino, con propósitos de su utilización en las actividades agrícolas y de patrimonio familiar, y de ganado caprino para autoconsumo e ingresos económicos por la venta del mismo. El desarrollo de esta actividad se ha realizado mediante pastoreo directo, que ha redundado en un sobrepastoreo y degradación de los sistemas de agostadero y erosión del suelo.

El bosque estuvo sujeto a explotación con fines de extracción de madera para construcción de casas y corrales, y de leña para consumo doméstico y venta de la misma. En el caso de la leña, para 1960, 80% de la población del municipio de Iguala dependía de ella, y de algo de carbón vegetal, como fuente de energía; en 1990, ello se redujo a 24% (Zavala, 1996), debido a la utilización de petróleo y gas doméstico. Todo esto implicó una destrucción del bosque, de manera que en la actualidad la cubierta vegetal cubre 25% del área, estando dominada por matorral espinoso muy perturbado.

En estos términos, el uso agrícola de la tierra con pendientes sin la utilización de prácticas de conservación, el sobrepastoreo de los suelos con pastizales y la deforestación del bosque, causaron erosión del suelo, reconociéndose erosión desde laminar hasta de zanjas en amplias áreas de la superficie ejidal, con la consiguiente disminución del rendimiento de los cultivos y de los agostaderos, y producción, así como mayor migración de la población rural a las ciudades y al extranjero.

Después de conocer la evolución de los usos de la tierra, se captó el conocimiento de los productores sobre las formas de erosión del suelo y las causas que la originaron. Estas formas de erosión se expresan en

un lenguaje técnico como: costras, laminar, surcos y cárcavas; las principales causas que las originaron y sus frecuencias de respuesta, se presentan en el Cuadro 2. Los productores distinguen estas cuatro formas, siendo la de surcos la más frecuente y la de costras la menos frecuente.

Las costras son capas delgadas de suelo de 2 a 5 mm de espesor, quebradizas y duras (Figura 1); los productores manifestaron que su presencia está relacionada con el salitre, aunque también es común encontrarlas en laderas con tepetate, es decir, en suelos desnudos. La erosión laminar es la remoción uniforme y gradual de suelo superficial por acción del agua, sin formar "zanjas" o cárcavas (Figura 2). La erosión en surcos, es la remoción y pérdida del suelo superficial en pequeños canales por acción del agua. Las cárcavas corresponden a profundas excavaciones en el suelo, derivadas de las corrientes de agua que se encuentran en ellas, y que arrastran el material sólido en suspensión (Figura 3).

Por otra parte, los productores reconocen cinco causas que han originado la erosión del suelo, siendo la más importante el uso de maquinaria, seguida de la lluvia, la ausencia de prácticas de conservación del suelo, la extracción de leña y, en último término, el pastoreo.

Cuadro 2. Formas de erosión del suelo y las frecuencias de respuestas de las causas que las originaron en el ejido El Tomatal, municipio de Iguala, Guerrero.

Forma de erosión	Frecuencias de respuesta de las causas que originaron la erosión del suelo						Total	Porcentaje
	Maquinaria agrícola	Lluvia	Ausencia de prácticas de conservación del suelo	Extracción de leña	Pastoreo			
Costras	3	3	2	1	0	9	7	
Laminar	18	9	9	2	1	39	32	
Surcos	18	12	7	6	4	47	39	
Cárcavas	10	11	1	4	0	26	22	
Total	49	35	19	13	5	121		
Porcentaje	40	29	16	11	4		100	

En relación con las formas de erosión del suelo y sus efectos, los productores perciben distintos efectos, según se muestra en el Cuadro 3. Éstas son desde físicas, como la pérdida de suelo (Figura 4), el afloramiento de tepetate (Figura 5) y la presencia de suelos esqueléticos (Figura 6), hasta la disminución de la fertilidad del suelo, en relación con la pérdida de materia orgánica, de nutrientes y, finalmente, de la productividad, a la vez que también señalan la escasez de leña como otros de los efectos.

La baja fertilidad de las tierras es reconocida por los productores como "tierras acabadas", "viles" o "muertas" que no tienen ninguna capacidad para producir plantas (Figura 6), mientras que la "tierra buena" desarrolla diferentes especies de malezas, localmente denominadas "jegüite", "zacate" o "acahual", de ciclo vegetativo anual, con flores amarillas parecidas al girasol, que son indicadores de tierra fértil.

Con fines de conocer las denominaciones locales de las formas de erosión en el campo, se mostró a los productores un álbum fotográfico de las formas técnicas de erosión identificadas, obteniéndose la siguiente equivalencia entre ambas denominaciones:

Cuadro 3. Efecto de las formas de erosión sobre el suelo en el ejido El Tomatal, municipio de Iguala, Guerrero.

Formas de erosión	Efectos sobre el suelo						
	Suelos esqueléticos	Pérdida de suelo	Afloramiento de tepetate	Pérdida de MO [†]	Pérdida de nutrientes	Baja producción	Escasez de leña
Costras	x	x	x	x	x		x
Laminar	x	x	x	x	x	x	x
Surcos	x	x	x	x	x	x	x
Cárcavas	x	x	x	x	x		x

[†] MO = materia orgánica.



Figura 1. Formación de costra, localmente denominada "chicharrón".

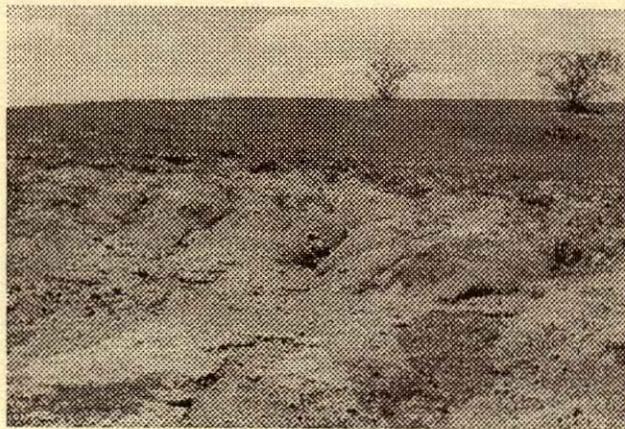


Figura 2. Erosión laminar, localmente denominada "escalones", asociada con erosión en surcos conocidos como "zanjas".

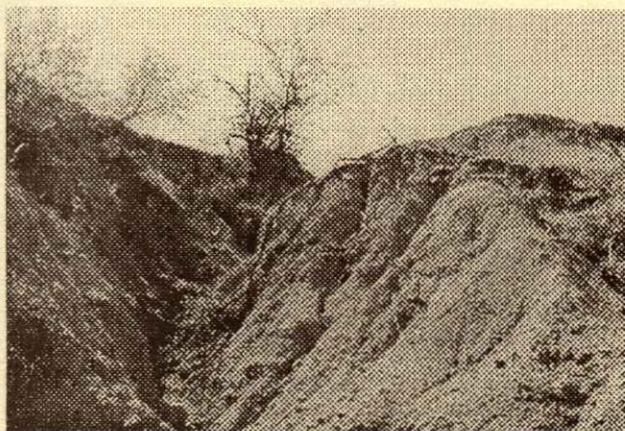


Figura 3. Erosión en cárcavas, localmente denominada "barranca" o "cantil".



Figura 4. Pérdida de suelo, da origen a "Tierras Acabadas", por naturaleza son improductivas e inservibles y están abandonadas.



Figura 5. Tepetate con pasto poco desarrollado.

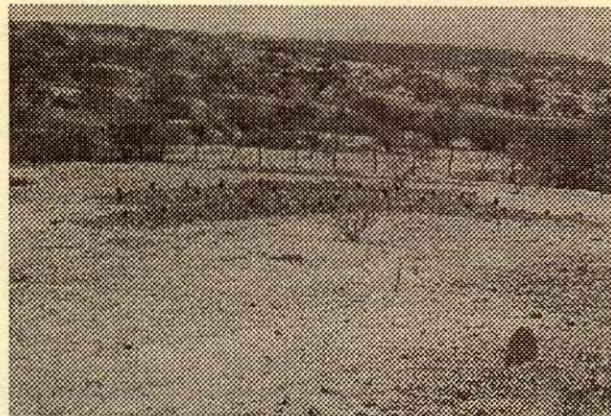


Figura 6. Presencia de suelos esqueléticos, origina tierras "pelonas", "viles" o "quemadas", tienen poca capacidad para producir plantas.

Formas de erosión:

Denominación técnica	Denominación local
Costras	"Chicharrón"
Laminar	"Escalones"
Surcos	"Zanjas"
Cárcavas	"Barrancas" o "Cantiles"

El término genérico empleado por los productores para referirse a la erosión del suelo y calidad de la tierra es el de "deslave de tierra" y "tierras acabadas", considerando las clases siguientes: Tierras sin Deslave, que corresponden a suelos con erosión de Nula a Ligera, con uso agrícola; Tierras poco Deslavadas, que corresponden a suelos con erosión Moderada, con uso agrícola; Tierras Deslavadas, que corresponden a suelos con erosión Severa, sin uso agrícola; y, Tierras Acabadas, que corresponden a suelos con erosión muy severa, improductivas e inservibles, sin uso agrícola.

El productor define al "deslave de tierras" como: "el arrastre de la tierra por acción de la lluvia y su depositación en otros sitios", y, a las "tierras acabadas", como las "tierras que presentan serias destrucciones y abandono". Estas definiciones coinciden con lo señalado por Kiome y Stocking (1995), Cartier (1997) y Veihe (2000), en relación con la percepción que los productores tienen del fenómeno de la erosión y sus efectos.

Sobre las estrategias de solución se detectaron varias prácticas de conservación utilizadas por los productores, como, por ejemplo, a las acequias de ladera, localmente conocidas como "guarda rayas", que consiste de una zanja que es construida arriba de la parcela para encausar el agua a las "barranquitas", que con el tiempo pueden transformarse en "barrancas" y "cantiles", intransitables para el hombre y los animales. Otra práctica usada para detener el avance de las "zanjas" entre las parcelas son las "estacas y ramas verdes", que permiten retener al suelo. También se mencionaron a los "tecorrales de piedras acomodadas" para formar terrazas, los costales con arena para detener la erosión en surcos, y los surcos al contorno, localmente denominados "caracol" o "caracoleado", para disminuir la velocidad del agua y conservar la humedad del suelo. Los tecorrales de piedras pueden ser similares a las piedras acomodadas, reportadas por Mazzucato y Niemeijer (2000).

Cuadro 4. Clasificación campesina de tierras para el ejido El Tomatal, Iguala, Guerrero.

Clases campesinas de tierras	Superficie ha	Porcentaje
Loma	592	55
Negra	179	17
Barro	106	10
Lama	91	8
Tepetate	32	3
Zona urbana	70	7
Total	1070	100

Para ubicar geográficamente la erosión del suelo según el conocimiento local, primeramente se realizó la cartografía de clases de tierras campesinas (Cuadro 4).

Los productores reconocen cinco clases de tierra: Loma, con la mayor superficie (55%), Negra (17%), Barro (11%), Lama (8%) y Tepetate (3%). De ellas, las clases Loma, Negra y Tepetate, que ocupan 75% de la superficie ejidal, se encuentran localizadas en laderas, y las clases Barro y Lama se ubican en pequeñas áreas planas y riberas de arroyos.

Los productores manifestaron que las tierras tienen diferentes calidades, que de mayor a menor se ordenan como: Barro, Lama y Loma, y la Negra y el Tepetate no tienen uso agrícola.

En el Cuadro 5, se muestra la relación entre las clases campesinas de tierras y las formas de erosión, observándose que ellas presentan diferentes formas, excepto la clase de barro, el cual no manifiesta signos de erosión.

Por otra parte, en el Cuadro 6, se presenta la relación entre las clases campesinas de tierras y la clase de erosión con la terminología local del "Deslave de Tierras", y superficie que ocupan; en la Figura 7, se muestra la ubicación de ellas.

Cuadro 5. Forma de erosión del suelo por clase de tierra en el ejido El Tomatal, municipio de Iguala, Guerrero.

Nombre técnico	Clases de tierras				
	Loma	Tepetate	Negra	Lama	Barro
Costras	x	x			
Laminar	x			x	
Surcos	x	x	x	x	
Cárcavas	x	x	x		

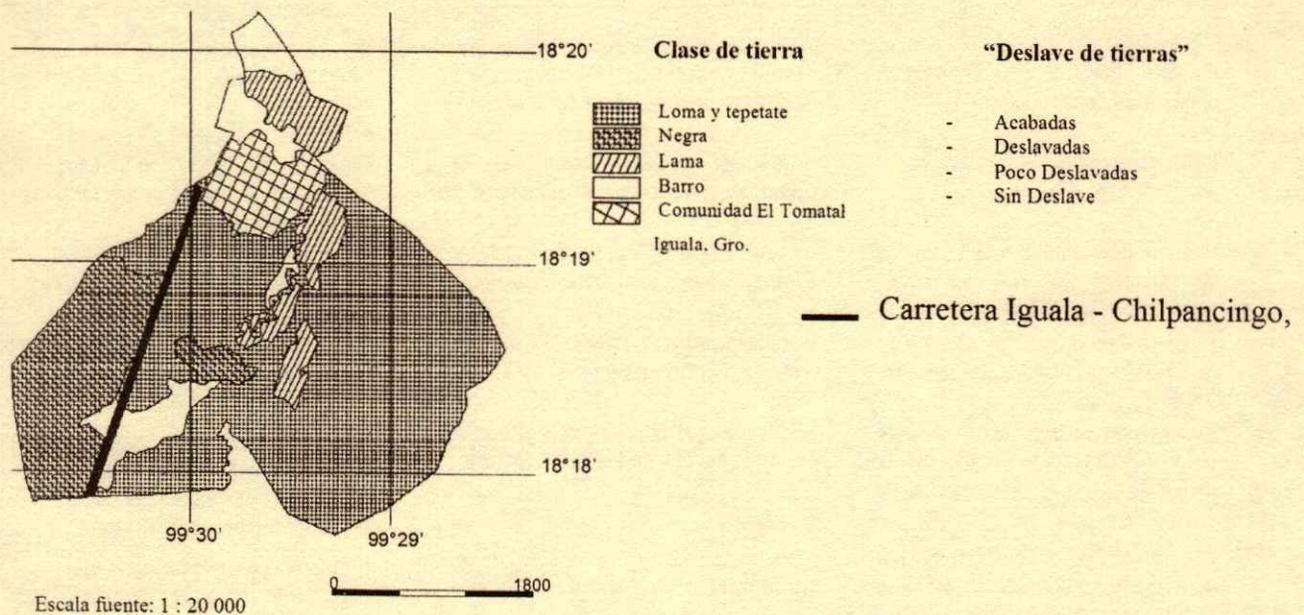


Figura 7. Mapa de clases de deslave de tierras

Cuadro 6. Clase de “deslave de las tierras” por clase campesina de tierra, con su superficie y porcentaje, para el ejido de El Tomatal, municipio de Iguala, Guerrero.

Clase de deslave de las tierras	Clases de tierras					Superficie	Porcentaje
	Loma	Tepetate	Negra	Lama	Barro		
Tierras acabadas	x	x				624	58
Tierras deslavadas			x			179	17
Tierras poco deslavadas				x		91	8
Tierras sin deslave					x	106	10

Evaluación Técnica de la Erosión del Suelo

La estratificación del ambiente mediante el levantamiento fisiográfico, a escala de Faceta, se describe en el Cuadro 7.

Se identificaron 10 Facetas: cuatro presentan pendientes de 2 a 8%, con suelos profundos (más de 90 cm), con un uso agrícola; y seis presentan pendientes de 8 a 25%, con suelos someros (profundidad de 10 a 30 cm), con un uso pecuario y forestal.

Con base en el mapa de Facetas, se evaluó la erosión mediante el método de Morgan, considerando

los indicadores de exposición de las raíces de los árboles, presencia de costras en la superficie del suelo, formación de pedestales y montículos por salpicadura y cobertura vegetal, lo que finalmente permitió definir las clases en términos de la magnitud y la severidad del proceso erosivo por Faceta (Cuadro 8).

Se identificaron seis clases codificadas de erosión, siendo la más abundante la Clase 5 y la menos frecuente la Clase 0.5 (Cuadro 9).

Las clases codificadas de erosión con el método de Morgan (1997) se agruparon arbitrariamente en cuatro categorías, para utilizar la nomenclatura de grados de erosión propuesta por la FAO (1980), con

Cuadro 7. Descripción de Facetas del ejido El Tomatal, municipio de Iguala, Guerrero.

Faceta	Forma del relieve	Suelos	Uso actual
1	Planicie ligeramente ondulada, con pendientes de 2 a 8%	Suelos profundos (> 90 cm), textura arcillosa, medios en materia orgánica	Matorral espinoso, con una cobertura compacta de 75 a 90%, sobrepastoreo y extracción de leña
2	Ladera ligeramente ondulada con pendientes de 2 a 8%	Suelos profundos (> 90 cm), textura arcillosa, pobres en materia orgánica	Cobertura compacta con herbáceas de 75 a 100%, sobrepastoreo y cultivos anuales de maíz y sorgo
3	Planicie ligeramente ondulada asociada con causes, de material transportado, con pendientes de 2 a 8%	Suelos profundos (> 90 cm), textura franca, pobres en materia orgánica	Cobertura compacta de 100% con herbáceas, sobrepastoreo y cultivos anuales de maíz y sorgo
4	Planicie ligeramente ondulada, de material transportado, con pendiente de 2 a 4%	Suelos profundos (> 90 cm), textura franca, pobres en materia orgánica	Cobertura compacta de 100% con herbáceas, sobrepastoreo y cultivos anuales de maíz y sorgo
5	Ladera con declives ondulados, de basalto y conglomerado, con pendientes de 8 a 25%	Suelos esqueléticos (< 10 cm), textura franca, medios en materia orgánica	Matorral espinoso asociado con pastos nativos, cobertura abierta de 50 a 90%, sobrepastoreo, extracción de leña y fraccionamiento de la tierra
6	Ladera convexa asociada con cárcavas, de arenisca-conglomerado, terrenos erosionados, con pendiente de 8 a 16%	Suelos esqueléticos (< 10 cm), textura franca, pobres en materia orgánica	Matorral espinoso fuertemente perturbado con una cobertura de 50 a 90%, sobrepastoreo y extracción de leña
7	Ladera convexa, drenaje dendrítico, de arenisca-conglomerado, terrenos erosionados, con presencia de cárcavas y barrancas, con pendiente de 8 a 16%	Suelos esqueléticos (< 10 cm), con textura franca, pobres en materia orgánica	Matorral espinoso muy disperso de 10 a 30%, cultivos anuales de maíz y sorgo, sobrepastoreo y extracción de leña
8	Ladera convexa, de arenisca-conglomerado, terrenos erosionados con presencia de cárcavas y barrancas, con pendientes de 8 a 20%	Suelos someros (10 a 30 cm), textura franca, pobres en materia orgánica	Especies herbáceas y pastos nativos muy dispersos de 10 a 30%, cultivos anuales de maíz y sorgo y sobrepastoreo
9	Tepetate asociado con causes, barrancas y cárcavas, de arenisca-conglomerado, con pendientes de 4 a 20%	Aflora el tepetate, de textura gruesa, presencia costras y muy pobres en materia orgánica	La cobertura vegetal muy dispersa, de 0 a 20%, no tiene ningún uso
10	Tepetate con red de drenaje dendrítico, de arenisca-conglomerado, con pendientes de 8 a 16%	Suelos esqueléticos (< 10 cm), de textura gruesa, pobres en materia orgánica	La cobertura vegetal muy dispersa, de 0 a 20%, sobrepastoreo y extracción de leña

finés de expresarlas en términos de grados de erosión (Cuadro 9).

Comparación de las Evaluaciones de la Erosión

De acuerdo con el conocimiento local de la erosión del suelo y de la evaluación técnica de la misma, en el Cuadro 10 se reporta la comparación entre clases de "deslave de tierras" y de erosión del suelo en términos de superficie. Como puede observarse, las tres primeras clases de deslave y los grados de erosión presentan pequeñas diferencias en superficie y porcentaje, y sólo la clase de tierra sin deslave y de erosión ligera comprende una misma superficie. Las diferencias en superficies son debido a los límites, y de éstos a las fuentes de información,

procedimientos y materiales empleados para delimitar y ubicar geográficamente a la erosión, lo cual indica que la cartografía de la erosión elaborada con ambos sistemas puede ser diferente.

Por otra parte, dentro del ámbito de erosión observada, la equivalencia entre la clasificación de Morgan y la clasificación del conocimiento local quedaría expresada como:

Clase de erosión de Morgan	0.5	1	2	3	4	5
Clase de erosión del conocimiento local	1	1	2	3	4	5

En estos términos, la clasificación de Morgan presenta seis clases de erosión y la del conocimiento local presenta cuatro clases de erosión, observándose que las Clases 1 y 4 del conocimiento local

Cuadro 8. Clases de la erosión del suelo codificadas según Morgan (1997) por Facetas, para el ejido El Tomatal, municipio de Iguala, Guerrero.

Faceta	Valores de erosión codificadas de acuerdo con la presencia de:					Clase de erosión de Morgan (promedio)
	Cobertura vegetal	Costras	Montículos	Pedestales	Raíces	
F-1	2	0	0	0	0.5	0.5
F-2	2	0.5	0	1	0.5	1
F-3	3	0.5	0.5	0.5	0.5	1
F-4	3	1	2	3	1	2
F-5	3	3	3	3	3	3
F-6	4	4	4	4	4	4
F-7	4	4	4	4	4	4
F-8	5	5	5	5	5	5
F-9	5	5	5	5	5	5
F-10	5	5	5	5	5	5

Cuadro 9. Clases codificadas y grados de erosión, con su superficie y porcentaje para el ejido El Tomatal, municipio de Iguala, Guerrero.

Clases codificadas de erosión	Grados de erosión	Superficie	Porcentaje
		ha	
0.5 y 1	Ligera	110	10
2	Moderada	60	6
3	Alta	150	14
4 y 5	Muy Alta	679	63

comprenden a las Clases 0 y 1 y 1 y 5 de Morgan, respectivamente, y que para las Clases 2 y 3 existe equivalencia entre ambas clasificaciones. Este mayor número de clases de erosión de Morgan indica que esta clasificación puede ser más precisa que la del conocimiento local.

Continuando con el análisis de comparación entre ambos sistemas de clasificación, con base en información sobre rendimientos de maíz, se estimó el efecto de disminución de rendimiento por clase de erosión, considerando que para la Clase 1 del conocimiento local se supuso que existía erosión, según lo corrobora el hecho de que esta clase

comprende las Clases 0.5 y 1 de Morgan. Esta comparación se presenta en el Cuadro 11.

A partir del Cuadro 11 se desprende que las clases de erosión del conocimiento local presentan un mayor efecto depresivo sobre el rendimiento en relación con las clases de Morgan, excepto para las Clases 5 y 4 de ambas clasificaciones, respectivamente, para las cuales el efecto es similar. Este mayor efecto se relaciona con el menor número de clases de erosión para la clasificación del conocimiento local, de cuatro, en comparación con seis de la clasificación de Morgan, para un mismo efecto depresivo máximo

Cuadro 11. Efecto de disminución de rendimiento por clase de erosión, para la clasificación de Morgan y del conocimiento local.

Sistema de Morgan		Sistema conocimiento local	
Clase de erosión	Efecto sobre el rendimiento	Clase de erosión	Efecto sobre el rendimiento
	t ha ⁻¹		t ha ⁻¹
0.5	-0.10	1	-0.95
1	-0.76	1	-0.95
2	-1.28	2	-1.60
3	-1.74	3	-2.17
4	-2.15	4	-2.69
5	-2.55	4	-2.69

Cuadro 10. Comparación de las clases de "deslave de tierras" y de erosión del suelo.

Clases de deslaves	Superficie	Porcentaje	Grados de erosión	Superficie	Porcentaje
	ha			ha	
Tierras acabadas	624	58	Muy Alta	679	63
Tierras deslavadas	179	17	Alta	150	14
Tierras poco deslavadas	91	8	Moderada	60	6
Tierras sin deslave	106	10	Ligera	110	10

Cuadro 12. Análisis de semejanzas y diferencias entre el conocimiento local y conocimiento técnico de la erosión del suelo.

Conocimiento local	Conocimiento técnico
Distribución de la tierra en usufruto, organización colectiva para aprovechar sus recursos naturales	La tierra y sus recursos naturales en propiedad privada
Visión holística del fenómeno de la erosión del suelo	Visión homocéntrica del fenómeno de la erosión del suelo
Conocimiento práctico e intuitivo en el desarrollo de prácticas para controlar el problema	Conocimiento teórico, propenso a la abstracción para dar solución al problema
El fenómeno de la erosión es observado, comparado y medido a través del tiempo	El fenómeno de la erosión es medido en tiempo relativamente corto, con métodos arbitrarios
Conocimiento transmitido por vía oral	Conocimiento registrado y sistematizado
El concepto de tierra "abandonada", "acabada", "vil" o "muerta"	Es equivalente a la tierra improductiva y sin uso
El concepto de tierras "pelonas" o "quemadas"	Es equivalente a la degradación extrema de la cubierta vegetal
Las clases de tierras representan diferentes calidades, que son observables directamente	Las unidades de suelos se apoyan de propiedades específicas con base en los sistemas taxonómicos de suelos
El concepto de "deslave de tierras" se refiere: "al arrastre de la tierra por acción de la lluvia y su depositación en otros sitios"	Es equivalente a la erosión del suelo, es un fenómeno complejo, cuyo proceso comprende el desprendimiento y transporte de partículas simples por medio del agua o del viento, así como su depositación en otros sitios
El "deslave de las tierras" es cartografiable	La erosión del suelo se representa en unidades cartográficas

similar, de 2.55 t ha⁻¹ y 2.69 t ha⁻¹, respectivamente, para ambos sistemas de clasificación.

De acuerdo con los resultados anteriores, puede concluirse que las clases de erosión de las clasificaciones de Morgan y del conocimiento local no son necesariamente comparables, siendo una de las causas de esto el distinto número de clases que comprenden ambos sistemas para un mismo espacio de exploración, al menos en el límite superior de él.

Otra diferencia entre ambas clasificaciones radica en que el sistema de Morgan puede ser más precisa debido a que considera un mayor número de clases, a la vez que de manera explícita considera la Clase 0 sin erosión.

Por otra parte, se amplió la comparación de los sistemas de clasificación del conocimiento local, de Morgan y de los especialistas quienes trabajan el tema a otros aspectos que resultan importantes de considerar. En el Cuadro 12 se presenta esta comparación en términos de los aspectos considerados, y sus semejanzas y diferencias.

CONCLUSIONES

- Los productores cuentan con un conocimiento sobre el fenómeno de la erosión del suelo, de tal manera que reconocen las clases de erosión, las causas que la originan y su ubicación geográfica, y utilizan un

término genérico para referirse a la erosión como "deslave de tierras", diferenciando cuatro clases: Tierras Acabadas, Tierras Deslavadas, Tierras poco Deslavadas y Tierras sin Deslave, mismas que se asocian con las clases de tierras definidas por ellos como: Loma y Tepetate, Negra, Lama y Barro, respectivamente.

- Para la clasificación técnica, se identificaron diez facetas y seis clases de erosión, agrupadas éstas arbitrariamente en cuatro grados: Muy Alta, Alta, Moderada y Ligera.

- Los mapas elaborados con base en el conocimiento local y mediante el conocimiento técnico son ligeramente diferentes en superficie, pero similares en localización, a la vez que las "Tierras sin Deslave" corresponden a la clase de erosión ligera, las Tierras poco Deslavadas a la clase de erosión Moderada, las Tierras Deslavadas a la clase de erosión Alta y las Tierras Acabadas a la clase de erosión Muy Alta.

- Se determinó que ambos sistemas de clasificación, no son necesariamente comparables, ya que el sistema de Morgan, cuando se considera el efecto de la erosión sobre rendimientos de maíz, puede ser más preciso debido a que considera seis clases de erosión, mientras que el sistema del conocimiento local distingue cuatro clases de "deslaves de tierras".

- Si bien el conocimiento local cuenta con un vocabulario, el problema para integrar el

conocimiento local a la edafología moderna es la falta de comunicación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundación Produce de Guerrero, A.C. por el financiamiento para la realización de la presente investigación. Así como al Sr. Eusebio Bahena, comisario ejidal de El Tomatal, municipio de Iguala, Guerrero, por su apoyo incondicional y a todos los ejidatarios y productores que tienen una estrecha relación con la tierra, cuyo conocimiento les ha permitido sobrevivir por décadas.

LITERATURA CITADA

- Anaya G., M. 1998. Sistemas de captación de agua de lluvia en América Latina y el Caribe: Base para el desarrollo sostenible. Manual técnico. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Agencia de Cooperación Técnica IICA. México.
- Ayers, A. 1995. Indigenous soil and water conservation in Djenné. Mali. pp. 371-384. *In*: Slikkerveer, L.J. y D.W. Brokensha (eds.). Studies in indigenous knowledge and development. The cultural dimension of development: Indigenous knowledge systems. Intermediate Technology Publications. London, UK.
- Barrera-Bassols, N. y J.A. Zinck. 2000. Ethnopedology in a worldwide perspective. An annotated bibliography. ITC Publication 77. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands.
- Blaikie, P. 1985. The political economy of soil erosion in developing countries. Longman. London, New York.
- Cartier van Dissel, C. 1997. Differences in perception: Erosion in Pert Duinford, South Africa. pp. 268. *In*: Barrera-Bassols, N. y J.A. Zinck. 2000. Ethnopedology in a worldwide perspective. An annotated bibliography. ITC Publication 77. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands.
- Cartier van Dissel, C. y J. de Graaff. 1998. Differences between farmers and scientists in the perception of soil erosion: A South African case study. *Indigenous Knowledge and Development Monitor* (3): 7-8.
- CETENAL. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. 1976. Carta de Edafología Iguala E-14-A-78. Escala 1:50 000. México, D.F.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 1983. Mantengamos viva la tierra. Causas y remedios contra la erosión. Roma, Italia.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 1994. Plan de acción para combatir la desertificación en México (PACD-MEXICO). Comisión Nacional de Zonas Áridas. México, D.F.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1994a. Registro Agrario Nacional. Tipo de plano: Interno. Escala 1:10 000. Chilpancingo, Guerrero, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1994b. Guerrero. Resultados definitivos Tomo I y II. VII Censo Agrícola-Ganadero. Aguascalientes, Ags. México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1997. Estadísticas del Medio Ambiente. México. Información de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente, 1995-1996. Aguascalientes, Ags. México.
- Kiome, R.M. y M. Stocking. 1995. Rationality of farmer perception of soil erosion: The effectiveness of soil conservation in semi-arid Kenya. *Global Environ. Change* 5(4): 281-295.
- Mazzucato, V. y D. Niemeijer. 2000. Rethinking soil and water conservation in a changing society: A case study in eastern Burkina Faso. *Trop. Resource Manage. Papers* 3: 172.
- Medina T., J.G. y L.A. Natividad B. 1998. Recursos naturales: Planeación integral. Trillas. México.
- Miller Jr., G.T. 1999. Ecología y medio ambiente. Introducción a la ciencia ambiental, el desarrollo sustentable y la conciencia de conservación del planeta tierra. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F.
- Mitchell, B. 1999. La gestión de los recursos y del medio ambiente. Trad. al español por Domingo Gómez O. y G. Gasco G. Mundi-Prensa. México, D.F.
- Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Trad. al español por P. Urbano Terrón y J. de M. Urbano López de Meneses. Mundi-Prensa. México, D.F.
- Napier, T.L., S.M. Napier y J. Tvrdon. 2000. Soil and water conservation policies and programs: Successes and failures. Boca Raton, FL.
- Oldeman, L.R., R.T.A. Kakkeling y W.G. Sombroek, 1991. Global assessment of soil degradation-GLASOD. World map of status of human-induced soil degradation. International Soil Reference and Information Center. Wageningen, The Netherlands.
- Ortiz S., C.A. 1992. Hablemos de suelo. *Revista Agroproductividad (México)* 1: 3-10.
- Ortiz S., C.A. 1999. Los levantamientos etnoedafológicos. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Ortiz S., C.A. y H.E. Cuanalo de la C. 1984. Metodología del levantamiento fisiográfico: Un sistema de clasificación de tierras. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Ortiz S., C.A., D. Pájaro H. y V.M. Ordaz Ch. 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Ortiz S., M. de la L. M., M. Anaya G. y J.W. Estrada Berg Wolf. 1994. Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra. Colegio de Postgraduados-Comisión Nacional de Zonas Áridas. México.
- Pimentel, D. y N. Kounang. 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University. New York.
- Porta C., J., M. López-Acevedo R. y C. Roquero de la L. 1999. Edafología: Para la agricultura y el medio ambiente. 2a edición. Mundi-Prensa. México, D.F.

- Suarez, C.F. 1980. Conservación de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Vehie, A. 2000. Sustainable farming practices: Ghanaian farmers' perception of erosion and their use of conservation measures. *Environ. Manage.* 25: 393-402.
- WinklerPrins, A.M.G.A. 2001. Why context matters: Local soil knowledge and management among an indigenous peasantry on the lower Amazon floodplain, Brazil. *Etnoecologica* V(7): 6-20. peasantry??
- Zavala O., A. 1996. Dendroenergía para el desarrollo rural. Situación dendroenergética en el estado de Guerrero. PAIR, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

SOIL DEGRADATION AS A RESULT OF WATER EROSION

Degradación del Suelo como Resultado de la Erosión Hídrica

L. Darrell Norton¹, Eusebio Jr. Ventura^{2‡} and Katerina Dontsova¹

SUMMARY

The loss of topsoil is often thought of as the only ramification of soil erosion by water. However, there are other important degradational aspects of the interaction of water and soil at the very earth surface. Low electrolyte rain water, when impinged upon either bare or covered soil, tends to react chemically causing dispersion of clays. This phenomena leads to a lowering of the infiltration capacity of the soil to the extent that runoff will occur and thus transporting the dispersed clays, soil particles, pesticides and nutrients off-site. The process causes considerable off-site effects such as siltation of waterways and contamination of waterbodies with chemicals as well as the on-site degradation and loss of productivity. The process is particularly problematic on marginal soils where subsoils having lesser productivity and increased runoff and erosion potential are exposed. The objective of this paper is to summarize the various soil degradational processes occurring due to water erosion and discuss various ways that the knowledge of these processes can be used to develop low cost, effective methods to control erosion thereby preventing the soil degradation. The information here presented is the result of several years of both field and laboratory experimentation conducted by the authors and other personnel at the United States Department of Agriculture and Purdue University's National Soil Erosion Research Laboratory at West Lafayette, Indiana, USA.

Index words: Soil amendments, runoff, soil productivity.

¹National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-ARS, Purdue University, 1196 Soil Building, West Lafayette, IN, 47907, USA.

²Corresponding author. School of Engineering, University of Queretaro. C.U. Cerro de las Campanas, 76010 Queretaro, Qro., Mexico. Phone: 01 442 216 2414, Fax: 01 442 215 25 12.

[‡](eventura@sunserver.uaq.mx)

Recibido: Marzo de 2001. Aceptado: Septiembre de 2002.
Publicado en Terra 21: 259-265.

RESUMEN

La pérdida del suelo superficial a menudo se considera como la única consecuencia de la erosión hídrica. Sin embargo, existen otros aspectos importantes degradativos relacionados con la interacción del agua y suelo en la parte más superficial. Cuando el agua de lluvia con baja concentración electrolítica llega a un suelo con o sin cobertura, tiende a reaccionar químicamente, causando dispersión de arcillas. Este fenómeno produce una reducción de la capacidad de infiltración del agua en el suelo a grado tal que se genera un escurrimiento superficial, el cual transporta las arcillas dispersas, partículas de suelo, pesticidas y nutrientes fuera del sitio. Dicho proceso causa también efectos considerables fuera del sitio, tales como el asolvamiento de canales y contaminación de cuerpos de agua con sustancias químicas, así como la degradación y pérdida de productividad en el sitio. El proceso es en particular problemático en terrenos marginales donde se encuentran expuestos subsuelos de menor productividad y con un potencial de erosión y escurrimiento mayor. El objetivo de este manuscrito es resumir los procesos de degradación que ocurren como consecuencia de la erosión hídrica y discutir las formas en que el conocimiento de esos procesos puede usarse para desarrollar métodos de bajo costo y efectivos para controlar la erosión, con lo que se previene la degradación de los suelos. Los resultados aquí presentados son el esfuerzo de varios años de experimentación tanto en campo como en laboratorio realizados por los autores y personal del Laboratorio Nacional de Investigación en Erosión de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y la Universidad de Purdue en West Lafayette, Indiana, EUA.

Palabras clave: Mejoradores de suelo, escurrimiento superficial, productividad del suelo.

INTRODUCTION

Soil degradation by water erosion is a serious problem in many parts of the world. In the worst case, it leads to total destruction of the land. This phenomenon causes not only the loss of productive topsoil but also many adverse off-site effects such as sedimentation of waterways, flooding and pollution with chemicals in the runoff. The process of soil erosion by water is a double edge sword in the sense that the soil, which is needed on-site, is lost along with its nutrients and the water that carries it is not available for use by plants. Both adversely affect the ability of people to maintain sustainable production in many areas of the world. The problems of soil erosion by water alone are of an immediate considerable economic consequence, however, the long-term costs are truly immeasurable. Technology has given us means to control water erosion but the approach has largely been the use of costly engineering methods that are purely temporary and expensive. Given the low cost of agricultural goods world-wide with recent globalization of most economies, farmers can not afford to institute such practices unless subsidized by governments. Since most of the population in the world now is non-agrarian, the sympathy for supporting erosion control through taxes is diminishing in most countries. With a thorough understanding of the processes of soil degradation by water erosion, more effective and economic means of erosion control can be formulated to help farmers more profitably and sustainably farm their lands. This paper will attempt to discuss the major processes that can be managed by land users to control erosion at low cost. The objective of this paper is to convey the knowledge of basic process that lead to soil degradation by water erosion so that land users can adapt them in their farming systems to control erosion while maintaining profitability and sustainability.

PROCESSES OF WATER EROSION

One of the fundamental properties of soil-rainwater interaction is the fact that natural rain is low in electrolytes because it forms by a natural distilling process (Norton, 1995). This interaction does several things, including the leaching of salts from the soil profiles to surface or groundwater. For the same reason, irrigation with waters other than snowmelt leads to the adverse process of salinization. However, at the very soil/air/water interface the powerful

physicochemical interaction of low electrolyte rainwater with soils can create an extreme diffusional gradient whereby the soil quickly can release electrolytes to the rainwater (Zhang, *et al.*, 1997a), which causes rapid dispersion of clay particles and the release of many nutrients to the soil solution at the zone of interaction (Zhang, *et al.*, 1999). The process can also considerably affect the amount of pesticides in the runoff (Zhang, *et al.*, 1997b). The coupling of the physicochemical processes with the physical process of the impact of high velocity and high kinetic energy raindrops further exasperates the problem and leads to surface sealing of many soils even protected by residue cover (Eltz and Norton, 1997). The surface seal in Figure 1 formed through the physical disintegration of aggregates and clay dispersion (Norton, *et al.*, 1993) and has a low infiltration rate due to the low porosity. The physical plugging of pores with turbid water due to the tabular shape of clays also leads to a further lowering of the infiltration capacity of the soil (Reichert and Norton, 1994a). Furthering this low infiltration rate are the processes of slaking and swelling. The combination of all these processes leads to a very low steady state infiltration rate in many soils of less than 5 mm h^{-1} and often closer to 1 mm h^{-1} (Norton, *et al.*, 1993).

The physical beating of the soil by raindrops can largely be controlled by the use of soil roughness, surface residues or protection by canopy (Eltz and Norton, 1997). However, the physiochemical process can still occur no matter how much residue cover or

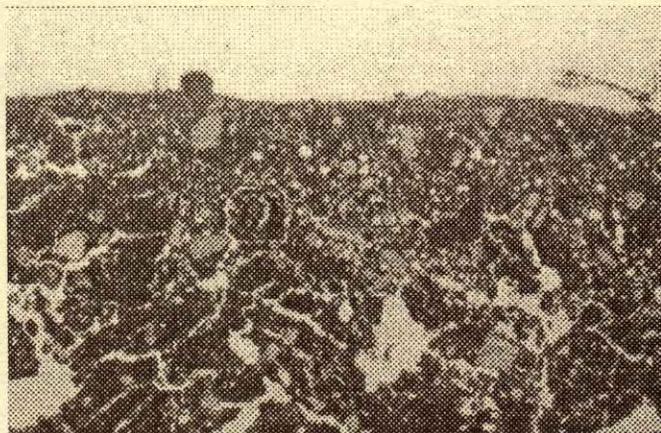


Figure 1. Micrograph of a soil surface seal from a Miami soil (fine-silty, mixed, mesic Typic Hapludalf) following application of 64 mm rainfall of deionized water. Horizontal frame is 15 mm.

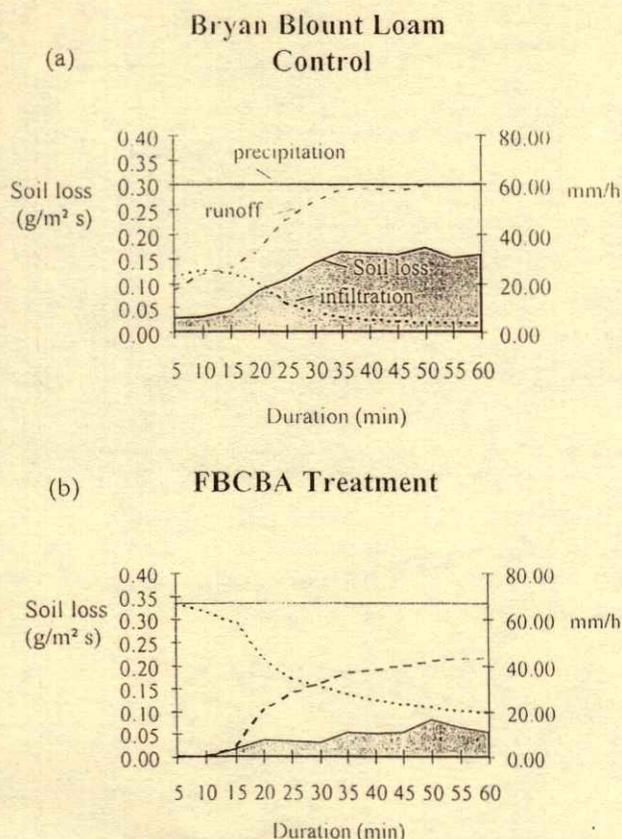


Figure 2. Infiltration rate as a function of time for: (a) Blount soil (fine-loamy, mixed, mesic Typic Hapludalf) without gypsum treatment and (b) Blount soil (fine-loamy, mixed, mesic Typic Hapludalf) with gypsum treatment.

plant cover exists (Norton, *et al.*, 1999). Figure 2a and b gives an example of the extent of the effect of the two processes on infiltration capacity. In the control, the soil is subjected to 64 mm h⁻¹ rainfall and the infiltration capacity is measured. The low infiltration rate is due to a combination of the physicochemical processes and the physical beating of raindrops. With the gypsum treatment the physicochemical dispersion is reduced because gypsum is a rapidly soluble mineral (Norton, 1995) that quickly releases electrolytes into the rainwater and prevents the dispersion of clays. The difference between the control and the gypsum treated soil represents the extent of the contribution of physicochemical processes to the reduction in water intake. The difference between both curves from the initial rainfall amount represents the relative contributions of each process.

The processes of soil-water interactions and water erosion are highly complex and vary depending on

permanent soil properties. Variable charged clays behave differently under the same erosional conditions than permanently negative charged clays (Reichert and Norton, 1996, Reichert *et al.*, 1994). The amount of infiltration, runoff and erosion is considerably affected by the antecedent soil moisture (Reichert and Norton, 1994a). Recent research has shown that the amount of erosion can be considerably altered also by the near surface hydraulic gradient (Zheng *et al.*, 2000).

It has long been known that soils affected by sodium were dispersive and addition of gypsum was highly effective in their reclamation (Shainberg *et al.*, 1989). However, recent research has shown that not only sodium is a highly dispersive cation, but magnesium can also be deleterious to soil structure under conditions of low electrolyte rainwater. In a study using soils that were low in sodium on the exchange complex, Norton and Dontsova (1998) found that gypsum application was highly effective in reducing soil erosion and runoff in several soils except where magnesium was present in a substantial amount.

Upon further investigation involving the study of cation selectivity of soil clays, it was found that not only was calcium found to be preferred by a wide range of clay types, but that magnesium was considerably more dispersive at the same electrolyte concentration (Figure 3). This result was contrary to that predicted by the Guoy-Chapman Double Layer Theory, which indicates flocculation power is

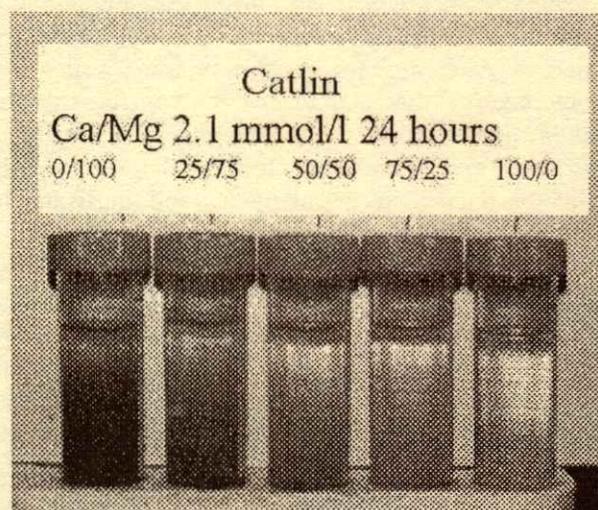


Figure 3. A series of test tubes with soil clays at a constant electrolyte content varying the Ca/Mg ratio of the solution. It can be seen that the high Ca tubes are flocculated and the high Mg tubes are dispersed after 24 h of standing.

controlled by the cationic valence to the sixth power (Sumner, 1992).

Further research, using a state of the art Fourier Transformed Infrared Spectrophotometer and microbalance facility, whereby the vibrational energy of the water molecules as influenced by the metal cation can be measured as soil clay moisture content is changed, has shown that at a molecular level that magnesium behaves fundamentally different than calcium in its interaction with water (Dontsova *et al.*, 2002; Figure 4). This has extreme ramifications for how we manage soils, because materials that alter soil pH, such as dolomitic agricultural lime, contain considerable amounts of magnesium (Norton and Zhang, 1998). In fact, most major universities in the USA recommend the use dolomite as a liming source because of its prevalence, lower transportation costs due to proximity, and higher calcium carbonate equivalent (CCE) (Norton and Zhang, 1998). This fact is not in dispute, but the productivity is by no means only a pH-controlled phenomena. The plant nutrients are considerably affected by the pH of a soil solution, but yield depends also on water and nutrient delivery to the plant's roots system. Root systems also require a desirable growth medium, which includes both water and air exchange. Surface sealing and soil structural degradation affect both of these considerably.

SOILS DEGRADATION AND PLANT PRODUCTIVITY

Plants require water, carbon dioxide and sunlight to grow in addition to the soil/water-supplied nutrients. Man can manage the soil and water but cannot control the amount of carbon dioxide or sunlight to affect plant production except in controlled environments. Therefore, most of the world population must focus on managing soil and water to develop sustainable production systems. Our capacity to manage soil and water is also a function of the degradational state of the land. In the worst-case scenarios, where the land is totally destroyed by gulying, there is little that can be done except extensive engineering approaches to put the land back into production. However, many areas of the world are being degraded through the very slow insidious remove of topsoil and nutrients which can be prevented, but if left alone can do severe environmental damage such as destroy entire habitats and industries, e.g. the "hypoxia-zone" in the Gulf of Mexico.

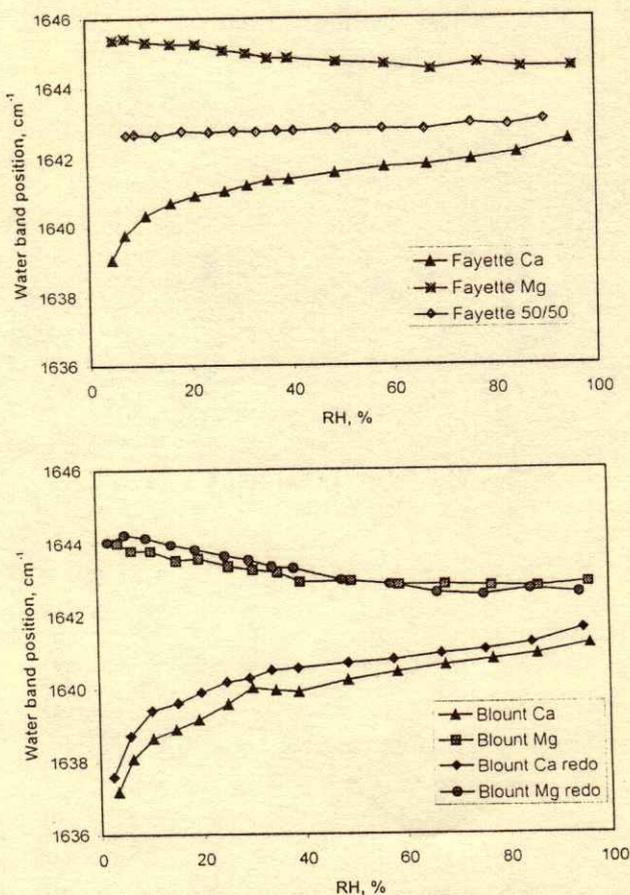


Figure 4. Fourier Transformed Infrared Spectra (FTIR) showing the vibrational energy between water and the metal cation at various moisture contents for Blount soil (top) and Fayette soil (bottom).

As stated before, not only is the removal of water through the production of runoff a problem for plant production, but also the loss of soil and nutrients with the runoff is a major problem. Typically, farmers use "soluble" sources of nutrients so that their effect occurs within the growing season. This same solubility of salts (fertilizers) such as potassium chloride also leads to its ability to be leached out or removed in runoff. Potassium is not a major problem environmentally, however, the other two macronutrients (N and P) are not so benign. In fact, many surface water and estuary problems are associated with these two nutrients. In the USA, regulations and laws are now either being drafted or already exist to reduce the redistribution of these two nutrients in the environment.

It is not only just the redistribution of these nutrients, either as a loss or a gain, that causes an environmental problem; other processes of water loss

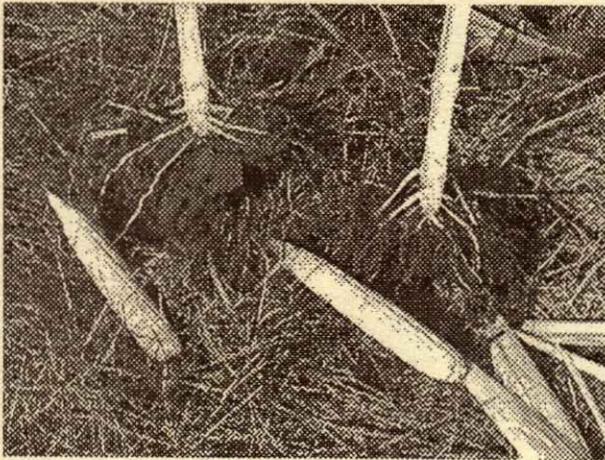


Figure 5. A comparison between two corn plants planted on the same day with the same fertility program and the same variety. The difference is that the plant on the right was grown in the same soil only meters away, which was treated to improve soil structure.

through erosion/degradation should also be considered. The main limitation to plant productivity in the world is due either to a lack of water or to the presence of excessive amounts of it, because of redistribution on the landscape or a loss of the productive capacity of the soil because of degradation. Provided the water needed for plant growth and evaporation-transpiration and a medium that can supply the plant with the nutrients, many regions of the world can remain sustainable and produce considerably more food in spite of global climate changes.

The redistribution of nutrients and water is not the only effect of erosional processes on landscapes. The rooting environment can also considerably affect the plant productivity with the same nutrient status. The photo in Figure 5 shows the same corn variety under the same fertility status and planted on the same day just a few meters from one another. The difference is that the soil on the right was treated to improve soil structure and reduce erosion and runoff. The root systems can clearly be seen to be different as well as the productivity (yield). In a similar experiment, the effect of improving soil structure (reducing soil degradation) can clearly be seen in the random sample of corn ears in Figure 6. The promising aspect of this research is that through the use of materials such as polyacrylamide to reclaim soil structure (Zhang *et al.*, 1998), even degraded soils can be improved.

A field experiment was conducted in a farm in Sullivan County, Indiana, to evaluate the effect of

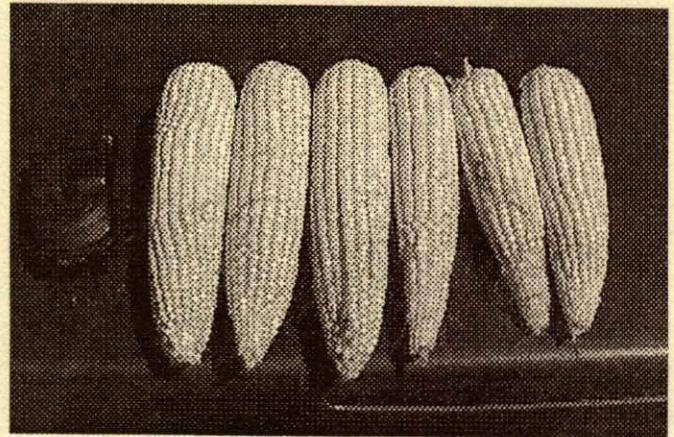


Figure 6. A random sampling of corn ears in a similar experiment to that shown in Figure 5 where the soil has been treated to improve soil structure.

gypsum on soil loss under different tillage systems using simulated rainfall. The results are presented in Figure 7. All the tillage systems had a greater soil loss when no gypsum was applied as compared to when

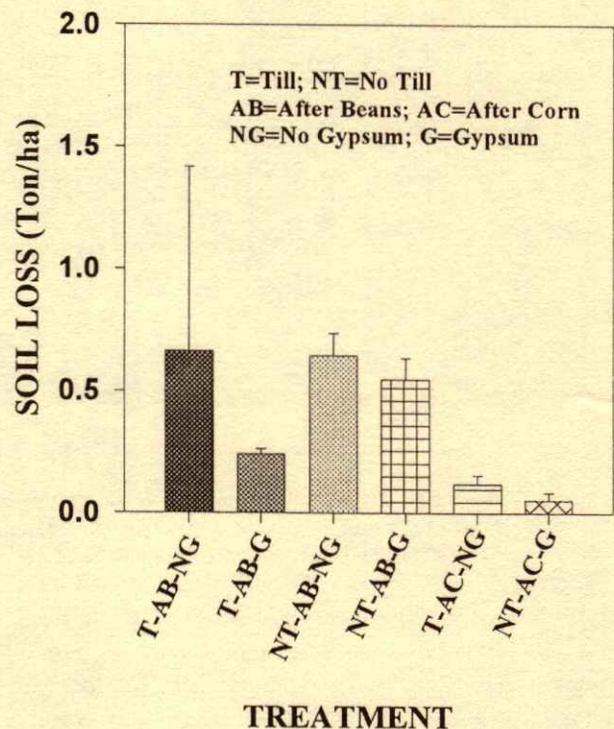


Figure 7. Effect of surface application of gypsum on soil loss under different tillage systems in a simulated rainfall experiment in Sullivan County, Indiana.

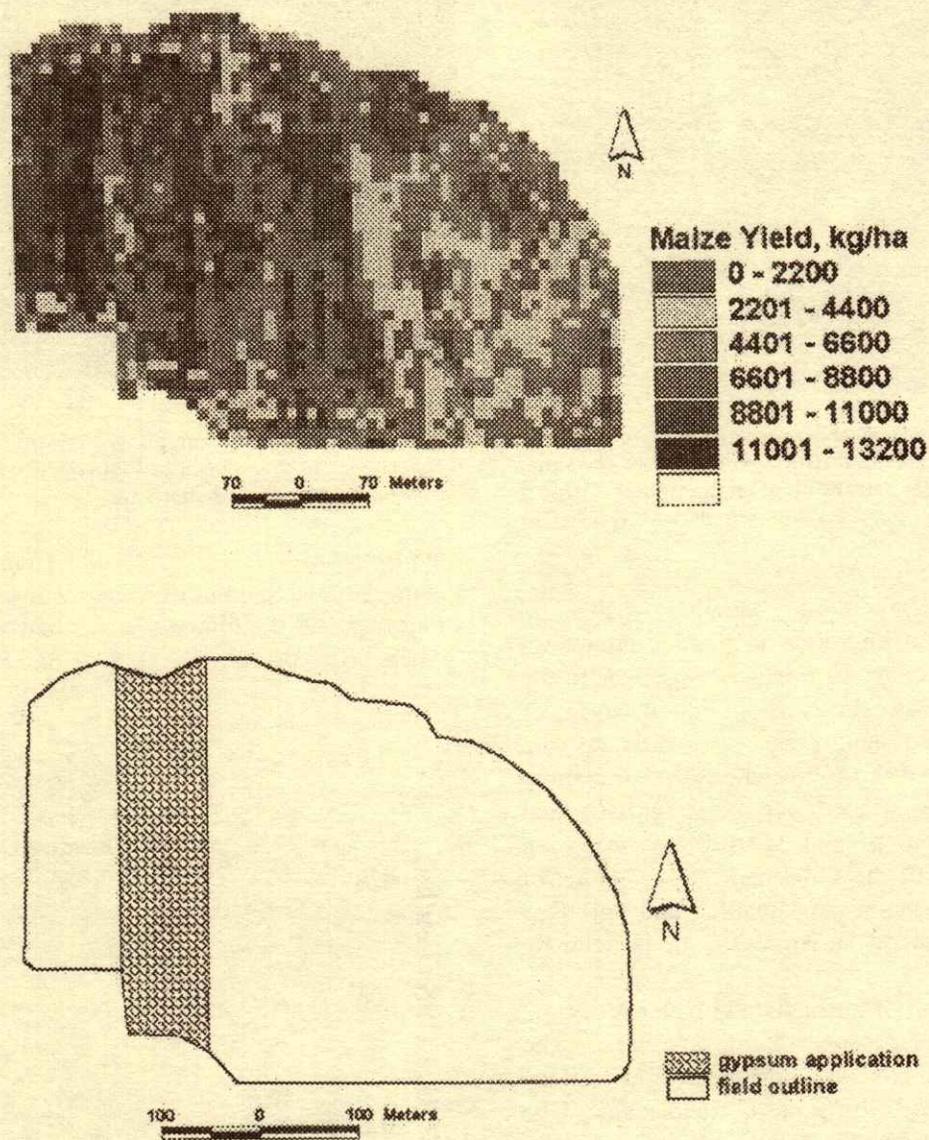


Figure 8. Yield monitoring data from a study where gypsum was applied to improve water entry in a no-till field and measured spatially with a global positioning system. The yield variability was decreased and overall yield increased with a single 1 t ha^{-1} surface application.

gypsum was applied on the soil surface at a rate of 2 t ha^{-1} just before simulating a storm of 64 mm h^{-1} during one hour. The greater reduction in soil loss was observed for tilled treatment after a soybean crop. A smaller but significant reduction was observed for the no-tilled soil after a soybean and corn crop. In any case, gypsum helped reducing soil loss making tillage

systems such as no-till after corn even more efficient in controlling erosion.

Recent research has also shown that the use of soil amendments such as gypsum can positively affect field scale production through prevention of the redistribution of water on the landscape. Figure 8 shows the increase in yield resulting from the

application of 1 t ha⁻¹ of synthetic gypsum in no-till corn. The increase in yield is believed to be the result of improved water entry and utilization because of reduced runoff due to the above mentioned physico-chemical processes.

CONCLUSIONS

A basic understanding of how natural rainwater interacts with soil is fundamental in developing ways to better manage our fragile environment. This paper has demonstrated how the most basic concepts of this interaction of water and soil can be used to our advantage in developing sustainable production systems that do not degrade our soil resource or the environment. Soil erosion by water and its degradation is a global concern and all indicators are that it will be even an increasing concern because the continued severity of climatic events no matter what their cause. The benefits of this kind of research far out weigh the cost and should be supported to further the adoption of systems that do not exploit, but sustainably utilize the soil resource to feed the World's increasing population.

ACKNOWLEDGMENTS

Thanks to Belle Wallace of the National Soil Erosion Research Laboratory for use of her excellent data on yield mapping for this paper.

REFERENCES

- Dontsova, K.M. 2002. Ca²⁺ and Mg²⁺ effects on water and ammonia adsorption by clays. Ph.D. thesis. Purdue University. West Lafayette, IN.
- Eltz, F.L.F. and L.D. Norton. 1997. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage, and canopy cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1746-1755.
- Norton, L.D. 1995. Mineralogy of high Calcium/Sulfur-containing coal combustion by-products and their effect on soil surface sealing. pp. 87-105. *In: Agricultural Utilization of Urban and Industrial By-Products. Special Publication 58. American Society of Agronomy. Madison, WI.*
- Norton, L.D. and K.M. Dontsova. 1998. Use of soil amendments to prevent soil surface sealing and control erosion. *Adv. GeoEcology* 31: 581-587.
- Norton, L.D. and X.C. Zhang. 1998. Liming to improve chemical and physical properties of soils. pp. 309-331. *In: A. Wallace and R.E. Terry (eds). Handbook of Soil Conditioners. Marcel Dekker. New York.*
- Norton, L.D., I. Shainberg, and K.W. King. 1993. Utilization of gypsiferous amendments to reduce surface sealing in some humid soils of the eastern United States of America. *Catena Suppl.* 24: 77-92.
- Norton, L.D., I. Shainberg, L. Cihacek, and J.H. Edwards. 1999. Erosion and soil chemical properties. pp. 39-56. *In: Soil and Water Conservation Society. Soil quality and soil erosion. CRC Press. Boca Raton, FL.*
- Reichert, J.M. and L.D. Norton. 1994a. Aggregate stability and rain-impacted sheet erosion of air-dried and prewetted clayey surface soils under intense rain. *Soil Sci.* 158: 159-169.
- Reichert, J.M. and L.D. Norton. 1994b. Fluidized bed bottom-ash effects on infiltration and erosion of swelling soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1483-1488.
- Reichert, J.M. and L.D. Norton. 1996. Fluidized bed combustion bottom-ash effects on infiltration and erosion of variable-charge soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 257-282.
- Reichert, J.M., L.D. Norton, and C. Huang. 1994. Sealing, amendment, and rain intensity effects on erosion of high-clay soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1199-1205.
- Shainberg, I., M.E. Sumner, W.P. Miller, M.P. Farina, M.A. Pavan, and M.V. Fey. 1989. Use of gypsum on soils: A review. *Adv. Soil Sci.* 9: 1-111.
- Sumner, M.E. 1992. The electrical double layer and clay dispersion. pp. 38-53. *In: M.E. Sumner and B.A. Stewart (eds). Soil crusting: Chemical and physical processes. Advances in Soil Science. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.*
- Zhang, X.C., D. Norton, and M.A. Nearing. 1997a. Chemical transfer from soil solution to surface runoff. *Water Resour. Res.* 33: 809-815.
- Zhang, X.C., L.D. Norton, and M. Hickman. 1997b. Rain pattern and soil moisture content effects on atrazine and metolachlor losses in runoff. *J. Environ. Qual.* 26: 1539-1547.
- Zhang, X.C., L.D. Norton, T. Lei, and M.A. Nearing. 1999. Coupling mixing zone concept with convection-diffusion equation to predict chemical transfer to surface runoff. *Trans. of the ASAE* 42: 987-994.
- Zhang, X.C., W.P. Miller, M.A. Nearing, and L.D. Norton. 1998. Effects of surface treatment on surface sealing, runoff, and interrill erosion. *Trans. of the ASAE* 41: 989-994.
- Zheng, F., C. Huang, and L.D. Norton. 2000. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 4-11.

DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA ECONÓMICA DE FERTILIZACIÓN EN CAÑA DE AZÚCAR

Determination of the Optimal Economic Fertilization Rate in Sugar Cane

Sergio Salgado García¹, Roberto Núñez Escobar² y Lauro Bucio Alanis³

RESUMEN

El experimento se estableció en un Vertisol eútrico; para generar los tratamientos, se utilizó la Matriz Plan Puebla I (N_{Urea} : 80, 120, 160 y 200; P_{SPT} : 0, 40, 80 y 120; y K_{KCl} : 0, 40, 80 y 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente), además de un testigo sin fertilizante. Los 15 tratamientos se distribuyeron en el campo en un arreglo de bloques completos al azar con seis repeticiones. La caña (*Saccharum officinarum* L.) se cosechó a 18 y 12 meses de edad para los ciclos de plantilla y soca, respectivamente. Con las dosis de fertilización 170-90-100, 170-85-85 y 190-100-100, seleccionadas de los modelos de regresión generados, se obtuvieron los mayores rendimientos calculados de caña en los tres ciclos de cultivo (164, 137 y 110 Mg ha⁻¹), ya que dosis mayores de N, P y K abatieron los rendimientos de caña, lo cual sugiere que la dosis usada en la actualidad por el ingenio (120-60-60) es insuficiente para satisfacer los requerimientos del cultivo de caña. El rendimiento se abatió conforme a los ciclos de cultivo. Las dosis de fertilización no modificaron los grados Brix, la pureza, el porcentaje de sacarosa y el contenido de humedad, lo que indica que las dosis óptimas económicas permiten incrementar los rendimientos de caña sin disminuir la calidad del jugo. A los cinco años de cultivarse caña de azúcar, el Vertisol no mostró cambios significativos en sus propiedades químicas, únicamente se observó que la relación Ca/Mg está desbalanceada, siendo recomendable aplicar yeso (CaSO₄), para evitar posibles antagonismos en la absorción de K y Mg.

Palabras clave: *Saccharum officinarum*, rendimiento, calidad de jugos, nitrógeno, fósforo, potasio.

SUMMARY

The experiment was established in a eutric Vertisol; the treatments were generated with the Plan Puebla I Matrix (N_{Urea} : 80, 120, 160, and 200; P_{TSP} : 0, 40, 80, and 120; and K_{KCl} : 0, 40, 80, and 120 kg ha⁻¹ of N, P₂O₅, and K₂O, respectively), and one treatment without fertilizer. The 15 treatments were randomly distributed in the field in an arrangement of complete blocks with six replications. The cane (*Saccharum officinarum* L.) was harvested 18 and 12 months after planting for the plant and ratoon cycles, respectively. The highest calculated cane yields (164, 134, and 110 Mg ha⁻¹) were obtained with the fertilization rates 170-90-100, 170-85-85, and 190-100-100, selected from the regression models generated in the three cultivation cycles, since higher N, P, and K rates reduced cane yields, suggesting that the fertilizer rate presently used in the area (120-60-60) is insufficient to satisfy the sugar cane crop nutrient requirements. Cane yields diminished according to the cultivation cycles. The fertilization rates did not modify the Brix degrees, purity, sucrose and humidity percentages, indicating that the optimal economic fertilization rates allow cane yield increases without diminishing the juice quality. After five years of sugar cane cultivation, the Vertisol did not show significant changes in its chemical properties; only an unbalance in the Ca/Mg relationship was observed; therefore, it is recommended that gypsum be applied, to avoid possible antagonisms in the absorption of K and Mg.

Index words: *Saccharum officinarum*, crop yield, juice quality, nitrogen, phosphorus, potassium.

INTRODUCCIÓN

El rendimiento promedio de caña de azúcar en la zona de influencia del ingenio Pdte. Benito Juárez

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. 86500 H. Cárdenas, Tabasco. (salgados@colpos.colpos.mx)

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

³ Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba. Córdoba, Veracruz. (labucio@colpos.colpos.mx)

(IPBJ) que abarca aproximadamente 14 mil ha, es de 66 Mg ha⁻¹ con 6.61 Mg ha⁻¹ de azúcar, valores que se consideran bajos comparados con 81 Mg ha⁻¹ de caña y 6.91 Mg ha⁻¹ de azúcar, obtenidos por el ingenio Dos Patrias (CNIAA, 1999). Parte de este problema se debe a su plan de manejo nutricional, ya que se fertiliza con la dosis 120-60-60 desde hace más de 25 años, sin considerar la variedad ni el tipo de suelo. La concentración de nutrimentos en el suelo es dinámica. En cada cosecha de caña de azúcar se pierden nutrimentos del sistema, los que deberían reponerse para mantener la fertilidad del suelo. Dichas pérdidas ocurren por la exportación de tallos al molino y por la quema de residuos en el campo. Estudios realizados en México indican que 1 Mg de tallos extrae del suelo, en promedio, 1 a 1.3 kg de N, 0.16 a 0.43 kg de P y 1.33 a 1.97 kg de K (IMPA, 1986), pero la concentración de estos nutrimentos minerales en la planta es afectada por las condiciones del cultivo, el tipo de suelo, el clima, la variedad y la fertilización, lo cual puede afectar ligeramente dichas cifras.

Si bien los fertilizantes químicos son una de las mejores opciones para incrementar y mantener los rendimientos de caña y de sacarosa en el corto plazo (Wilcox, 1991; Salgado *et al.*, 2000), un desbalance nutrimental, posiblemente un exceso de N y una abundante disponibilidad de agua hacen que la caña no madure, ya que la planta utiliza este N para producir nuevo crecimiento (Lingle y Smith, 1991; Robertson *et al.*, 1996). Debido a que las socas se cosechan a 12 meses, la fertilización debería realizarse tres meses después del rebrote (máximo ahijamiento), para que la planta disponga de seis o siete meses para absorber este fertilizante (Salgado *et al.*, 2001b). El N absorbido no debe disminuir la calidad de los jugos, pues un exceso de N disponible en la época de cosecha es la principal causa del bajo contenido de sacarosa y alto contenido de azúcares reductores, glucosa y fructosa (González *et al.*, 1974). Los azúcares reductores pueden subestimar (fructosa) o sobrestimar (glucosa) la rotación positiva y causar errores en la estimación de la sacarosa (De Stefano, 1985); también pueden reaccionar con los aminoácidos durante la molienda y formar compuestos indeseables, que reducen la cantidad de azúcar recuperada por este proceso (Chen, 1991). Por lo anterior, se planteó el presente trabajo con los objetivos de determinar la dosis óptima económica de fertilización, así como evaluar el efecto de la

fertilización en la calidad del jugo de caña y en la fertilidad del suelo en La Chontalpa, Tabasco.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció el 15 junio de 1991 en la zona cañera del Campus Tabasco del Colegio de Postgraduados. Se evaluaron los ciclos de plantilla 1991/93, soca 1993/94 y resoca 1994/95. El suelo fue un Vertisol éutrico representativo de 50% de la superficie cultivada con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. El clima del lugar es tropical húmedo con una temperatura promedio anual de 26 °C y una precipitación anual promedio de 2100 mm, lo que favorece el crecimiento del cultivo de la caña de azúcar (Humbert, 1974).

La preparación del suelo se realizó con un subsoleo, un barbecho, dos pasos de rastra cruzada y el surcado a 1.3 m de separación. La variedad de caña utilizada fue la Méx 69-290 (mezclada 30% aproximadamente) sembrada a doble cordón punta con cola.

Para generar los tratamientos de fertilización, se utilizó la Matriz Plan Puebla I para tres factores controlables de la producción (Turrent, 1985). Las fuentes de fertilizantes y los niveles de exploración fueron urea (N): 80, 120, 160 y 200; superfosfato triple (P₂O₅): 0, 40, 80 y 120; y cloruro de potasio (K₂O): 0, 40, 80 y 120 kg ha⁻¹, respectivamente. La combinación de estos factores originó 14 tratamientos más un testigo sin fertilizante. Los 15 tratamientos se distribuyeron en el campo en un arreglo de bloques completos al azar con seis repeticiones. El fertilizante se aplicó en banda sobre la superficie del surco a tres meses de edad de la planta y, posteriormente, se aporcó para cubrir el fertilizante. El tamaño de la parcela experimental fue de seis surcos (1.3 m de ancho por 10 m de largo), y la parcela útil ocupó los cuatro surcos centrales (1.3 m de ancho por 8 m de largo).

A partir del 1° de agosto de 1991, se realizaron las siguientes labores: un paso de cultivadora de ganchos, fertilización, control de malezas y de ratas de campo, de acuerdo con las especificaciones para este cultivo (Salgado *et al.*, 2001a).

La cosecha se realizó de manera manual cuando la caña tenía 18 y 12 meses de edad para el ciclo de plantilla y de socas, respectivamente. Un día antes de la cosecha, se efectuó la quema para facilitar el corte de caña. Las variables de estudio tomadas de la

parcela útil se describen a continuación: a) Rendimiento de campo (Mg ha^{-1}): para lo cual los tallos de la parcela útil se pesaron en una balanza de reloj de capacidad de 100 kg; b) Calidad del jugo de caña: se determinó en el ciclo de resoca mediante la determinación de los grados Brix, la pureza, la sacarosa en caña y el contenido de humedad, en una muestra de cinco cañas colectadas al azar de los tratamientos de fertilización T-8, T-9, T-10, T-13 y T-15 (Cuadro 1). Estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Campo del Ingenio Pdte. Benito Juárez, según las técnicas descritas por Golcher *et al.* (1984); c) Fertilidad del suelo: se realizó un muestreo al inicio y al final del experimento en los cinco tratamientos de fertilización arriba mencionados. Se tomó una muestra compuesta de suelo a la profundidad de 0 a 30 cm, para caracterizar su fertilidad (Salgado *et al.*, 1999). Las muestras se analizaron con los métodos rutinarios del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas (LASPA) del Campus Tabasco (Jones *et al.*, 1991).

Para el análisis estadístico se utilizó la versión 6.11 del paquete SAS (SAS Institute, 1996). Para todas las variables se realizaron un análisis de varianza en bloques completos al azar y la prueba de separación de medias de Tukey. Para determinar la dosis óptima económica de fertilización (DOEF), se utilizó el procedimiento continuo para determinar el máximo ingreso neto, el cual consiste en generar los mejores modelos de regresión a través del procedimiento del máximo incremento de R^2 , tomando como criterio de bondad el menor cuadrado medio del error y determinando los costos variables de los tratamientos (Martínez, 1988). Los costos de los fertilizantes fueron: $N_U = 3.83$, $P_{SPT} = 3.56$ y $K_{KCl} = 2.33$ \$ kg^{-1} , y el precio de 1 Mg de caña de azúcar \$ 234.00.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de Caña de Azúcar

En el Cuadro 1, se presentan los rendimientos de caña en los diferentes tratamientos de fertilización para los ciclos de plantilla, soca y resoca. De acuerdo con el análisis de varianza, se observa que la caña de azúcar respondió a los tratamientos de fertilización NPK, con un coeficiente de variación (CV) menor que 13% para los tres ciclos de cultivo, el cual se considera aceptable. En el ciclo plantilla, los mayores rendimientos se asociaron con los Tratamientos T-8

Cuadro 1. Rendimiento promedio de caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Tratamiento de fertilización No. N P ₂ O ₅ K ₂ O kg ha ⁻¹	Rendimiento		
	Plantilla (18 meses)	Soca (12 meses)	Resoca (12 meses)
1 120-40-40	102.3 ef [†]	108.9 abcd	62.4 de
2 120-40-80	114.0 cde	105.1 bcd	68.2 cde
3 120-80-40	113.2 cde	112.2 abc	76.2 bcd
4 120-80-80	111.2 de	117.1 ab	78.2 bcd
5 160-40-40	111.6 cde	94.7 bcd	72.1 bcd
6 160-40-80	113.5 cde	117.1 ab	81.4 bcd
7 160-80-40	122.5 cd	114.3 abc	91.8 ab
8 160-80-80	158.2 a	134.5 a	107.3 a
9 80-40-40	104.0 ef	88.9 cd	64.1 de
10 200-80-80	143.8 ab	120.2 ab	87.1 abc
11 120-0-40	122.9 cd	106.8 bcd	70.5 cde
12 160-120-80	131.2 bc	106.3 bcd	78.2 bcd
13 120-40-0	104.0 def	97.9 bcd	65.3 de
14 160-80-120	116.5 cde	104.7 bcd	65.0 de
15 0-0-0	89.6 f	84.3 d	50.6 e
C.V (%):	6.6	12.2	9.0
Media:	117.2	107.6	74.6
Prob. de F. Trats.	0.01 **	0.01 **	0.01 **
DSH:	19.7	26.7	20.5
Anal. Factorial 2 ³			
N	0.01 **	0.30 ns	0.01 **
P	0.01 **	0.01 **	0.01 **
K	0.01 **	0.01 **	0.01 **
NP	0.01 **	0.15 ns	0.06 ns
NK	0.08 ns	0.01 **	0.15 ns
PK	0.20 ns	0.64 ns	0.84 ns
NPK	0.01 **	0.46 ns	0.39 ns

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

** = altamente significativo ($P \leq 0.01$); ns = no significativo.

(160-80-80) y T-10 (200-80-80) con 158.2 y 143.8 Mg ha^{-1} , mientras que el menor rendimiento 89.6 Mg ha^{-1} , correspondió al testigo. Salgado *et al.* (2000) y Palma *et al.* (2002) reportaron resultados similares. El tratamiento de fertilización 160-80-80 presenta el mayor rendimiento de caña en los tres ciclos de cultivo superando a la media regional de 66 Mg ha^{-1} obtenida con la dosis de fertilización 120-60-60; asimismo, se observó que los rendimientos obtenidos en los ciclos de soca y resoca fueron menores que el de plantilla; lo anterior se explica porque el ciclo de plantilla es más largo y por la pérdida de cepa ocurrida durante las zafas previas.

En la parte inferior del Cuadro 1, se observa que la caña de azúcar respondió significativamente al efecto principal de N, P y K y a algunas de sus interacciones. Para este caso, el mejor tratamiento de fertilización fue el 160-80-80, que satisface los requerimientos del cultivo de caña, ya que a dosis

mayores de esos nutrimentos, la respuesta de la caña disminuye; por lo que para obtener altos rendimientos en los Vertisoles, es necesario fertilizar con la dosis 160-80-80, lo que permitirá mantener la fertilidad natural del suelo, ya que las dosis medias de N y P y bajas de K en el suelo, no alcanzan a suministrar las demandas de este cultivo (Salgado *et al.*, 2001b; Palma *et al.*, 2002).

Para lograr una mayor precisión en la determinación de la DOEF en cada ciclo de cultivo, se generaron los correspondientes modelos de regresión para estimar los rendimientos de caña y se seleccionaron los mejores por ciclo de cultivo (Martínez, 1988), los cuales fueron:

$$Y_{\text{Plantilla}} = 106.85 - 4.226 \cdot 10^{-4} NP + 4.233 \cdot 10^{-6} N^2 PK - 1.271 \cdot 10^{-8} N^3 PK + 2.118 \cdot 10^{-6} NP^2 K - 1.4 \cdot 10^{-8} NP^3 K + 9.24 \cdot 10^{-7} NPK^2 - 6.242 \cdot 10^{-9} NPK^3;$$

$$R^2 = 0.79$$

$$Y_{\text{soca}} = 82.0 + 7.022 \cdot 10^{-3} N^2 - 4.82 \cdot 10^{-5} N^3 - 3.47 \cdot 10^{-1} P - 4.892 \cdot 10^{-3} K^2 + 8.329 \cdot 10^{-7} N^2 P^2 - 5.963 \cdot 10^{-9} N^2 P^3 + 8.784 \cdot 10^{-7} N^2 K^2 - 5.509 \cdot 10^{-9} N^2 K^3;$$

$$R^2 = 0.81$$

$$Y_{\text{Resoca}} = 36.65 + 5.988 \cdot 10^{-3} N^2 - 3.446 \cdot 10^{-5} N^3 - 5.021 \cdot 10^{-1} P + 9.324 \cdot 10^{-3} P^2 - 1.552 \cdot 10^{-4} P^3 - 8.035 \cdot 10^{-5} K^3 + 8.642 \cdot 10^{-5} NP^2 + 6.41 \cdot 10^{-5} NK^2$$

$$R^2 = 0.76$$

A continuación se seleccionaron aquellas dosis que matemáticamente proporcionaron los mayores ingresos netos (Cuadro 2). Como puede observarse, estas dosis de fertilización difieren ligeramente de la evaluada en campo (160-80-80), pero son consistentemente superiores a la utilizada en la actualidad.

Calidad del Jugo de Caña

En el Cuadro 3, se presentan los resultados de la calidad del jugo de caña para el ciclo de resoca. Se

observa que los tratamientos de fertilización no modificaron los indicadores de calidad, contrariamente a lo reportado por Lingle y Smith (1991) y Robertson *et al.* (1996) con una media de 18.5 para grados Brix, 91.5% de pureza, 12.4% de sacarosa y 72.2% de humedad; valores que se encuentran dentro de los estándares del ingenio Benito Juárez para designar jugos de buena calidad (Salgado *et al.*, 2001a). Lo anterior indica que las dosis de fertilización mencionadas en el Cuadro 2 permiten incrementar el rendimiento de caña sin disminuir la calidad de los jugos de caña. Cabe señalar que las dosis de nitrógeno que según la literatura han abatido la calidad del jugo de la caña, son superiores a 200 kg ha⁻¹.

Fertilidad del Suelo

Los resultados de las propiedades químicas del suelo se presentan en el Cuadro 4, las cuales son interpretadas con los estándares de Jones *et al.* (1991) y Salgado *et al.* (1999). En general, el suelo, después de recibir tres aplicaciones de fertilizante, no mostró diferencias significativas en sus propiedades químicas. La reacción del suelo (pH) se mantuvo neutra favoreciendo la disponibilidad de los nutrimentos para el cultivo de caña. El contenido de materia orgánica (MO) varía de medio a rico. El contenido de Nt es mediano, con una relación C/N entre 11.6 y 19.9 que indica la posibilidad de una liberación neta de N aprovechable, pero seguramente insuficiente para cubrir las demandas del cultivo (Humbert, 1974; Salgado *et al.*, 2000) esto explicó que el T-15, a pesar de contar con los mismos valores de nutrimentos en el suelo pero sin recibir fertilización, no logró mantener los rendimientos de campo, los cuales disminuyeron conforme a los ciclos de cultivo (Cuadro 1). El contenido de fósforo extractable (P-Olsen), a pesar de que se clasificó como alto, aportó 34.3 kg ha⁻¹ de P₂O₅, lo que no abastece la demanda del cultivo de la caña de azúcar (Palma *et al.*, 2002). Al respecto, Willcox (1991) recomendó aplicar una dosis

Cuadro 2. Ingreso neto para las DOEF[†] en caña de azúcar.

Ciclo de cultivo	Dosis	Costo de dosis	Rendimiento	Ingreso neto
	N P ₂ O ₅ K ₂ O			
	kg ha ⁻¹	\$ ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	\$ ha ⁻¹
Plantilla	170-90-100	1273.8	163.7	37,032
Soca	170-85-85	1194.2	137.0	30,863
Resoca	190-100-100	1366.7	109.9	24,326

[†] Dosis óptima económica de fertilización.

Cuadro 3. Efecto de la fertilización sobre la calidad del jugo de la caña de azúcar.

Trat. No.	Dosis N P K	Grados Brix	Pureza	Sacarosa	Humedad
----- % -----					
8	160-80-80	20.3 a [†]	93.0 a	13.06 a	73.3 a
9	80-40-40	18.6 a	90.9 a	12.25 a	71.2 a
12	160-120-80	19.5 a	91.7 a	12.90 a	70.0 a
14	160-80-120	17.3 a	91.6 a	11.38 a	74.3 a
15	0-0-0	18.4 a	90.1 a	11.95 a	73.0 a
CV (%)		8.4	1.9	9.9	4.9
Media:		18.5	91.5	12.41	72.2
Prob. F. (Trats.)		0.26 ns	0.40 ns	0.29 ns	0.62 ns
DSH:		4.48	4.88	3.47	9.98

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

ns: No significativo.

Cuadro 4. Algunas propiedades químicas iniciales de un Vertisol, y a cinco años de cultivo con caña de azúcar con diferentes tratamientos de fertilización.

Trat. No.	Dosis de N P K	pH	MO	Nt	P Olsen	K	Ca	Mg	Relación	
									C/N	Ca/Mg
			----- % -----		mg kg ⁻¹		----- Cmol (+) kg ⁻¹ suelo -----			
8	160-80-80	6.5 a [†]	3.4 a	0.10 a	17.7 a	0.28 a	28.7 a	13.6 a	19.7	2.1
9	80-40-40	6.7 a	2.4 a	0.10 a	17.4 a	0.31 a	26.6 a	11.4 a	13.9	2.3
12	160-120-80	6.4 a	2.2 a	0.11 a	22.7 a	0.35 a	27.4 a	13.4 a	11.6	2.0
14	160-80-120	6.5 a	2.5 a	0.10 a	20.4 a	0.32 a	28.0 a	12.2 a	14.5	2.2
15	0-0-0	6.6 a	2.6 a	0.11 a	15.2 a	0.28 a	28.4 a	12.3 a	13.7	2.3
CV (%)		2.9	29.6	6.1	15.3	9.5	3.5	17.3		
Media:		6.5	2.6	0.10	18.7	0.31	28.7	12.6		
Prob. F Trats.		0.43 ns	0.42 ns	0.24 ns	0.09 ns	0.09 ns	0.17 ns	0.72 ns		
DSH:		0.54	2.2	0.01	8.0	0.08	2.8	6.1		
Muestreo inicial del suelo		6.6	2.2	0.13	15.0	0.27	18.4	8.87	9.8	2.0

[†] Medias con la misma letra dentro de la misma columna son iguales estadísticamente. Tukey ($P \leq 0.05$). ns = no significativo.

de 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para suelos con 11 mg kg⁻¹ de P. Sin embargo, los datos obtenidos indican que no es posible extrapolar recomendaciones, ya que la precipitación, la temperatura y el manejo del cultivo afectan el suministro de nutrientes; el Vertisol éutrico, para maximizar el rendimiento de caña, requiere de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅. El contenido de potasio intercambiable (Ki) es bajo y aportó únicamente 252 kg ha⁻¹ de K₂O, cantidad que no abastece la demanda del cultivo de 321 kg ha⁻¹, por lo que la planta extrae K no intercambiable de las reservas del suelo (Kapur, 1994). Se observó un incremento en los contenidos de calcio (Ca) y magnesio (Mg) extractables, que se clasificaron como altos, lo cual puede ocasionar antagonismo en la absorción del K por la planta. Estos altos contenidos de Ca y Mg se deben al efecto de la quema de los residuos de la caña que tienden a acumularse en la

capa superficial; Salgado *et al.* (2001a) reportaron el mismo efecto. La relación Ca/Mg de 2.3 difiere de la relación de 6, recomendada para suelos cañeros por González *et al.* (1974). Lo anterior indica que se debe aplicar yeso al suelo para balancear dicha relación. La textura del suelo es arcilla, con una alta capacidad para retener humedad, siendo necesario implementar el drenaje superficial, para favorecer la aireación del suelo y reducir los riesgos de la desnitrificación (Weier *et al.*, 1996).

CONCLUSIONES

La caña de azúcar respondió significativamente a la aplicación de fertilizantes. Mediante la optimización de insumos en los modelos de regresión seleccionados, se determinó que con las dosis de fertilización 170-90-100, 170-85-85 y 190-100-100

kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente, se obtuvieron los mayores rendimientos calculados de caña en los tres ciclos de cultivo (164, 137.5 y 110 Mg ha⁻¹), ya que dosis mayores de N, P y K abatieron los rendimientos de caña, lo cual sugiere que la dosis usada en la actualidad por el ingenio es insuficiente para satisfacer los requerimientos del cultivo de caña. El rendimiento se abatió conforme a los ciclos de cultivo. Las dosis de fertilización no modificaron los grados Brix, la pureza, el porcentaje de sacarosa y el contenido de humedad, lo que indica que las dosis óptimas económicas permiten incrementar los rendimientos sin disminuir la calidad del jugo de caña. A los cinco años de cultivarse caña de azúcar, el Vertisol éutrico no mostró cambios significativos en sus propiedades químicas, únicamente se observó que la relación Ca/Mg está desbalanceada, siendo recomendable aplicar yeso, para evitar posibles antagonismos en la absorción de K y Mg, sin alterar el pH del suelo.

LITERATURA CITADA

- Chen, J.C.P. 1991. Manual de Azúcar de Caña. LIMUSA. México, D.F.
- CNIAA. Cámara Nacional de la Industria Azucarera y Alcohólica. 1999. Desarrollo operativo campo-fábrica 1993/1998. México, D.F. <http://www.sagar.gob.mx>.
- De Stefano, R.P. 1985. False pol in sugar cane juice-causes and detection. *J. Am. Soc. Sugar Cane Techn.* 4: 80-85.
- Golcher A., A., R.F. Hasbach y M.J.J. Infante. 1984. Manual para Analistas de Laboratorio Azucarero. AZUCAR, S.A. de C.V.-GEPLACEA-PNUD. México, D.F.
- González G., A., B. Ortiz V. y C.I. Pascual P. 1974. Sazonado y maduración de la caña de azúcar. CNIA. Serie Divulgación Técnica IMPA Libro 8. México, D.F.
- Humbert, R.P. 1974. El cultivo de la caña de azúcar. Ed. Continental. México, D.F.
- IMPA. Instituto para el Mejoramiento de la Producción del Azúcar 1986. Informe Técnico. Sumario 6. Sept-Dic. México, D.F.
- Jones, B.J., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook. Micro-Macro Publishing. Athens, GA.
- Kapur, M.L. 1994. Changes in available phosphorus and potassium after sugarcane and nutrient requirement for its maintenance. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 42-9: 663-665.
- Lingle, S.E. y C.R. Smith. 1991. Sucrose metabolism related to growth and ripening in sugarcane. *Crop Sci.* 34: 1279-1283.
- Martínez G., A. 1988. Diseños experimentales: Métodos y elementos de teoría. Trillas. México, D.F.
- Palma L., D.J., S. Salgado G., A. Trujillo N., J.J. Obrador O., L.C. Lagunes E., J. Zavala C., A. Ruiz B. y M.A. Carrera M. 2002. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). *Terra* 20: 347-358.
- Robertson, M.J., R.C. Muchow, A.W. Wood y J.A. Campbell. 1996. Accumulation of reducing sugars by sugarcane: Effects of crop age, nitrogen supply and cultivar. *Field Crop Res.* 49: 39-50.
- Salgado G., S., D.J. Palma L. y J. Cisneros D. 1999. Procedimientos para la toma de muestras de suelos, planta y agua e interpretación en cultivos tropicales. Campus Tabasco, Instituto de Recursos Naturales, 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. 2000. Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* 34: 689-698.
- Salgado G., S. L. Bucio A., D. Riestra D. y L.C. Lagunes E. 2001a. Caña de azúcar: Hacia un manejo sustentable. Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados-Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México.
- Salgado G., S., R. Núñez E., J.J. Peña C., J.D. Etchevers B., D.J. Palma L. y R. Marcos Soto. 2001b. Eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante en soca de caña de azúcar sometida a diferentes manejos de fertilización. *Terra* 19: 155-162.
- SAS Institute. 1996. SAS/STAT User's Guide: Statistics. Release 6.11. Cary, NC.
- Turrent F., A. 1985. El método gráfico-estadístico para la interpretación económica de experimentos conducidos con la Matriz Plan Puebla I. Folleto 5. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Weier, K.C., C.W. Mc Ewan, 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.
- Willcox, T. 1991. Fertilizer selection strategy may reduce production costs. *Bulletin* 35. Bureau Sugarcane Experimental Station. Australia.

MUESTREO Y ANÁLISIS FOLIAR RELACIONADOS CON FENOLOGÍA EN MANGO EN EL SUR DE SINALOA, MÉXICO

Sampling and Phenology-Related Nutrient Concentrations in Mango in Southern Sinaloa, Mexico

Daniel Benitez-Pardo¹, Migdonio Hernández-Montoya², Tomas Osuna-Enciso²,
Marino Valenzuela-López² y Blas Galván-Piña²

RESUMEN

Con el fin de determinar el área de muestreo en la copa y definir el requerimiento mineral en mango (*Mangifera indica* L.), se eligieron 10 árboles para realizar muestreos foliares y determinar el contenido nutrimental. El experimento involucró 12 tratamientos con 10 repeticiones, en un arreglo factorial de $2 \times 3 \times 2$, donde 2 se refiere a los puntos cardinales norte y sur, 3 indica los estratos bajo, medio y apical de la copa y 2 significa los entrenudos I subterminal y II terminal de los flujos vegetativos. Se utilizó un diseño por bloques al azar. Los muestreos fueron mensuales y se determinaron N total, N-NO_3^- , P-PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y S. La mayor concentración de nutrimentos se encontró antes y después del desarrollo de frutos, con excepción del Ca^{2+} , cuya concentración resultó 37.3 g kg^{-1} al finalizar el desarrollo de frutos y 31.3 g kg^{-1} en el periodo de quiescencia. El N total fue mayor al sur con 16.1 g kg^{-1} comparado con el norte que fue de 14.9 g kg^{-1} . El Mg^{2+} con 1.38 g kg^{-1} en el sur fue mayor que en el norte con 1.25 g kg^{-1} . Los estratos bajo y medio de la copa presentaron mayor concentración para casi todos los minerales estudiados. En los entrenudos, el más móvil fue el N total, con mayor concentración en los entrenudos II con 16.1 g kg^{-1} . El Ca^{2+} con 35.1 g kg^{-1} fue el nutrimento de mayor concentración en hojas viejas (Entrenudo I). El análisis estadístico no demostró interacciones entre los factores estudiados. Según estos resultados, es recomendable realizar los muestreos foliares en el estrato medio de la copa en una franja amplia, en forma de zig-zag, y en los cuatro

puntos cardinales, en hojas de dos a cuatro meses y mensualmente o, como mínimo, en cada etapa fenológica.

Palabras clave: (*Mangifera indica* L.), muestreo foliar, contenido nutrimental, periodo reproductivo, edad de las hojas.

SUMMARY

Monthly, leaves of 10 mango trees were sampled to determine the part of the canopy that should be sampled to obtain information on the nutritional requirements of mango trees (*Mangifera indica* L.) in different phenological stages. Samples were obtained with a $2 \times 3 \times 2$ randomized block sampling design (northern or southern side; lower, middle or apical canopy; subterminal (I) or terminal (II) internodes). Total N, K, Mg^{2+} , and S, as well as N-NO_3^- and P-PO_4^{3-} were higher before and after fruit bearing, but Ca^{2+} decreased from 37.3 g kg^{-1} during fruit development to 31.3 g kg^{-1} during quiescence. N and Mg concentrations were higher on the southern side of the canopy, with 16.1 and 1.38 g kg^{-1} , respectively, compared with 14.9 g kg^{-1} and 1.25 g kg^{-1} of the northern leaves. Most nutrients were more abundant in the lower and middle parts of the canopy. The young leaves of the terminal internode were richer in total N, with 16.1 g kg^{-1} , but the older ones of Internode I had a higher concentration of Ca^{2+} (35.1 g kg^{-1}). There were no interactions among the variables considered and results suggest that samples should be two to four months old leaves obtained from a wide zig-zag band of the middle canopy, either at monthly intervals or at least in each phenological stage.

Index words: (*Mangifera indica* L.), leaf samples, nutrient contents, reproductive stage, leaf age.

¹ Facultad de Ciencias del Mar. Paseo Claussen s/n, Apartado Postal 610, Col. Los Pinos, 82000 Mazatlán, Sinaloa. (dbpardo6@hotmail.com)

² Facultad de Agronomía. km. 17.5 carretera Culiacán-El Dorado, Culiacán, Sinaloa.

INTRODUCCIÓN

En México, se cultivan alrededor de 152 000 ha de mango distribuidas en 26 estados y México es el principal exportador y el segundo productor de mango en el mundo.

El estado de Sinaloa cuenta con 17 000 ha plantadas de mango y es sólo superado por los estados de Veracruz, Guerrero, Oaxaca y Nayarit (SARH, 1996). En Sinaloa, la producción promedio de mango es de 7 Mg ha⁻¹ con cultivo de temporal y hasta 30 Mg ha⁻¹ en zona de riego, alcanzando una producción de 170 030 Mg ha⁻¹ aproximadamente, de las cuales se exportan cerca de 51 009 Mg ha⁻¹ (SAGAR, 1997).

En la literatura sobre mango, existen estudios con mayor enfoque hacia plagas y enfermedades (Villapudua, 1991), manejo de floración (Golez y Zamora, 1996; Shongwe y Roberts-Nkruma, 1996), tipo de podas (Goguey, 1996), caracterización nutricional del fruto, de la epidermis del fruto y la semilla (Sapiens, 1996; Bojórquez, 1997; Soto, 1997) y postcosecha (Yahía, 1997). Sin embargo, un aspecto de interés para producir con calidad y cantidad es la fertilización.

En el cultivo del mango no se han hecho suficientes estudios para cumplir de manera satisfactoria con el manejo nutricional de los árboles. Los aspectos fundamentales a considerar en la fertilización son: el análisis foliar (Guzmán, 1988; FIRA, 1992; Pelayo-Saldívar, 1992; Mosqueda *et al.*, 1996), el tipo de suelo y la calidad del agua de riego. Esto con el fin de obtener un máximo rendimiento a bajo costo (Mata y Mosqueda, 1995). A través de los resultados del análisis foliar, es posible correlacionar el contenido nutrimental de toda la planta con su apariencia, metabolismo, crecimiento y desarrollo (Ulrich, 1952; Bates, 1971). También, estos estudios auxilian para llevar un programa de fertilización adecuado que permita mejorar y aumentar la producción significativamente. Por otra parte, con la dosificación adecuada de fertilizante disminuirán los riesgos de contaminación de suelos y aguas.

Muchos investigadores, quienes han realizado análisis foliar, han concluido que para una buena afinación de esto, es importante tomar en cuenta la edad de la hoja (Koo y Young, 1972; Guzmán, 1988), posición de la hoja (Koo y Young, 1972), punto cardinal (Chadha *et al.*, 1980) y posición en la copa de los árboles (Chadha *et al.*, 1980). Con respecto al número de hojas para una muestra óptima, Kenworthy

(1964) señaló 20 hojas; Barbery *et al.* (1978): 30 hojas; Rajput *et al.* (1985) indicaron de 30 a 40 hojas; y Koo y Young (1972), Kenworthy (1964) y Gontijo (1982) mencionaron que son convenientes 60 hojas por muestra. Sin embargo, el contenido mineral en los árboles de mango también varía de acuerdo con el material genético (Young y Koo, 1969; Avilán *et al.*, 1974), además, las condiciones de clima, tipo de suelo y cultivares (Koo y Young, 1972; Guzmán, 1988).

En relación con lo escrito anteriormente, se observa que evaluar el contenido nutrimental foliar en árboles de mango para una variedad y una región determinada es muy discutido. Ante esta situación, se consideró necesario realizar el presente estudio encaminado a contribuir en el conocimiento sobre el requerimiento nutrimental de los árboles de mango de la variedad Kent y tomar en cuenta las diferentes etapas fenológicas. Asimismo, es de interés determinar el área de la copa donde deben realizarse los muestreos foliares para el análisis del contenido nutrimental. Esto contribuirá a elaborar un diagnóstico confiable del estado nutrimental de los árboles, así como de los requerimientos macronutrientales a través del ciclo productivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en una huerta de mango, variedad Kent, de 10 años de edad, ubicada a 23° 26' 50" N y 106° 34' 88" O. Esta información se obtuvo con un posicionador geográfico vía satélite (GPS38 Garmin). La huerta se localiza en el municipio de Concordia, Sinaloa, México.

La región presenta clima cálido subhúmedo de sabana y semicálido-semiseco, lluvioso en verano con un índice medio de 898.6 mm, 1594.3 mm máximo y 529.1 mm mínimo. Temperatura media anual de 24 °C, con una máxima de 40 °C y una mínima de 2 °C. Se encuentra a una altitud de 120 m (Gobierno del Estado de Sinaloa, 1990; INEGI-Gobierno del Estado de Sinaloa, 1992).

El manejo agronómico del huerto consistió en deshierbes, fertilización, podas y control de plagas, enfermedades y riego por goteo, con el cual se produjeron aproximadamente 11 462 Mg ha⁻¹ en el periodo de estudio.

Se eligieron al azar diez árboles con el fin de realizar los muestreos foliares y determinar el contenido nutrimental. Se realizaron muestreos

foliares mensuales durante 10 meses en el periodo de enero a octubre de 1998.

Al principio del estudio, y por una sola vez, se analizó el contenido de minerales del suelo y agua de riego.

Análisis de Agua de Riego

Previo al inicio del estudio, se tomaron muestras de agua con la finalidad de conocer sus características químicas y el contenido total de sales, como: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} (cationes), los cuales se cuantificaron con un espectrofotómetro de absorción atómica (Marca Perkin Elmer, modelo 2280). NO_3^- , PO_4^- y SO_4^- se determinaron por colorimetría con el método de la brucina, indicador de Fiske (Strickland y Parsons, 1972) y cloruro de bario (turbidimétrico), respectivamente. El resto de los aniones $\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-$ y Cl^- se determinaron por titulación con H_2SO_4 0.01 N y AgNO_3 al 0.05 N, respectivamente. El pH del agua fue de 7.75 y la conductividad eléctrica (CE) de 0.83 dS m^{-1} .

Análisis de Suelo

Se tomaron muestras de suelo antes de iniciar el estudio para conocer las características físicas y químicas del mismo. Para el análisis, se utilizaron muestras de 2 kg, tomadas a una profundidad de 0 a 30, 30 a 60, 60 a 90 y 90 a 120 cm y de 10 a 15 cm del emisor o gotero de riego de los árboles.

Se determinaron textura, fertilidad y salinidad. La textura se determinó por el método del hidrómetro de Bouyoucos (Bouyoucos, 1951); para fertilidad: el contenido de materia orgánica (MO) por el método de digestión húmeda modificado por Walkley y Black (Jackson, 1964); pH con el potenciómetro; K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , PO_4^{3-} y SO_4^{2-} se analizaron con los métodos descritos para las muestras de agua de riego.

Con referencia a la salinidad se determinaron CE, pH y los iones solubles NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y S. El pH y la CE se determinaron a partir del extracto de la pasta de saturación del suelo. CO_3^- y HCO_3^- se cuantificaron por titulación con H_2SO_4 0.01 N y Cl^- se determinó por titulación con AgNO_3 0.05 N.

Muestreo Foliar

El muestreo foliar consistió en hojas completas que se recolectaron de la copa (4 m de altura aproximadamente) de los árboles que se dividió en

tres estratos: el primero (A) comprendió de 0 a 1.30 m en la parte basal de la copa, el segundo (B) se localizó de 1.30 a 2.60 m en medio de la copa y finalmente (C) de 2.60 a 3.5 m en la parte apical de la copa y, en los puntos cardinales norte y sur (N y S) de la copa. Además, se consideraron dos entrenudos, el uno (I) que se ubicó entre los nudos antepenúltimo y penúltimo (subterminal) y el dos (II) se localizó entre los nudos penúltimo y último (terminal). Se trató de que las hojas tuviesen entre tres y siete meses de edad y que provinieran de ramas sin fruto como lo indicaron Koo y Young (1972) y Guzmán (1988). Asimismo, los muestreos mensuales se relacionaron con las etapas fenológicas: inicio de floración (IF), floración (F), amarre de frutos (AF), desarrollo de frutos (DF), madurez de frutos (MF), cosecha (C), quiescencia (Q) y brotación vegetativa (BV). Estas se asociaron con el contenido nutrimental en las hojas, como respuesta biológica del árbol de mango cv. Kent.

Las observaciones consistieron en lo siguiente: Colectar hojas que pertenecían a la orientación cardinal N o S, a los estratos de la copa bajo (A), medio (B) o apical (C) y entrenudo I ó II. Dicho de otra manera, una observación por ejemplo consistió en hojas de la posición cardinal N, estrato bajo y del Entrenudo I (NAI).

Análisis Nutrimental

La muestra foliar analizada estuvo compuesta de: tres hojas por entrenudo (I ó II), de las orientaciones N o S y del estrato correspondiente A, B o C de los 10 árboles seleccionados, sumando 30 hojas por muestra por observación.

Preparación y Análisis de las Hojas

Las hojas se lavaron con agua destilada y se secaron en una estufa con circulación de aire forzado a temperatura de 70°C durante 30 h. Para su análisis se molieron en un molino con malla 20, y se determinaron los siguientes nutrimentos: N- NO_3^- , N total, PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-} .

Para el análisis de K^+ , Ca^{2+} , y Mg^{2+} , y SO_4^{2-} , primero se hizo la digestión húmeda de las muestras, para lo cual se aplicaron 3 mL de ácido nítrico y 1.5 mL de ácido perclórico; posteriormente la concentración del mineral se determinó con el espectrofotómetro de absorción atómica.

El PO_4^{3-} se determinó por colorimetría con el método del indicador de Fiske (Strickland y Parsons, 1972). El NO_3 se determinó por el método de la Brucina y para el N total se usó el método de Kjeldahl (Bradstreet, 1965; Moréis, 1983).

En este estudio, las hojas se colectaron siguiendo un diseño de bloques completos al azar en un arreglo factorial $2 \times 3 \times 2$ (2, orientación cardinal N y S; 3, estratos bajo, medio y apical y 2, posición de los entrenudos: subterminal y terminal). Para el análisis estadístico se utilizó el paquete SAS, versión 6 (SAS Institute, 1985). Se realizaron el análisis de varianza y la prueba de medias Tukey a 5% de probabilidad de error.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis químico del suelo donde se localiza la huerta de mango estudiada y del agua que se utilizaba para riego, no son propiamente resultados que tengan que ver con los objetivos del presente estudio, pero se considera importante incluirlos como referencia para el análisis y la discusión del análisis foliar.

Agua de Riego

En el Cuadro 1, se presentan las características del agua de riego. El pH fue de 7.75 y la CE de 0.83 dS m^{-1} . En el mismo cuadro, se presenta información sobre las concentraciones de los nutrimentos. De acuerdo con estos resultados, el

Cuadro 1. Análisis del agua utilizada en los riegos de la huerta de mango cv. Kent.

Propiedades del agua		Magnitud de las propiedades	
		me L^{-1}	mg L^{-1}
pH	7.75		
CE [†]	0.83 dS m^{-1}		531.00
Nitratos (N-NO_3^-)		0.21	13.25
Fosfatos (P-PO_4^{3-})		0.02	0.65
Potasio (K^+)		0.04	1.56
Calcio (Ca^{2+})		3.62	72.54
Magnesio (Mg^{2+})		1.86	22.61
Sodio (Na^+)		2.78	63.91
RAS [‡]	1.68		
Sulfatos (SO_4^{2-})		0.20	0.54
Cloruros (Cl^-)		4.18	148.22
Carbonato (CO_3^{2-})s		0.40	12.00
Bicarbonatos (HCO_3^{-1})		3.30	201.33

[†] CE = conductividad eléctrica; [‡] RAS = relación de absorción de sodio.

agua es de buena calidad con la excepción del pH que es ligeramente alcalino y que indica la existencia de HCO_3^- .

Suelo

En el Cuadro 2, se presentan datos sobre fertilidad del suelo: el valor promedio para MO fue de 0.5%, lo que indica un suelo muy pobre, una CE de 0.30 dS m^{-1} y el valor promedio del pH fue de 6.16, considerado adecuado para el desarrollo del cultivo del mango. En el Cuadro 4, se presentan valores medios en porcentaje de la textura del suelo y se observa que la arena predomina en todas las profundidades donde se tomaron las muestras. La información sobre las sales solubles se encuentra en el Cuadro 4A; además, se anexa información sobre fuentes, dosis y fechas de aplicación de fertilizantes utilizados en la nutrición de la huerta estudiada.

Análisis Foliares

Con respecto a la información sobre el contenido y la dinámica nutrimental en hojas de mango, en los factores estudiados y las diferentes etapas fenológicas consideradas, se observó para el N total un valor promedio de 16.1 g kg^{-1} en la posición cardinal S, el cual es significativo con relación al valor promedio 14.9 g kg^{-1} del punto cardinal N (Figura 1A; Cuadros 5 y 6).

En relación con la concentración de N total entre los estratos, la diferencia se encontró entre el estrato basal (A) con una media de 14.8 g kg^{-1} y el estrato apical (C) con una media de 15.9 g kg^{-1} (Cuadro 5). Es posible que esto venga a reforzar la hipótesis de que el mango produce más en la parte baja de la copa (Mosqueda *et al.*, 1996) (Figura 1A).

Para el caso del factor entrenudo, se observó un valor de 16.1 g kg^{-1} del Entrenudo II (hojas de tres a cuatro meses) y en el Entrenudo I presentó un valor de 14.8 g kg^{-1} (hojas de cuatro a siete meses) (Figura 1A), diferencia que, de acuerdo con el análisis de varianza, no es significativa.

Para las fechas de muestreo, se observó que la significancia se localizó entre el Muestreo 1 que corresponde a enero con respecto a marzo, abril y mayo con valores de 19.3 g kg^{-1} y 15.2, 15.0 y 14.1 g kg^{-1} , respectivamente, los cuales coinciden con las etapas fenológicas de IF, AF y DF (Figura 2A).

Cuadro 2. Fertilidad del suelo de la huerta de mango cv. Kent.

P [†]	MO [‡]	pH	CE [§]	N-NO ₃	P-PO ₄	K	Ca	Mg	S
cm	%		dS m ⁻¹	mg kg ⁻¹					
0-30	0.27	5.93	0.23	7.1	40.5	38	1160	110	12
30-60	1.30	6.89	0.50	14.7	40.5	97	1050	140	9
60-90	0.23	5.81	0.24	8.1	16.2	43	700	100	9
90-120	0.20	6.03	0.26	8.1	25.1	34	680	100	6

[†]P = profundidad de muestreo; [‡]MO = materia orgánica; [§]CE = conductividad eléctrica.

Cuadro 3. Análisis químico del suelo de la huerta de mango cv. Kent.

P [†]	PS [‡]	pH	CE [§]	NO ₃	PO ₄	K	Ca	Mg	RAS	SO ₄	CO ₃	HCO ₃
cm			dS m ⁻¹	me L ⁻¹								
0-30	33	6.17	0.23	0.58	0.07	0.11	1.07	0.35	0.93	0.08	0.00	0.76
30-60	33	7.07	0.50	1.36	0.10	0.34	2.87	0.86	0.69	0.21	0.00	1.32
60-90	33	6.27	0.24	0.64	0.07	0.07	1.12	0.49	0.78	0.06	0.00	0.76
90-120	33	6.22	0.26	0.70	0.10	0.07	1.27	0.45	0.90	0.08	0.00	0.68

[†]P = profundidad de muestreo; [‡]PS = porcentaje de saturación RAS = relación de absorción de sodio; [§]CE = conductividad eléctrica.

También, el muestreo de febrero (F) es significativo con respecto a los muestreos de mayo que correspondió al desarrollo de frutos (DF) y julio época de cosecha (C) con valores de 16.9 g kg⁻¹ y 14.1 g kg⁻¹ y 13.4 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 2A; Cuadro 6). Es posible que el valor más alto 19.3 g kg⁻¹, que se presentó en enero, se deba a que en este mes fue el periodo más frío en la zona, además de la presencia de nubosidad. En la Figura 2A, se aprecia que en la etapa de desarrollo de frutos es cuando existe una mayor demanda de N, por lo que hay menor concentración en las hojas.

En el presente trabajo, se encontraron 15.5 g kg⁻¹ de N como concentración promedio, durante el desarrollo de frutos. El valor más alto fue 19.3 g kg⁻¹, mientras que el valor más bajo fue 13.4 g kg⁻¹. Guzmán (1988) encontró 15.7 g kg⁻¹ como valor promedio en mango cv. Manila. Young y Sauls (1989) establecieron como rango satisfactorio de 10 a 15 g kg⁻¹, mientras que Galán (1990) propuso 12 a

Cuadro 4. Contenido de arena, limo y arcilla del suelo de la huerta de mango cv. Kent.

P [†]	Textura		
	Arena	Arcilla	Limo
cm	%		
0-30	59	20	21
30-60	65	13	22
60-90	77	9	14
90-120	85	7	8
Media	71.5	12.25	16.25

[†]P = profundidad de muestreo.

14 g kg⁻¹. También, Bhargava y Chadha (1988) encontraron 12.3 g kg⁻¹ como valor crítico y Osuna (1998) encontró en hojas de mango 'Manila' concentraciones de 12 g kg⁻¹ como mínimas y 16 g kg⁻¹ como máximas en un suelo rico en materia orgánica. Chaudhary *et al.* (1988) encontraron en varios cultivares de mango en suelos fertilizados y no fertilizados rangos que van desde 16.5 g kg⁻¹ a 19.0 y de 15.4 a 15.9 g kg⁻¹, respectivamente.

Nitratos. En la presente investigación se observó que en relación con fechas de muestreo existe una gran fluctuación en el contenido de nitratos; el muestreo de agosto, que coincide con la parte final de la quiescencia, presentó una media de 1258 mg L⁻¹ con relación a los muestreos de octubre, enero y marzo con valores de 852.17, 616.9 y 589.3 mg L⁻¹, respectivamente, que coinciden con la brotación vegetativa, inicio de floración y amarre de frutos (Figura 2B; Cuadro 6). La diferencia es aún mayor con respecto al Muestreo 4 y 5 que representan a los meses de abril y mayo. Este periodo corresponde a una fase importante de desarrollo de los frutos y presentó una media de 584.50 y 599.2 mg L⁻¹.

Para el caso de los estratos, en la parte apical de la copa se obtuvo un valor de 890 mg L⁻¹ y en la parte basal de 775.5 mg L⁻¹ (Figura 1B; Cuadro 5).

Fosfatos. Con respecto a los factores estudiados, sólo se encontró diferencia significativa en el estrato basal con 917.5 mg L⁻¹ en relación con los estratos medio y apical con valores de 861.9 y 833.8 mg L⁻¹, respectivamente (Cuadro 5). En las fechas de muestreo, existió diferencia significativa (Cuadro 6)

Cuadro 4A. Fuentes, dosis y fechas de aplicación de fertilizantes utilizados en la nutrición del mango cv. Kent.

Mes	Fuente	Dosis árbol ⁻¹	Unidades del elemento							
			N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	
								g árbol ⁻¹ año ⁻¹		
Mar	Sulfato de amonio	58 g	12.18						13.9	
	Acido fosfórico	18 mL		15.9						
	Magnesio 3%	28 mL						8.4		
Abr	Sulfato de amonio	267 g	58.87						67.86	
	10-34-00	58 mL	5.8	19.72						
	Nitrato de potasio	220 g	28.6		96.8					
	Magnesio	23 mL						6.9		
	Zinc 10%	18 mL								1.8
May	Acido fosfórico	51 mL		29.77						
	Nitrato de potasio	279 g	43.24		78.12					
	Nitrato de calcio	203 g	31.46			56.86				
	Magnesio 3%	23 mL						6.9		
Jun	Acido fosfórico	27 mL		23.86						
	Nitrato de potasio	11 g	1.7		3.08					
	Nitrato de calcio	116 g	17.98			32.98				
	Total árbol ⁻¹		199.83	89.25	178	89.84	22.2	81.76	1.8	

Cuadro 5. Concentración promedio de los nutrimentos estudiados (basado en materia seca) en hojas de mango cv. Kent, así como los resultados de los análisis de varianza de los factores considerados.

Factor [†]	Nivel [‡]	N total	N-NO ₃	P-PO ₄	Ca	Mg
		g kg ⁻¹	mg L ⁻¹		g kg ⁻¹	
Posición	N	14.9 a				1.38 a
	S	16.1 b				1.25 b
DMS		0.70				0.11
Sig.		**				*
Estratos	A	14.8 b	775.9 b	917.5 a	36.2 a	
	B	15.7 ab	870.2 ab	861.9 b	33.9 b	
	C	15.9 a	890.6 a	833.8 b	31.9 c	
DMS		1.02	103.73	50.53	1.92	
Sig.		*	*	**	**	
Entrenudo	I	14.8 b			35.1 a	
	II	16.1 a			32.9 b	
DMS		0.70			1.31	
Sig.		**			**	

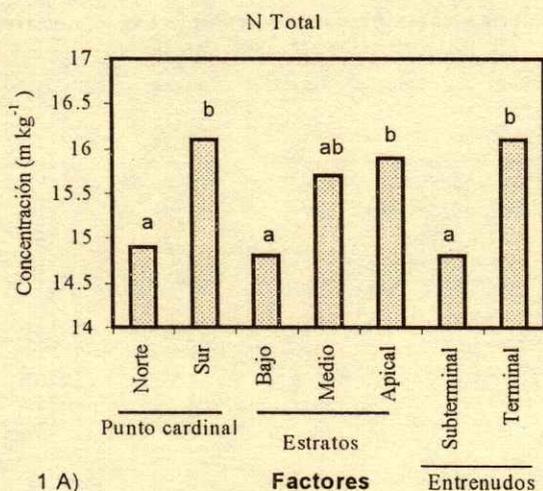
[†] DMS = diferencia mínima significativa a 5% de probabilidad; Sig. = significancia, ** = altamente significativo a P < 0.01, * = significativo a P < 0.05.

[‡] N = norte, S = sur, A = estrato basal, B = estrato medio, C = estrato apical, I = subterminal, II = terminal

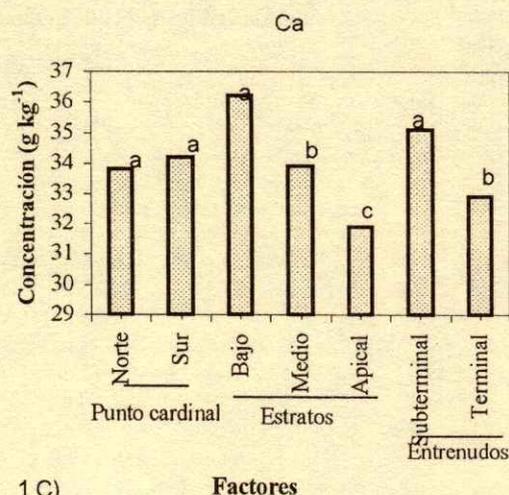
entre los muestreos de enero con una media de 984.08 mg L⁻¹, que coincide con el inicio de la floración, y el muestreo de mayo que presentó un valor promedio de 599.25 mg L⁻¹. Este muestreo se efectuó al final de la etapa de desarrollo de frutos (Figura 2B, Cuadro 6).

El P interviene en la iniciación y diferenciación floral y amarre de frutos, sin embargo, su aprovechamiento tiene relación con el pH, ya que en un rango de 6.5 a 7.5 es más difícil su absorción (Mosqueda *et al.*, 1996). Por otro lado, Guzmán (1988), en un estudio

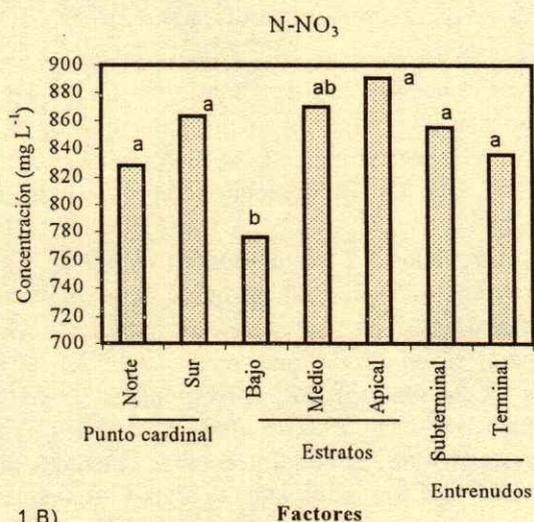
realizado en Veracruz, Ver., indicó que en hojas de mango 'Manila', en las fases de floración y fructificación, la concentración de P disminuye ligeramente (1.0 a 1.3 g kg⁻¹) y aumenta (0.9 a 1.6 g kg⁻¹) en la fase vegetativa. Si se comparan los valores encontrados por este último autor y los encontrados en el presente trabajo (0.5 a 0.9 g kg⁻¹), la diferencia entre estos valores quizás se deban a que en el estado de Veracruz, las fases fenológicas vegetativas y de fructificación ocurren en épocas diferentes a las del sur de Sinaloa.



1 A)



1 C)



1 B)

Figura 1. Concentración mineral en hojas de mango cv. Kent en los elementos cuantificados. A) N y B) Ca; C) N-NO₃ y D) P-PO₄. N = norte, S = sur, A = basal, B = medio y C = apical, I = terminal y II = subterminal. IF = inicio de floración, F = floración, AF = amarre de frutos, FM y C = fin de maduración y cosecha, Q = quiescencia y BV = brotación. Barras con las mismas letras en cada elemento cuantificado son estadísticamente iguales. Mediante la prueba de separación de media de Tukey con X = 0.05.

asimismo, en el mes de enero cuando IF en la región. Sin embargo, en relación con los meses de junio en la madurez de frutos (M de F), julio cuando se cosecha (C), agosto en etapa de quiescencia (Q), septiembre y octubre etapa de brotación (BV) con valores promedio de 9.42, 7.59, 6.69, 6.87 y 8.1 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 2A; Cuadro 6).

Los valores promedio de K en las diferentes etapas fenológicas fluctuaron entre 7.0 a 9.9 g kg⁻¹ y se aprecia que la menor concentración (7.0 g kg⁻¹) coincide con la fase de quiescencia e inicio de brotación y la mayor concentración (9.99%) concuerda con la etapa de floración. Sin embargo, la tendencia a la baja del K inicia con la etapa de desarrollo de frutos, hasta llegar al inicio de la brotación (Figura 2A). Esto quizá explica que la mayor importancia de K radica en el efecto que tiene en el desarrollo y la producción de frutos (Mosqueda, 1996).

Las diferencias entre cantidades de K obtenidas en los factores estudiados no fueron significativas, con 8.82 y 8.14 g kg⁻¹ para posición cardinal, 8.12, 8.40 y 8.62 g kg⁻¹ para estratos y para entrenudos 8.04 y 8.32 g kg⁻¹.

La fluctuación de los valores obtenidos (Figura 2A) difiere del valor promedio recomendado como estándar por Biswas *et al.* (1987), el cual es 0.52%. Mata y Mosqueda (1995) citaron a Wolfe *et al.* (1969)

Los intervalos de suficiencia de P se encuentran entre 0.8 a 1.75 g kg⁻¹ (Koo y Young, 1972) y entre 0.8 a 1.8 g kg⁻¹ (Mosqueda *et al.*, 1996). Además, Chaudhary *et al.* (1988) encontraron en varios cultivares en suelos fertilizados y no fertilizados intervalos que van desde 1.3 a 1.4 y de 0.9 a 1.4 g kg⁻¹, respectivamente. En el presente estudio, se encontraron valores promedio entre 0.9 g kg⁻¹ para el más alto y el más bajo fue 0.6 g kg⁻¹. Quizás, el valor más bajo tiene que ver con la demanda de los frutos que en esta época estaban en su máximo desarrollo y posiblemente también, con el pH (7.7) alcalino del agua y el manejo de los riegos que no son constantes y sólo se dan de marzo a mediados de junio.

Potasio. Las diferencias más relevantes en el contenido de K se presentaron entre los meses de febrero en la F, mayo DF y octubre en plena B con medias de 9.99, 7.89 y 8.15 g kg⁻¹, respectivamente;

Cuadro 6. Concentración de minerales en las hojas de mango (basados en materia seca) cv Kent en diferentes fechas de muestreo y etapas fenológicas.

Mes de muestreo	Etapas fenológica [†]	N-NO ₃	P-PO ₄	N total	K	Ca	Mg	S
		----- mg L ⁻¹ -----			----- g kg ⁻¹ -----			
Ene	IF	616.92 dc	984.08 a	19.3 a	9.42 ab	34.3 ab	1.62 ab	0.82 a
Feb	F	1159.67 a	947.25 a	16.9 ab	9.99 a	32.5 b	1.61 ab	0.85 a
Mar	AF	589.33 d	860.25 a	15.2 bc	9.13 abc	34.0 ab	1.65 a	1.01 a
Abr	DF	584.50 d	904.42 ab	1.5 bc	8.75 abc	34.3 ab	1.42 abc	1.07 a
May	DF	599.25 dc	692.17 ab	14.1 c	7.89 bcd	32.6 ab	1.15 c	1.65 a
Jun	FD y MF	692.08 d	864.75 c	15.7 bc	7.24 cd	35.1 ab	1.08 c	0.96 a
Jul	FM y C	1121.33 a	903.42 ab	13.4 c	7.59 cd	37.3 a	1.20 bc	0.92 a
Ago	Q	1258.92 a	802.50 bc	14.6 bc	6.69 d	31.3 b	1.07 c	0.74 a
Sep	BV	1082.83 ba	881.58 ab	15.0 bc	6.87 d	34.7 ab	1.05 c	1.38 a
Oct	BV	852.17 bc	870.58 ab	15.5 bc	8.15 bcd	33.9 ab	1.25 abc	0.80 a
Media		855.7	871.10	14.12	8.17	34.0	1.31	1.02

[†] IF = inicio de la floración, F = floración, AF = amarre de frutos, DF = desarrollo de frutos, FD y MF = fin de desarrollo y madurez de frutos, FM y C = fin de madurez y cosecha, Q = quiescencia, BV = brotación vegetativa. Medias con letras iguales en columnas son estadísticamente iguales (Tukey 5%).

quienes indicaron como valor crítico 10 a 12 g kg⁻¹; Chaudhary *et al.* (1988) encontraron en varias variedades, en suelos fertilizados y no fertilizados valores de 4.5 a 5.0 g kg⁻¹ y de 4.6 a 6.7 g kg⁻¹, respectivamente. Estas diferencias, tal vez se deban a los ambientes diferentes de las regiones donde se han realizado las investigaciones. Además, la baja concentración coincidió con la etapa de menos riegos, y sobre todo en mayo y junio cuando los riegos fueron esporádicos. Sin embargo, con la llegada de las lluvias a mediados de julio en 1998, hubo un aumento ligero en la concentración de K (Figura 2A).

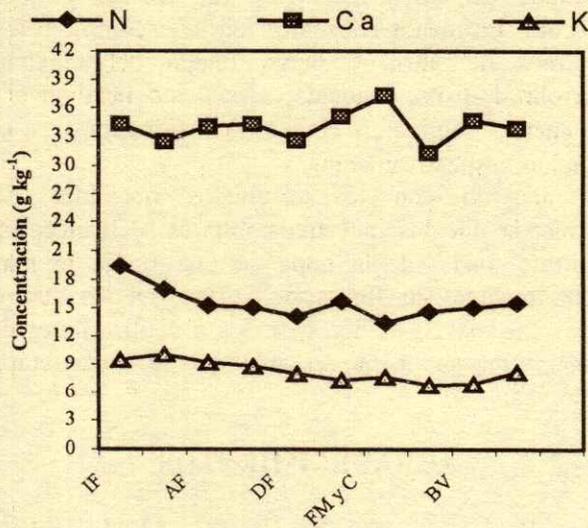
Calcio. La mayor concentración de Ca fue 36.2 g kg⁻¹ y se encontró en el estrato basal (A), y la menor 31.9 g kg⁻¹ en el estrato apical (Figura 1C; Cuadro 5). Entre fechas de muestreo, la mayor diferencia se observó entre el séptimo muestreo con una media de 37.3 g kg⁻¹ que corresponde a la etapa de fin de madurez de frutos y cosecha y los muestreos de febrero y agosto con valores de 32.5 y 33.1 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 2A; Cuadro 6). Dichas diferencias coinciden con la disposición de agua, debido a que la huerta se empezó a regar en marzo, continuando hasta mediados de junio. En mayo hubo escasez de agua por lo que se observó una baja en la concentración de Ca (Figura 2A); ésta vuelve a subir a finales de junio lo que posiblemente se deba a la presencia de las primeras lluvias. En agosto, se presentó otra baja en la concentración de Ca, se supone que se debe quizás al periodo de sequía conocida como "canícula". Lo anterior responde a que el Ca se mueve por flujo de masas, tanto del suelo a las raíces como por el xilema de la planta.

La mayor concentración de Ca fue de 37.3 g kg⁻¹ y coincidió con el final de la maduración fisiológica de los frutos y, por otra parte, la concentración más baja fue de 31.3 g kg⁻¹ y coincidió con la quiescencia (Figura 2A).

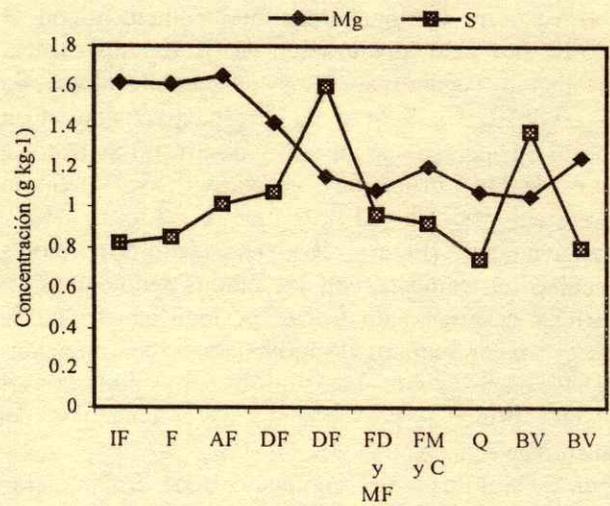
En los entrenudos, la mayor concentración de Ca se encontró en el ápice subterminal con un valor promedio de 35.1 g kg⁻¹ y menor contenido en el entrenudo terminal con una media de 32.9 g kg⁻¹ (Figura 1C; Cuadro 5) que corresponde a hojas con más de cinco a siete meses de edad.

Cabe destacar que las concentraciones obtenidas en el presente trabajo son relativamente altas y oscilan entre 31.3 y 37.3 g kg⁻¹, en comparación con las encontradas por Kumar y Nauriyal, en 1977, y Bhargava y Chadha, en 1988, citados por Samra y Arora (1997) quienes propusieron como valor crítico 15.0 y 17.1 g kg⁻¹, respectivamente. Por otro lado, Young y Sauls (1989) propusieron como intervalo satisfactorio de 20 a 35 g kg⁻¹ en suelos ácidos (no indicaron a qué pH). Sin embargo, en Israel, Tomer, en 1995, citado por Mosqueda *et al.* (1996) propuso valores de 22 a 50 g kg⁻¹ en suelos alcalinos.

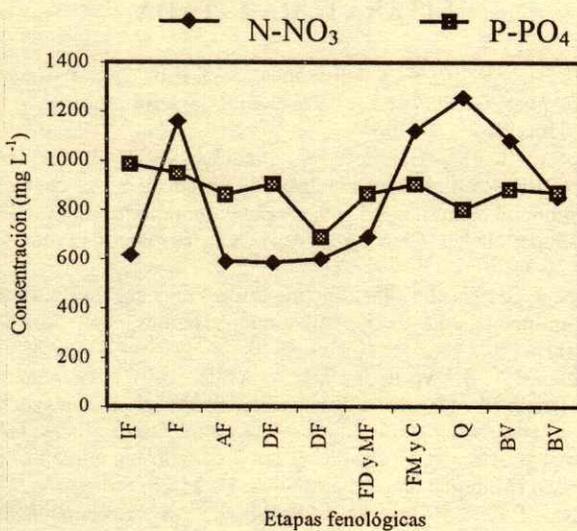
El suelo donde se realizó el presente estudio presentó un pH de 6.2 (ligeramente ácido) y el agua de riego pH de 7.7 (ligeramente alcalino), así como cantidades altas de Ca. Quizás éstas sean algunas de las razones principales que explican el porqué de las concentraciones altas de Ca encontradas en las hojas. Benton *et al.* (1991) afirmaron que concentraciones altas de Ca decrecen los valores de Mg y que, a su vez, reducen la fotofosforilización en las plantas; esto reafirma las deficiencias de Mg presentadas en la



2 A) Etapas fenológicas



2 C) Etapas fenológicas



2 B)

Figura 2. Concentración mineral en hojas de mango cv. Kent en las etapas fenológicas estudiadas (muestreros). A) N, K y Ca; B) N-NO₃ y P-PO₄ y C) Mg y S. IF = inicio de loración, F = floración, AF = amarre de frutos, FM y C = fin de maduración y cosecha, Q = quiescencia y BV = brotación.

1.08, 1.07 y 1.05 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 2C; Cuadro 6).

El factor posición cardinal mostró diferencia en contenido entre el N y el S, con valores de 1.38 y 1.25%, respectivamente (Cuadro 5); en el resto de los factores no hubo significancia.

Comparando las concentraciones encontradas con las reportadas por Young y Sauls (1989) como valores satisfactorios de 1.5 a 4.0 g kg⁻¹ y las indicadas por Marschner (1986) de 5.0 g kg⁻¹ en las plantas superiores como requerimiento para su óptimo desarrollo, se observa que las obtenidas son bajas, lo que explica la fuerte deficiencia que se observó en la huerta estudiada. Tal deficiencia se presentó como una clorosis bronceada, en los meses con mayor incidencia de luz (mayo y junio), coincidiendo con las concentraciones más bajas (Figura 2C; Cuadro 6), pero altas en Ca (3.51g kg⁻¹). Por otro lado, se menciona que concentraciones bajas de Ca y Mg provocan problemas de "nariz blanda" en cv. Kent (Burdon *et al.*, 1991).

Azufre. Los resultados demuestran que los valores de azufre, tanto en los factores como en etapas fenológicas (muestreros), y sus interacciones no fueron significativos (Cuadros 5 y 6). Sin embargo, en los resultados que se muestran en la Figura 2C y en el

huerta estudiadas de las cuales se hace referencia en lo que corresponde al apartado de magnesio.

Magnesio. En lo que se refiere a las etapas fenológicas, la diferencia se encontró entre los muestreros de marzo AF con una media de 1.6 g kg⁻¹ y los muestreros de mayo DF, junio MF, julio FM y C, agosto Q y septiembre BV con valores promedio de 1.15, 1.08, 1.20, 1.07 y 1.05 g kg⁻¹, respectivamente. También, hubo significancia entre los muestreros de abril DF con relación a mayo DF, junio MF, agosto Q y septiembre BV con valores promedio de 1.42, 1.15,

Cuadro 6 se observan pequeñas diferencias no significativas entre ellos.

Es el caso de los muestreos que coinciden con el inicio de floración, maduración de frutos, quiescencia y brotación vegetativa; éstos presentan valores de 0.82, 0.85, 0.9 y 0.74 g kg⁻¹, respectivamente. Con respecto a las etapas de amarre y desarrollo de frutos e inicio de la brotación vegetativa, se tuvieron concentraciones de 1.0, 1.6 y 1.4 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 2C). Estos últimos valores coinciden básicamente con las etapas fenológicas de amarre y desarrollo de frutos, periodo en el cual se hace el mayor número de aplicaciones de fungicidas con base en S y cobre. Estas aplicaciones pudieran ser el factor principal del aumento en el contenido del elemento en estas etapas.

Algunos valores de contenido de S pudieran considerarse adecuados si se comparan con el propuesto por Bhargava y Chadha (1988) de 1.2 g kg⁻¹ como crítico, pero inadecuado si se compara con el que encontraron Kumar y Nauriyal (1979) de 5.0 g kg⁻¹ y el propuesto por Marschner (1986) para plantas superiores como intervalo satisfactorio que va de 2.0 g kg⁻¹ a 5.0 g kg⁻¹. Este último autor también mencionó que en condiciones de deficiencias de S, existe una acumulación de N orgánico y N-NO₃.

CONCLUSIONES

- Los análisis estadísticos demostraron que no existieron interacciones entre los factores estudiados.
- De los nutrimentos estudiados y con respecto a la posición cardinal, el mayor contenido lo presentó el N en la posición cardinal norte y el Mg en la parte sur de la copa.
- Para el factor estratos, N-NO₃, K y Mg presentaron su mayor contenido en el basal y el menor en el apical. La mayor concentración de Ca y de P-PO₄ se encontró en el estrato basal y la menor en el apical.
- El N, P-PO₄ y K presentaron su mayor concentración en el entrenudo dos (hojas más jóvenes) y el Ca presentó mayor concentración en el entrenudo uno (hojas más viejas).
- No se encontraron diferencias significativas en la concentración de N-NO₃ y Mg.
- La mayor concentración de N total, N-NO₃, P-PO₄ y Mg en el follaje se encontró en los muestreos de enero (inicio de la floración), febrero (floración) y en septiembre (inicio de la brotación); la menor concentración se localizó en el muestreo de mayo (desarrollo de frutos) y en octubre (plena brotación).

- La mayor concentración de Ca correspondió a los muestreos de mayo (desarrollo de frutos) y julio (cosecha). La menor concentración se encontró en los muestreos de abril y mayo (etapa del máximo desarrollo de fruto, conocida como "zinc metabólico") y en enero y septiembre (inicio de la floración y en la brotación, respectivamente).

- De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda que los muestreos foliares se realicen en el estrato medio de la copa en una franja lo más amplia posible, en forma de zigzag, en los cuatro puntos cardinales, en hojas de dos a cuatro meses de edad, y mensualmente o mínimo en cada etapa fenológica.

AGRADECIMIENTOS

A Doménico Voltolina Lobina y José Luis Carballo por la revisión y traducción al inglés del resumen.

LITERATURA CITADA

- Avilán L., R. 1974. Cuatro años de fertilización en mango (*Mangifera indica* L.) en suelos de la serie Macaray. *Agro. Trop.* 24-29: 97-106.
- Barbery, R., M. García y N. Dieguez. 1978. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción y el contenido mineral de las hojas de mango (*Mangifera indica* L.) variedad Super Haden. *Cienc. Tec. Agric. Cítricos y Otros Frutales* 1: 24-34.
- Bates, T.E. 1971. Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: A review. *Soil Sci.* 112: 116-130.
- Benton, J.J., B. Wolf Jr. y H.A. Mills. 1991. *Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide.* Micro-Macro Publishing, Athens, GA.
- Bhargava, B.S. y K.L. Chadha. 1988. Leaf nutrient guide for fruit and plantation crops. *Fert. News* 33: 21-29.
- Biswas, P.P., O.P. Joshie y M.S. Rajput. 1987. Establishment of critical leaf nutrient concentrations of mango cv. Dashehari based on soil test. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 35: 331-334.
- Bojórquez M., M.Z. 1997. Características químicas y funcionales de la corteza de la semilla de mango (*Mangifera indica* L.) variedad Kent en relación al tamaño de la partícula. Memoria. Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.
- Bouyoucos, G.T. 1951. A calibration of hydrometer method for marking mechanical analysis of soil. *Agron. J.* 43: 434-438.
- Bradstreet, R.B. 1965. *The Kjeldahl method for organic nitrogen.* Academic Press. New York.
- Burdon, J.N., K.G. Moore y H. Wainwright. 1991. Mineral distribution in mango fruit susceptible to the physiological disorder soft-nose. *Scientia Hort.* 48: 329-336.
- Chadha, K.L., J.S. Samra y R.S. Thakur. 1980. Standardization of leaf-sampling technique for mineral composition of mango cultivar "Chausa". *Scientia Hort.* 13: 323-329.

- Chaudhary, S.K., G.S. Nijar y J.P. Nauriyal. 1988. Effect of deficiency of calcium, magnesium and sulphur on the uptake of the nutrients in mango. 2nd International Symposium on Mango. Volume 1. Acta Horticulturae 231: 296-300.
- Embleton, T.W. y W.W. Jones. 1966. Avocado and mango nutrition. pp. 51-76. In: Norman F. Childers (ed.). Nutrition of crops, temperate, sub-tropical, tropical. New Brunswick, New Jersey Extension Service, University of Florida, Institute of Food and Agriculture Sciences. Gainesville, FL.
- FIRA. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. 1992. Instructivo técnico de apoyo a la formulación de proyectos de financiamiento y asistencia técnica. Serie Agricultura: Fruticultura. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. México, D.F.
- Galán S., V. 1990. Los frutales tropicales en los subtrópicos. I. Aguacate, mango, litchi y Longaria. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Gobierno del Estado de Sinaloa. 1990. Concordia. Monografía. Edición especial. Dirección de Estadísticas y Estudios Económicos. Culiacán, Sinaloa, México.
- Goguy, T. 1996. Architectural approach of the mechanisms of canopy growth and flowering of mango trees. pp. 123-131. Vol. I. 5th International Mango Symposium. International Society for Horticultural Science. Tel Aviv, Israel.
- Golez, H.G. y N.F. Zamora. 1996. The influence of Multi NPK 12-2-24 on the flowering capacity of "Carabao" Mango. pp. 108-115. Vol. I. 5th International Mango Symposium. International Society for Horticultural Science. Tel Aviv, Israel.
- Gontijo, G.T.P. 1982. Nutricao e adubacao da mangueira. Inf. Agropec. Belo Horizonte (Brazil) 8: 28-34.
- Guzmán E., C. 1988. Dinámica del N P y K en hoja y fruto relacionado con fenología y rendimiento en *Mangifera indica* L. cv Manila. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-Gobierno del Estado de Sinaloa. 1992. Anuario Estadístico del Estado de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.
- Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Omega. Barcelona, España.
- Kenworthy, A.L. 1964. Fruit nut and plantation crops, deciduous, evergreen. A guide for collecting foliar sample for nutrient element analysis. Memog. Rept. Hort. Dept. Michigan State University. East Lansing, MI.
- Koo, R.C.J. y T.W. Young. 1972. Effects of age and position on mineral composition of mango leaves. J. Am. Soc. Hort. Sci. 97: 792-794.
- Kumar, S. y J.P. Nauriyal. 1979. Foliar sampling technique in mango. Punjab Hort. J. 19: 10-15.
- Marschner, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. Institute of Plant Nutrition. University of Hohenheim. Hohenheim, Germany.
- Mata B., I. y R. Mosqueda. 1995. La producción del mango en México. UTEHA. México, D.F.
- Moréis, P. 1983. A century of Kjeldahl (1883-1983). J. Assoc. Public Analysts 21: 53-58.
- Mosqueda, V. R., F. de los Santos, E.N. Becerra L., H. Cabrera M., D.A. Ortega Z. y A.L. del Angel P. 1996. Manual para cultivar mango en la planicie costera del Golfo de México. Folleto Técnico 15. División Agrícola. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental Cotaxtla, Veracruz, México.
- Osuna E., T. 1998. Anatomía y fisiología de la floración forzada en mango (*Mangifera indica* L.) cv. Manila. Tesis de Doctorado. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México.
- Pelayo-Saldivar, C. 1992. Pérdidas postcosecha: Significancia, estimación y control. pp. 27-36. In: M. Yahia-Higuera (ed.). Fisiología poscosecha de productos hortícolas. LIMUSA. Querétaro, Querétaro.
- Rajput, M.S., K.L. Chadha y R.S. Thakur. 1985. Standardization of leaf sample size for nutrient analysis in mango. Indian J. Hort. 42: 210-212.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1997. Censo de la campaña contra la mosca de fruta. Comité Estatal de Sanidad Vegetal del Estado de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.
- Samra, J.S. y Y.K. Arora. 1997. Mineral nutrition. pp. 175-201. In: R.E. Litz (ed.). The mango, botany, production and uses. CAB-International. Wallingford, UK.
- Sapiens P., L. 1996. Características químicas y nutricionales de la almendra de la semilla de mango (*Mangifera indica* L.) variedad Kent. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1996. Guía para la asistencia técnica agrícola área de influencia del campo agrícola experimental sur de Sinaloa. Mazatlán, Sinaloa, México.
- SAS Institute. 1985. SAS Introductory guide for personal computers. Version 6. Cary, NC.
- Shongwe, V. y L.B. Roberts-Nkruma. 1996. Physiological and growth responses of mango (*Mangifera indica* L.) to methanol and potassium nitrate application. pp. 64-70. In: Vol. I. 5th International Mango Symposium. International Society for Horticultural Science. Tel Aviv, Israel.
- Soto Z., G.E. 1997. Características tecnológicas y nutricionales de la almendra de la semilla del mango (*Mangifera indica* L.) variedad Kent. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.
- Strickland, J.D.H. y T.R. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2nd ed, Bulletin 167. Fisheries Research Board of Canada. Ottawa, Canada.
- Ulrich, A. 1952. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 3: 207-228.
- Villapudua R., J. 1991. Cultivo y enfermedades del mango. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.
- Yahia, M.E. 1997. Manejo postcosecha del mango. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México.
- Young, T.W. y R.C.J. Koo. 1969. Mineral composition of Florida mango leaves. Proc. Florida State Hort. Soc. 75: 364-371.
- Young, T.W. y J.W. Sauls. 1989. The mango industry in Florida. Cooperative Extension Service. University of Florida. Gainesville, FL.
- Young, T.W., R.C.J. Koo y J.T. Miner. 1962. Effects of the nitrogen, potassium and calcium fertilization on Kent mangos in deep, acid sandy soil. Proc. Florida State Hort. Soc. 82: 324-328.

NITRÓGENO DISPONIBLE Y DESARROLLO DEL BALLICO ANUAL. I. PRODUCCIÓN, CALIDAD DEL FORRAJE Y ACUMULACIÓN DE NITRATOS

Nitrogen Availability and Annual Ryegrass Development. I. Forage Yield, Quality, and Nitrate-N Accumulation

José Antonio Cueto Wong¹, Héctor Mario Quiroga Garza² y Carmen Teresa Becerra Morales³

RESUMEN

En algunas regiones de México, es común abonar los cultivos tanto con estiércoles, como con fertilizantes químicos en el mismo ciclo de cultivo. Lo anterior puede provocar efectos indeseables, como la obtención de productos con cantidades excesivas de nitratos. En el presente trabajo, se evaluaron la producción de forraje seco (FS), el contenido de proteína cruda (PC) y la concentración de nitratos en el forraje de zacate ballico anual cultivado en suelos abonados con dosis variables combinadas de estiércol de bovino lechero y dosis de fertilizante nitrogenado. Se observó que el FS y la PC del ballico se incrementaron al aumentar la dosis de estiércol o fertilizante nitrogenado. El rendimiento de FS se incrementó en 15% con respecto al testigo al aplicar 25 t ha⁻¹ de estiércol. La aplicación de 260 ó 390 kg ha⁻¹ de N generó en promedio 14 t ha⁻¹ de FS, resultando estadísticamente superiores a las dosis de 130 ó 0 kg ha⁻¹ de N, las cuales produjeron 14 y 42% menos. El contenido de proteína cruda promedio del ballico se incrementó de 135.4 a 228.4 g kg⁻¹ al aumentar la dosis de nitrógeno de 0 a 390 kg ha⁻¹ ciclo⁻¹. Dosis de estiércol 75 ó 100 t ha⁻¹ produjeron 193.0 y 179.3 g kg⁻¹ de PC, resultando superiores a la aplicación de 0, 25, ó 50 t ha⁻¹. La dosis de 390 kg ha⁻¹ de N causó que la concentración de nitratos fuera superior a 2000 mg kg⁻¹ de N-NO₃ en tres de los cuatro cortes del ballico, independientemente del estiércol aplicado. Las concentraciones promedio del ciclo para las dosis de

50 y 100 t ha⁻¹ de estiércol sin fertilizante fueron 1224 y 1725 mg kg⁻¹ de N-NO₃, respectivamente. Se encontró que 400 kg ha⁻¹ de N disponible durante el ciclo (aportado por el suelo + mineralizado del estiércol aplicado + nitrógeno del fertilizante) es suficiente para alcanzar un buen rendimiento y calidad del ballico italiano y sin riesgo de contaminación por nitratos.

Palabras clave: Estiércol bovino, fertilizante nitrogenado, concentración de nitratos, proteína cruda.

SUMMARY

In some regions of Mexico, the addition of mineral fertilizers and manures during the same growing season of a crop is very common. However, this practice can easily lead to harvest products contaminated with nitrates. In this study, the dry matter yield (FS), crude protein content (PC), and nitrate concentration of annual ryegrass grown in plots treated with different combinations of partially composted dairy cow manure and nitrogen from fertilizer were evaluated. It was observed that FS and PC increased as the rate of either manure or fertilizer rose. FS was 15% higher than the control treatment in plots receiving manure of 25 t ha⁻¹. The average yield in plots treated with 260 or 390 kg N ha⁻¹ season⁻¹ was 14 t FS ha⁻¹. FS yields in plots amended with 130 or 0 kg N ha⁻¹ season⁻¹ were 14 and 42% lower than with the higher levels. Ryegrass PC content increased from 135.4 to 228.4 g kg⁻¹ as the fertilizer rate increased from 0 to 390 kg N ha⁻¹. PC in plots treated with 75 or 100 t ha⁻¹ of manure was statistically higher than in those receiving 0, 25, and 50 t ha⁻¹. Nitrate concentration in plots amended with 390 kg N ha⁻¹ was above 2000 mg N-NO₃ kg⁻¹ in three out of the four ryegrass harvests. Average nitrate concentrations throughout the whole season in plots amended with 75 or 100 t ha⁻¹ were 1124 and 1725 mg N-NO₃ kg⁻¹, respectively. It was found that the addition of

¹ CENID-RASPA-INIFAP y FAZ-UJED. Apartado Postal 41, 35150 Cd. Lerdo, Durango, México.

(josecueto@raspa.inifap.conacyt.mx)

² INIFAP-CIRNOC-CELALA. Apartado Postal 247, 27000 Torreón, Coahuila, México.

(hmquiroga@yahoo.com, quiroghm@cirnoc.inifap.conacyt.mx)

³ ITA-10. SEP-DGTA. Torreón, Coahuila, México.

400 kg ha⁻¹ of available nitrogen during the season (available soil-N + mineralized manure-N + fertilizer-N) are enough to obtain a high dry matter yield and crude protein content, and a low nitrate concentration in annual ryegrass.

Index words: Cow manure, nitrogen fertilizer, nitrate concentration, crude protein.

INTRODUCCIÓN

En cuencas lecheras donde la producción de leche de ganado bovino se realiza en completa estabulación, la acumulación de estiércol en los corrales puede representar un serio problema de manejo del subproducto y de salud para el ganado. Una alternativa de solución es la aplicación del estiércol en terrenos agrícolas destinados a la producción intensiva de forrajes dentro o fuera del predio donde se produce.

La Comarca Lagunera es la principal cuenca lechera del país, donde su población de 165 000 cabezas de ganado lechero produce un volumen anual de estiércol estimado en cerca de medio millón de toneladas de peso seco. En esta región, la aplicación de estiércol en terrenos agrícolas es una práctica rutinaria. Sin embargo, ésta se realiza en forma empírica, ya que un estudio realizado indicó que la dosis aplicada fluctuó de 20 a 280 t ha⁻¹, con un intervalo promedio de 80 a 120 t ha⁻¹. No se encontró ningún patrón definido en cuanto a rotación de terrenos y frecuencias de aplicación. La época más común de aplicación es durante el otoño-invierno (Castellanos, 1987).

Es de esperarse que mediante la adición continua al suelo de materiales orgánicos como el estiércol se incrementa el contenido de materia orgánica, así como de las reservas de macro y micronutrientes a mediano y largo plazo. Clark *et al.* (1998) encontraron que después de ocho años de aplicar estiércol, el contenido de N y C en el estrato de 0 a 15 cm aumentó en 0.24 y 2.24 g kg⁻¹, respectivamente, en comparación con la misma rotación de cultivos, pero utilizando fertilizantes sintéticos. Sin embargo, otros reportes (Keeney, 1982) sugirieron que la agricultura orgánica a largo plazo tiende a empobrecer los suelos si las leguminosas no están incluidas en la rotación de cultivos, ya que la remoción de nutrientes por los cultivos es mayor que la adición de éstos vía la aplicación de abonos orgánicos.

El zacate ballico italiano o "ryegrass" anual (*Lolium multiflorum* Lam.) es un forraje que se

siembra en la región lagunera precisamente durante el período cuando ocurre la mayor frecuencia de aplicaciones de estiércol. Es común que este cultivo reciba diversas cantidades de estiércol además de la fertilización inorgánica nitrogenada necesaria para su producción. El resultado de esta práctica es la aplicación de cantidades de nitrógeno y otros nutrientes superiores a los requerimientos del cultivo. Además, una característica indeseable del zacate ballico es su capacidad de acumular nitratos (NO₃⁻), principalmente en condiciones de altos valores de N disponible en el suelo y baja intensidad luminosa (Ehlig y Hagemann, 1982). Se considera que la luz es uno de los principales factores externos que tienen influencia sobre la acumulación de NO₃⁻ en esta especie forrajera (Wright y Davison, 1964).

Tanto en gramíneas como en cereales, la asimilación del NO₃⁻ absorbido por la raíz se lleva a cabo principalmente en tallos y hojas. En el proceso de incorporar los iones NO₃⁻ a moléculas orgánicas, la enzima nitrato-reductasa juega una función crítica, por lo que una actividad limitada o insuficiente de la enzima tiende a causar acumulación de NO₃⁻ en la planta (Olson y Kurtz, 1982). La síntesis y regulación de la enzima nitrato-reductasa son estimuladas por la luz, activándose vía la fosforilación y desactivándose en la oscuridad o en condiciones de baja intensidad luminosa (Wright y Davison, 1964; McMichael *et al.*, 1995).

Una alta concentración de nitratos en el forraje puede causar disminución en la producción de leche, abortos y, en casos extremos, la muerte del animal (Wright y Davison, 1964). En realidad, la toxicidad es provocada por el ion nitrito (NO₂⁻) y no por el ion nitrato. En el tracto digestivo, el NO₃⁻ es reducido a NO₂⁻, ambos iones son altamente solubles y fácilmente absorbidos por las paredes intestinales y depositados en el torrente sanguíneo. El hierro de la hemoglobina es oxidado por el NO₂⁻, reduciendo su capacidad de transportar y liberar oxígeno a los tejidos del animal. En estas condiciones, la hemoglobina adquiere un color café y es denominada metahemoglobina (Wright y Davison, 1964). El límite crítico de concentración de N-NO₃ en forrajes se ubica entre 2000 y 3000 mg kg⁻¹. Este valor varía de acuerdo con la condición física del animal, así como con el volumen de consumo y la proporción del forraje conteniendo exceso de nitratos en la dieta (Ehlig y Hagemann, 1982).

En la región, se han realizado estudios sobre el efecto de la aplicación de diferentes dosis de

fertilizante nitrogenado (Thomas y Fariás, 1978; Montoya, 1994) o estiércol de bovino (Castellanos, 1983) en el crecimiento y en la producción de materia seca del ballico anual. Sin embargo, no existe información sobre la acumulación de NO_3^- en el forraje a diferentes valores de N disponible proveniente de varias fuentes durante un mismo ciclo del cultivo. El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de diferentes valores de N proveniente de fertilizante sintético o estiércol de bovino lechero sobre la producción, calidad y concentración de NO_3^- en el forraje del ballico italiano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se estableció en terrenos del campo experimental La Laguna ($25^\circ 32' \text{ N}$ y $103^\circ 14' \text{ O}$) a una altitud de 1140 m. El clima en la región se clasifica como desértico o cálido estepario, con régimen de lluvias en el verano e inviernos fríos. La temperatura media anual es 22.1° C . El suelo en el sitio experimental, de acuerdo con el sistema de clasificación de los Estados Unidos, se clasifica como Haplargid (Soil Survey Staff, 1996) y pertenece a la serie Coyote. El suelo presentó las siguientes características: pH, 8.6, 8.6 y 8.5; conductividad eléctrica, 0.83, 1.29 y 1.55 dS m^{-1} ; contenido de materia orgánica, 2.44, 1.72 y 1.29% y N disponible inicial (N-NO_3), 6.2, 2.2 y 2.2 mg kg^{-1} para los estratos de suelo de 0 a 0.3, 0.3 a 0.6 y 0.6 a 0.9 m de profundidad, respectivamente.

Para cumplir con los objetivos del estudio y previo a la siembra, se aplicó el equivalente a 0, 25, 50, 75 y 100 t ha^{-1} de estiércol de bovino seco, con un contenido de N de 0.8% medido como N total kjeldahl (Gavlak *et al.*, 1994). El estiércol provino de un lote acumulado al aire libre por más de un año en donde está expuesto por al menos cinco meses a temperaturas máximas diarias de hasta 40° C . Ésta es la forma más común de manejar este subproducto animal en ranchos productores de leche de la región. El estiércol se incorporó inmediatamente después de la adición mediante un paso de rastra. Durante el desarrollo del cultivo, se aplicaron dosis de N como urea equivalentes a 0, 130, 260 y $390 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$ de N. De siembra a primer corte, se aplicó 30%, correspondiente a cada dosis del fertilizante químico (dividido en dos partes iguales), y el restante 70% se aplicó en tres partes iguales después del primer, segundo y tercer corte.

La siembra se realizó el 5 de noviembre de 1992, utilizándose la variedad Oregon común de ballico anual, a una densidad de 35 kg ha^{-1} . Para la siembra, se utilizó una sembradora de granos pequeños, quedando el cultivo establecido en hileras espaciadas a 0.17 m. Durante este proceso, se fertilizó de manera uniforme todo el experimento con 70 kg ha^{-1} de P_2O_5 , utilizándose superfosfato de calcio triple como fuente de fósforo. Se aplicaron cuatro riegos durante el establecimiento y un riego después de los Cortes 1, 2 y 3.

El estudio se estableció en un arreglo factorial en franjas y distribución en bloques al azar con cuatro repeticiones. Las dosis de estiércol se aplicaron en franjas y dentro de cada una, las dosis de fertilizante químico en parcelas de 25 m^2 en forma aleatoria. En total se obtuvieron cuatro cortes en el período del 26 de enero al 26 de abril de 1993. Para realizar el análisis estadístico en franjas, primeramente se probó la homogeneidad de las franjas por medio de la prueba Fmax (Kuehl, 1994). Para analizar el efecto de los cortes (tiempo) sobre la producción de forraje y su calidad, se realizó la prueba de muestreos repetidos a través del tiempo y las condiciones de Huynh-Feldt se probaron. Dado que las condiciones de Huynh-Feldt fueron satisfechas, el efecto de cortes se analizó como parcelas divididas, siendo la parcela mayor el factorial en franjas (estiércol x fertilizante N) y los cortes la parcela menor. El análisis se realizó utilizando el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1990).

Las variables evaluadas fueron: rendimiento de forraje verde (FV) y seco (FS) por corte y total, contenido de proteína cruda ($\text{PC} = \% \text{ N-kjeldahl} \times 6.25$) y concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ en el forraje determinados por colorimetría (Chapman y Pratt, 1986) en cada uno de los cuatro cortes. Para la determinación del contenido de materia seca (MS), en cada corte se tomó una muestra registrando su peso fresco y seco después de secarla en una estufa de aire forzado a 60° C por 72 h. Estas mismas muestras secas se molieron y se tamizaron, utilizando una malla 60 (0.25 mm) y se utilizaron para los análisis de N-kjeldahl y N-NO_3 .

La producción total de FS se relacionó con el total del N disponible en el ciclo, el cual se asumió como el N total removido por el FS del ballico $[(\text{FS} \times (\% \text{ N-kjeldahl}/100)]$, suma de cada uno de los cuatro cortes. Con la idea de establecer el punto de inflexión a partir del cual el incremento de FS ya no es significativo, se realizó un análisis de regresión

considerando la producción total de FS como variable dependiente del N total disponible en el ciclo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Forraje Seco Total

En el análisis de la producción total de FS, no se encontró interacción significativa entre las dosis de estiércol y fertilizante N aplicado al suelo, pero sí para ambos efectos principales. Con respecto a las dosis de estiércol, 0 t ha⁻¹ fue estadísticamente inferior a las demás dosis, con un rendimiento 15% menor que el promedio de las otras dosis (Cuadro 1). Los rendimientos y tendencias encontrados en este estudio coinciden con resultados reportados previamente (Castellanos, 1983). La lenta liberación y mineralización del N en el estiércol limitó la respuesta del ballico al incrementar la dosis de 25 a 100 t ha⁻¹. Este efecto es similar al que se presenta al añadir una paja de un cultivo con una alta relación C/N, la cual inicialmente requerirá de N del suelo o de la aplicación de fertilizante que lo contenga. Eventualmente, el N inmovilizado por los microorganismos del suelo será mineralizado e integrado a la solución del suelo cuando éstos pasen a formar parte de la materia orgánica muerta (Mengel, 1996). Algunos estudios reportan porcentajes de mineralización de N de estiércoles composteados artificialmente tan bajos como 8% (Eghball y Power, 1999) y 11% (Eghball, 2000).

Por otra parte, el ballico respondió significativamente a las dosis de fertilizante

(N inorgánico). Las dosis de 390 y 260 kg ha⁻¹ ciclo⁻¹ de N causaron un rendimiento total promedio de 14 t FS ha⁻¹ en el ciclo y fue superior a las dosis de 130 y 0 kg ha⁻¹ ciclo⁻¹ de N; el FS de estas últimas dosis fue diferente entre sí con rendimientos inferiores al promedio de las dos primeras en 14 y 41%, respectivamente (Cuadro 1). En un estudio previo, Thomas y Farias (1978) encontraron una respuesta lineal en la producción de FS de ballico cuando se exploró un intervalo desde 188 a 547 kg ha⁻¹ ciclo⁻¹ de N, obteniendo rendimientos similares al obtenido con la dosis mayor de N. El rendimiento encontrado con la dosis 0-0 (estiércol-fertilizante), 6.34 t ha⁻¹ ciclo⁻¹ de FS es 28% inferior, comparado con el promedio de los tratamientos que recibieron estiércol pero no fertilizante. El N utilizado por el ballico en este tratamiento provino del N disponible en el suelo antes de la siembra y del mineralizado de la materia orgánica del terreno.

Al analizar los beneficios del estiércol en cuanto al incremento porcentual en el rendimiento de FS con respecto a cada valor de N inorgánico (Cuadro 1, números entre paréntesis), puede verse claramente que los mayores beneficios se obtienen cuando no se utiliza fertilizante. La tendencia general fue de un menor incremento en el rendimiento de FS, en cada valor de estiércol, conforme se aumentó la dosis de N del fertilizante. Los valores aquí encontrados son muy similares a los reportados por Castellanos (1983), quien encontró un incremento de 9 a 22% en el rendimiento de FS en ballico anual, utilizando una dosis de N químico de 250 kg ha⁻¹ ciclo⁻¹ de N. Con la información del presente estudio, aparentemente la

Cuadro 1. Rendimientos acumulados de forraje seco en ballico anual en respuesta a las dosis de estiércol y fertilizante nitrogenado. Números en paréntesis representan el incremento porcentual del rendimiento a cada dosis de fertilizante nitrogenado con respecto a la dosis 0 de estiércol.

Nitrógeno kg ha ⁻¹	Estiércol (t ha ⁻¹)					Media
	0	25	50	75	100	
	----- FS (t ha ⁻¹) -----					
0	6.34 (0)	8.45 (33)	9.05 (43)	8.62 (36)	9.01 (42)	8.29 b [†]
130	10.54 (0)	12.12 (15)	12.61 (20)	12.70 (20)	12.28 (16)	12.05 a
260	12.25 (0)	14.08 (15)	14.34 (17)	13.56 (11)	14.23 (17)	13.69 a
390	13.42 (0)	14.83 (10)	14.20 (6)	14.71 (10)	14.40 (7)	14.31 a
Media	10.64 b [†]	12.36 b	12.55 a	12.40 a	12.48 a	

[†] Medias con la misma letra son iguales estadísticamente, DMS₀₅ = 0.863 y 0.880 t ha⁻¹, para los efectos principales de dosis de fertilizante (hileras) y estiércol (columnas), respectivamente.

mayor proporción del N utilizado por la planta provino en principio de la fuente inorgánica.

Al estimar el N total removido en el FS del ballico y considerándolo como el N real disponible en el ciclo, se encontró una relación cuadrática ($R^2 = 0.89$) entre éste y el FS total producido durante el ciclo (Figura 1). La curva de producción de FS inicia su punto de inflexión cuando el N total disponible es aproximadamente de 450 a 500 $\text{kg ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$ de N, con un potencial productivo promedio de 14 $\text{t ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$ de FS. Este tipo de relación entre la producción de FS y el N disponible, se ha reportado en otros estudios (Ehlig y Hagemann, 1982). Sin embargo, en el intervalo del N disponible de este estudio, el ballico anual mostró un mayor potencial productivo que el reportado en el estudio desarrollado en el Valle Imperial de California (Ehlig y Hagemann, 1982).

Forraje Seco por Cortes

Cuando se incluyó el factor "número de corte" en el análisis estadístico del rendimiento de FS, no se encontró significancia estadística en la interacción entre dosis de estiércol y fertilizante ni en la interacción de los tres factores, pero sí en las interacciones de cada uno de estos efectos principales (estiércol y fertilizante) con cortes. Los tres efectos principales también fueron significativos. El

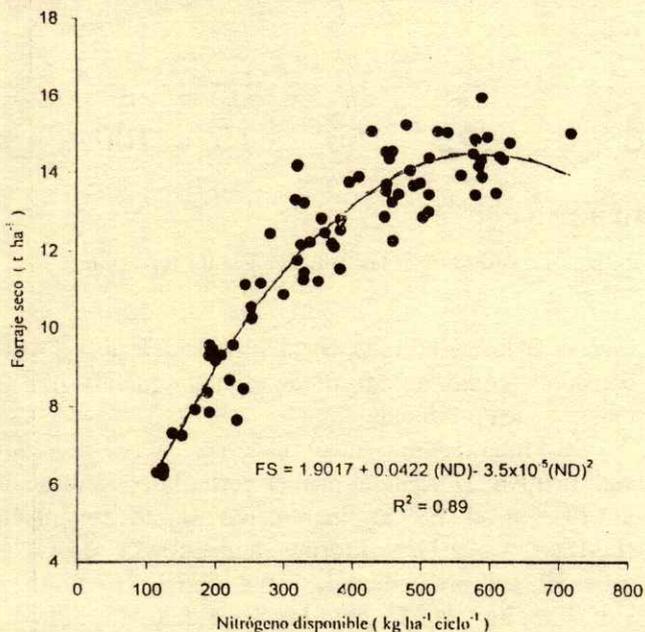


Figura 1. Producción de forraje seco total de ballico italiano en respuesta a la disponibilidad total de nitrógeno en el ciclo.

rendimiento promedio de FS por corte por dosis de estiércol y fertilizante siguió las mismas tendencias encontradas en los rendimientos acumulados. Estos rendimientos por corte pueden obtenerse al dividir los valores de la Cuadro 1 entre el número de cortes (4). Los rendimientos globales promedio por corte fueron estadísticamente diferentes entre sí ($DMS_{05} = 0.142 \text{ t ha}^{-1}$ de FS), 4.23, 3.37, 2.68 y 1.80 t ha^{-1} de FS para los Cortes 1, 4, 2 y 3, respectivamente.

La interacción estiércol-fertilizante fue significativa desde el primer corte. La tendencia general fue la de aumentar el rendimiento en cada corte conforme se incrementó la dosis de estiércol (Figura 2). Sin embargo, en el primer corte, la dosis de estiércol de 25 t ha^{-1} produjo los mayores rendimientos de FS ($DMS_{05} = 0.547$), superando a la dosis de estiércol de 75 t ha^{-1} con rendimientos promedio de 4.75 y 4.08 t ha^{-1} de FS. La tendencia observada de incrementos ligeros al aumentar la dosis de estiércol, puede atribuirse a la lenta liberación del N orgánico en este abono en esta época del año, lo cual coincide con lo encontrado en estudios previos (Castellanos, 1982, 1983).

En todos los cortes, con excepción del primero, el FS del tratamiento que no recibió fertilizante nitrogenado fue inferior ($DMS_{05} = 0.626$) al resto de los tratamientos; sin embargo, en el primer corte fue igual al tratamiento con 130 kg ha^{-1} de N con promedios de 3.79 y 4.09 t ha^{-1} de FS, respectivamente. Esto fue debido probablemente a que el suelo fue capaz de abastecer al zacate en esta primera cosecha agotándose las reservas del suelo para los cortes posteriores. Por otra parte, el tratamiento de 130 kg ha^{-1} de N fue igual al tratamiento de 390 kg ha^{-1} de N en los Cortes 1 y 3 (4.09 vs 4.62 y 1.75 vs 2.32 t ha^{-1} de FS), pero diferente en los Cortes 2 y 4 (2.52 vs 3.47 y 2.69 vs 3.90 t ha^{-1} de FS).

Proteína Cruda

La calidad del FS en ballico, medida como la concentración de PC, se ha reportado como positivamente relacionada con la disponibilidad de N en el suelo (Kunelius, 1980; Ehlig y Hagemann, 1982; Lawrence *et al.*, 1982; De Villiers y Van Ryssen, 2001) y en otras gramíneas de clima templado como Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) (Bertauski *et al.*, 1997). En este estudio, el valor de N químico aplicado vía fertilizante, incrementó significativamente el contenido promedio global de PC con cada

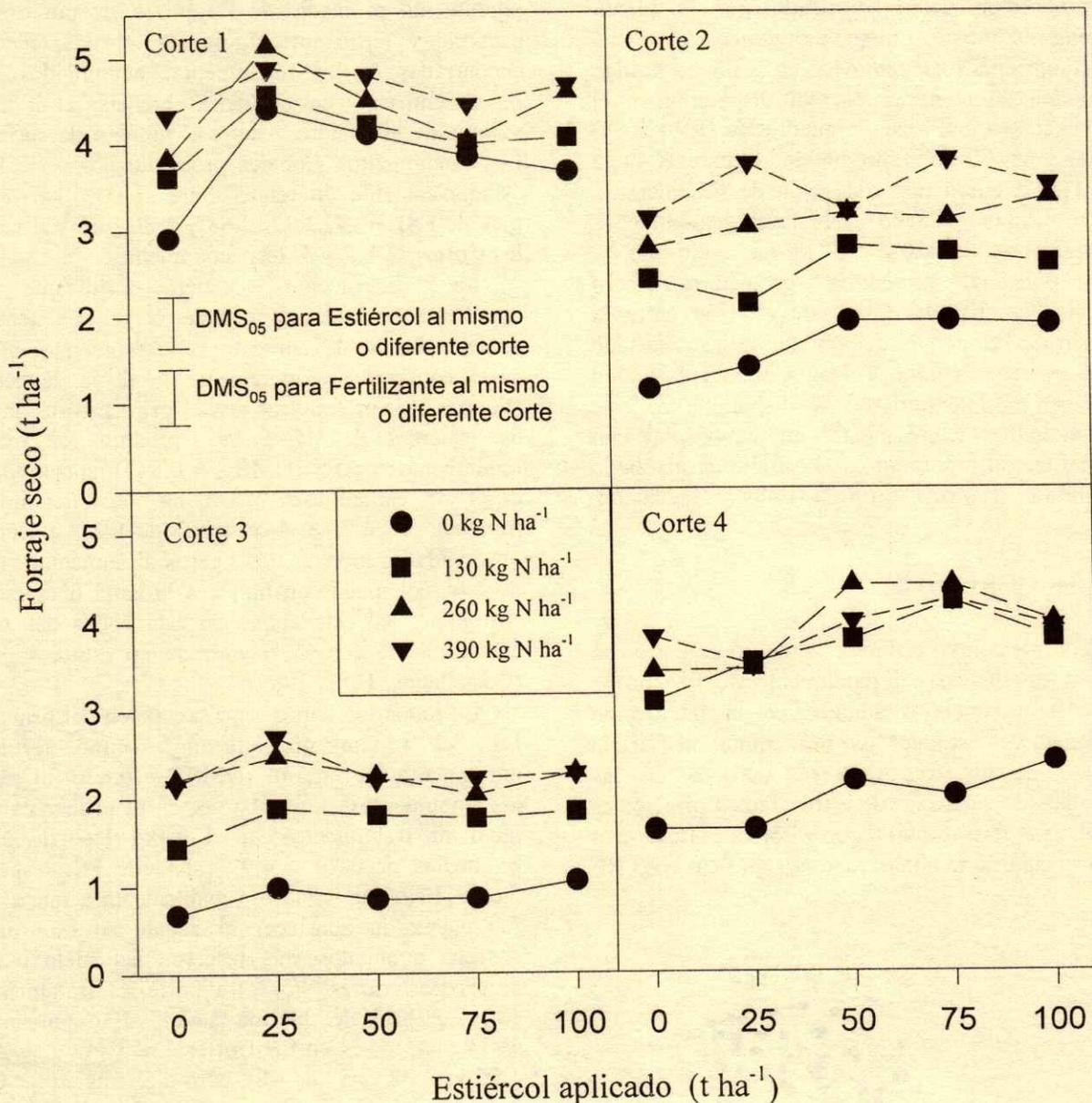


Figura 2. Rendimiento de forraje seco por corte de ballico italiano en respuesta a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado y estiércol de bovino.

dosis aplicada: 135.4, 168.7, 206.9 y 228.3 g kg⁻¹ de PC, para 0, 130, 260 y 390 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. En cuanto a las dosis de estiércol, las dos dosis más altas fueron superiores a las tres inferiores, con promedios de 193.0 y 179.3 g kg⁻¹ de PC, respectivamente. Cuando se analizó el efecto combinado entre las dos fuentes de N y los cortes, la concentración de PC varió significativamente entre los cuatro cortes obtenidos, siendo sus promedios de 216.0, 191.8, 173.0 y 158.4 g kg⁻¹ de PC, para los Cortes 3, 2, 1 y 4, respectivamente. Esta tendencia es

inversa a la encontrada en la producción de FS y se considera como un efecto de dilución del N por la materia seca producida.

La interacción entre estiércol y cortes fue significativa. Durante el primer corte, la concentración de PC en el FS se incrementó significativamente ($DMS_{05} = 19.1$) conforme aumentó la dosis de estiércol, con promedios de 150.4, 165.1, 167.8, 182.4 y 199.3 g kg⁻¹ de PC, para las dosis de 0, 25, 50, 75 y 100 t ha⁻¹ de estiércol, respectivamente (Figura 3). En cambio, durante el tercer corte no se manifestaron

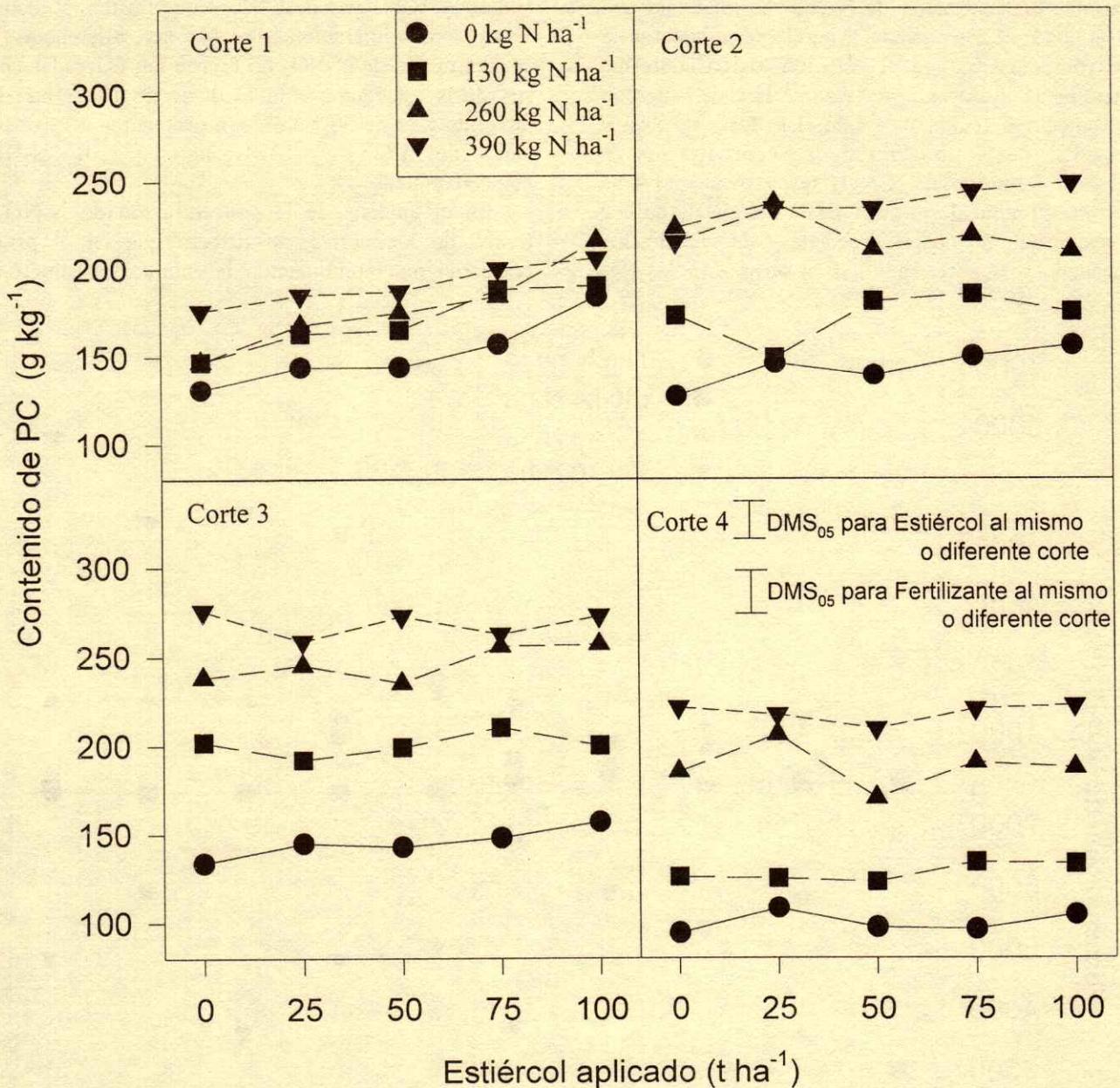


Figura 3 Contenido de proteína cruda (PC) en el ballico italiano en respuesta a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado y estiércol de bovino.

diferencias entre las dosis de estiércol, con promedios de 212.5, 210.4, 212.8, 222.2 y 222.1 g kg⁻¹ de PC, respectivamente. De la misma forma, se presentó interacción entre las dosis de fertilizante N y cortes. Durante el primer corte, la concentración de PC de la dosis 0 kg ha⁻¹ de N fue igual únicamente a la dosis 130 kg ha⁻¹ de N (DMS₀₅ = 21.6), siendo sus promedios de 152.0, 170.9, 178.0 y 191.0 g kg⁻¹ de PC para cada una de las dosis de N, respectivamente (Figura 3). En cambio, en el tercer corte, el

tratamiento que no recibió N fue diferente al resto de los tratamientos, y éstos entre sí, con promedios de 145.6, 203.1, 246.4 y 268.9 g kg⁻¹ de PC para cada una de las dosis de N, respectivamente.

Concentración de Nitratos

Al igual que la calidad de forraje (medida como el contenido de PC) del ballico anual se encontró positivamente relacionada con la disponibilidad de N,

la variable concentración de N-NO_3 se relacionó con el N aplicado. La tendencia general observada fue la de mayor concentración de este ión tóxico conforme se incrementó la dosis de fertilizante N o de estiércol. En promedio a través del ciclo, las dosis de 260 y 390 kg ha^{-1} de N presentaron una concentración de 1599 y 4075 mg kg^{-1} de N-NO_3 , respectivamente. Una alta concentración de nitratos en el forraje de ballico en respuesta a dosis crecientes de fertilizante nitrogenado se reportó también en otros estudios (De

Villiers y Van Ryssen, 2001). Con el estiércol, debido a su lenta liberación del N, las diferencias en concentración de N-NO_3 no fueron tan marcadas entre sus dosis aplicadas; sólo la dosis de 100 t ha^{-1} fue diferente a la de 50 t ha^{-1} , con promedios a través del ciclo de 1725 y 1224 mg kg^{-1} de N-NO_3 , respectivamente.

En el análisis de la concentración de N-NO_3 a través de los cortes, se detectó que en el primer corte ninguna combinación de tratamientos superó el

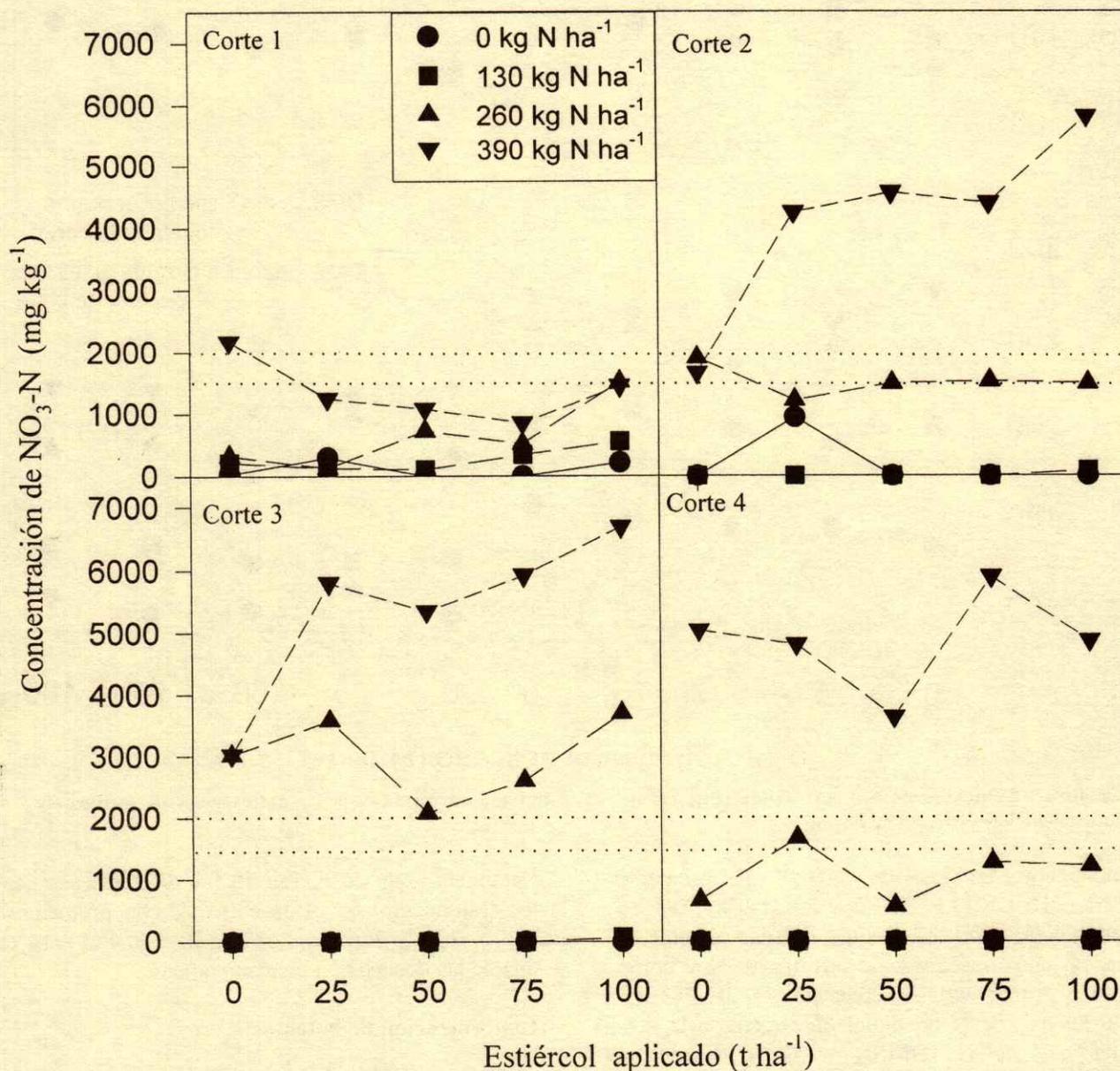


Figura 4. Concentración de nitratos en la materia seca del ballico italiano en respuesta a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado y estiércol de bovino.

intervalo de 1500 a 2000 mg kg^{-1} de N-NO_3 , considerado como límite mínimo de seguridad. La excepción en este corte se obtuvo con la dosis de 390 $\text{kg ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$ de N y sin la aplicación de estiércol, la cual superó dicho intervalo (Figura 4). En este análisis, se encontró interacción del tercer grado entre los factores del estudio. Durante el primer corte no hubo diferencias entre ninguno de las cuatro dosis de fertilizante N ($\text{DMS}_{05} = 1360$); sin embargo, en los restantes tres cortes, los dos niveles inferiores fueron iguales entre sí, pero diferentes a los dos niveles más

altos, los cuales, a su vez, fueron diferentes entre ellos, correspondiendo la mayor concentración de N-NO_3 a la dosis más alta de fertilizante N.

La producción de FS y su contenido de PC en el ballico anual aumentan en respuesta a una mayor disponibilidad de N (Figuras 1 y 3). Sin embargo, en esta especie, la acumulación de N-NO_3 en su forraje llega a sobrepasar fácilmente el límite mínimo de toxicidad para los rumiantes (1500 mg kg^{-1} de N-NO_3) en condiciones de alta disponibilidad de N.

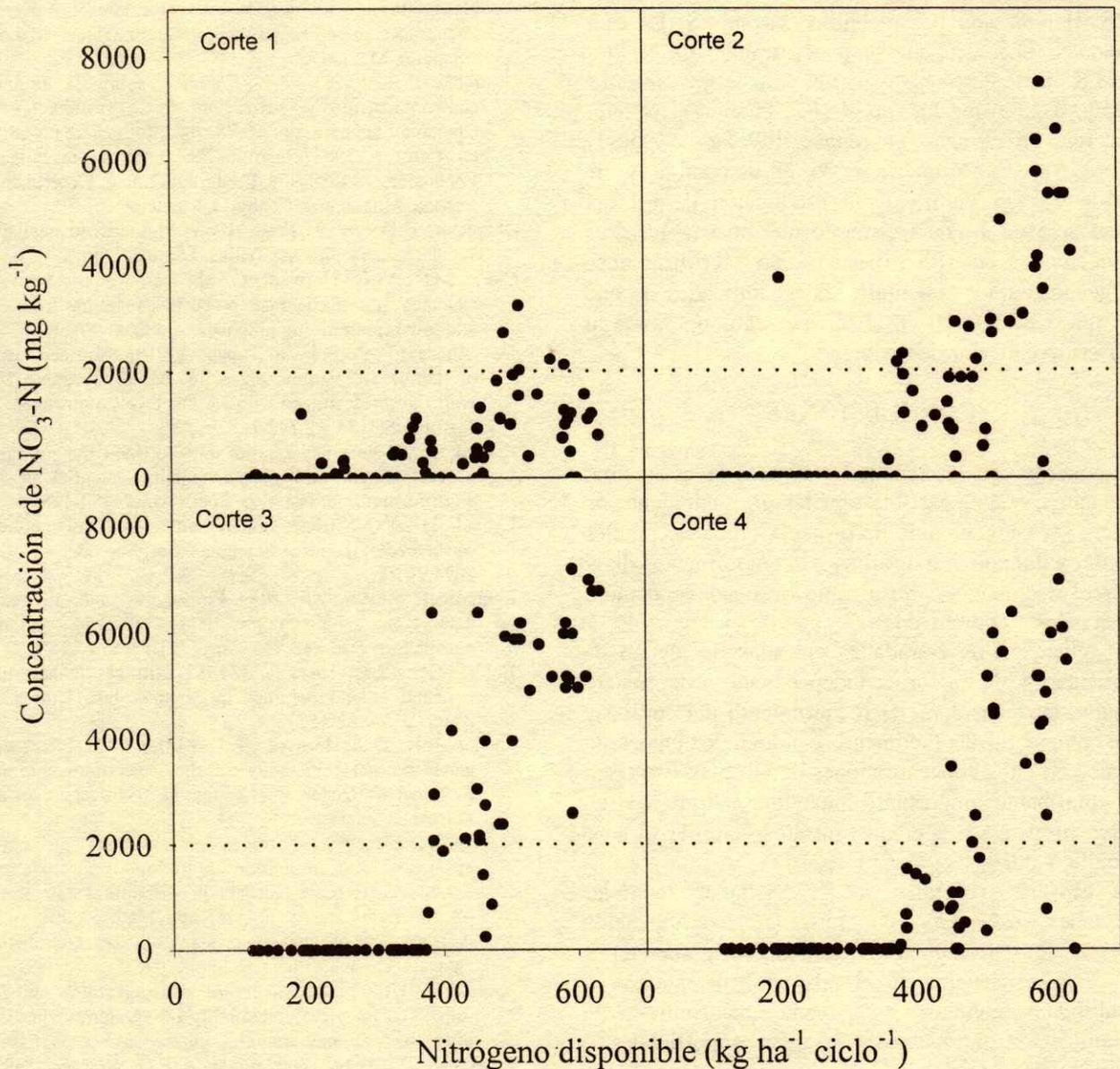


Figura 5. Concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ en la materia seca del ballico italiano por corte, de acuerdo con el nitrógeno total disponible en el ciclo.

La dosis de N recomendada en la región para esta especie es de 260 kg ha⁻¹ ciclo⁻¹, la cual se ha determinado con base en estudios de rendimiento, pero dependiendo del N inicial en el suelo y otras fuentes, la concentración de N-NO₃ puede llegar a niveles tóxicos, como sucedió en el tercer corte (Figura 4). En este caso, la concentración de N-NO₃ en el FS pudo deberse a que el ballico en este corte presentó una menor producción (Figura 2).

Para cumplir con el resto de los objetivos del estudio, se relacionó la concentración de N-NO₃ con el total del N disponible en el ciclo, el cual se consideró como el N total (suelo + fertilizante + estiércol) removido por el ballico en su FS. En esta relación se encontró que la concentración de N-NO₃ en el FS puede llegar a superar el valor crítico inferior de 1500 a 2000 mg kg⁻¹ de N-NO₃, cuando el N total disponible en el ciclo sobrepase 400 kg ha⁻¹ de N (Figura 5). Con este valor de N disponible y de acuerdo con la Figura 1, la producción de FS del ballico será de 14 t ha⁻¹, por lo que buscar mayores producciones de FS basadas en fertilizaciones nitrogenadas sólo aumentará las posibilidades de que los valores de N-NO₃ en el forraje sean superiores al valor crítico inferior de toxicidad.

CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados de esta investigación, se concluye que es factible obtener un rendimiento de materia seca y contenido de proteína cruda aceptables en ballico italiano anual, utilizando como fuentes de N estiércol de bovino o fertilizante nitrogenado común, ya sea solos o combinados.

- La aplicación de cantidades elevadas de alguna de las fuentes de N en forma independiente o de manera conjunta sin considerar el requerimiento del cultivo y su fisiología puede fácilmente conducir a obtener un forraje con altas concentraciones de nitratos. Esto será particularmente importante cuando se trate de un cultivo propenso a acumular nitratos como es el caso del ballico anual.

- En especies vegetales sin tendencia a acumular cantidades excesivas de nitratos, la aplicación excesiva de materiales nitrogenados podría conducir a una baja eficiencia en el uso de los abonos y rentabilidad económica, así como contribuir a la contaminación de cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

LITERATURA CITADA

- Bertauski, A.F., J.M. Swiader y D.J. Wehner. 1997. Dry weight production and nitrogen efficiency traits in Kentucky bluegrass cultivars in nutrient solution and soil. *Crop Sci.* 35: 1548-1553.
- Castellanos R., J.Z. 1982. Efecto del estiércol de bovino sobre las propiedades del suelo y el rendimiento de forraje (I). pp. 142-153. *In: Informes de Investigación en Forrajes.* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México.
- Castellanos R., J.Z. 1983. Efecto del estiércol de bovino sobre las propiedades del suelo y el rendimiento de forraje (II). pp. 405-411. *In: Informes de Investigación en Forrajes.* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México.
- Castellanos R., J.Z. 1987. Estudios sobre la producción, comercialización y utilización de los estiércoles en la Comarca Lagunera. pp. 46-78. *In: Informes de Investigación en Forrajes 1984.* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México.
- Chapman, H.D. y P.F. Pratt. 1986. Métodos de análisis para suelos, aguas y plantas. Trillas. México, D.F.
- Clark, M.S., W.R. Horwath, C. Shennan y K.M. Scow. 1998. Changes in soil chemical properties resulting from organic and low-input farming practices. *Agron. J.* 90: 662-671.
- De Villiers, J.F. y J.B.J. van Ryssen. 2001. Performance response of lambs of various ages to Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) fertilized with various levels of nitrogen. *S. Afr. J. Anim. Sci.* 31(3): 142-148.
- Eckard, R.J. 1990. The relationship between the nitrogen and nitrate content and nitrate toxicity potential of *Lolium multiflorum*. *J. Grassl. Soc. South Afr.* 7: 174-178.
- Eghball, B. 2000. Nitrogen mineralization from field applied beef cattle feedlot manure or compost. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(6): 2024-2030.
- Eghball, B. y J.F. Power. 1999. Phosphorus- and nitrogen-based manure and compost applications: Corn production and soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 91(5): 819-825.
- Ehlig, C.F. y R.W. Hagemann. 1982. Nitrogen management for irrigated annual ryegrass in Southwestern United States. *Agron. J.* 74: 820-823.
- Gavlak, R.R., D.A. Homeck y R.O. Miller. 1994. Plant, soil, and water reference methods for the western region. Western Regional Extension Publication 125. University of Alaska. Fairbanks, Alaska.
- Keeney, D.S. 1982. Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution. pp. 605-649. *In: F.J. Stevensen (ed.). Nitrogen in agricultural soils.* Agronomy 22. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Kuehl, R.O. 1994. Statistical principles of research design and analysis. Duxbury Press. Belmont, CA.
- Kunelius, H.T. 1980. Effects of nitrogen rates and harvest schedules on yield and quality of Westernworlds ryegrass grown as a summer annual. *Can. J. Plant Sci.* 60: 519-524.
- Lawrence, T., G.E. Winklemann y F.G. Warder. 1982. The chemical composition of Russian and Altai wild ryegrass and

- crested wheatgrass as influenced by N fertilization and date of harvest. *Can. J. Plant Sci.* 62: 373-390.
- McMichael Jr., R.W., M. Bachmann y S.C. Huber. 1995. Spanish leaf sucrose-phosphate synthase and nitrate reductase are phosphorylated/activated by multiple protein kinases *in vitro*. *Plant Physiol.* 108: 1077-1082.
- Mengel, K. 1996. Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. *Plant Soil* 181: 83-93.
- Montoya R., J.A. 1994. Efecto de la fertilización nitrogenada y la altura de la planta al corte, sobre el desarrollo, rendimiento y concentración de nitratos en ballico italiano (*Lolium multiflorum* L.). Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10. DGTA-SEP. Torreón, Coahuila México.
- Olson, R.A. y L.T. Kurtz. 1982. Crop nitrogen requirements. pp. 567-604. *In*: F.J. Stevensen (ed.). Nitrogen in agricultural soils. Agronomy 22. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- SAS Institute Inc. 1990. SAS Language:Reference, Version 6. First edition. Cary, NC.
- Thomas, N. y J.M. Farías F. 1978. Influencia del intervalo de corte, aportación de agua y niveles de fertilizante nitrogenado sobre el rendimiento de ballico anual (*Lolium multiflorum* Lam.) var. Oregon en la Comarca Lagunera. pp. 1-24. *In*: Investigación Agrícola en Forrajes. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas-Centro de Investigaciones Agrícolas del Norte-Campo Experimental La Laguna. Matamoros, Coahuila, México.
- Soil Survey Staff. 1996. Keys to soil taxonomy. 7th edition. US Department of Agriculture. National Resources Conservation Service. Washington, D.C.
- Wright, M.D. y K.L. Davison. 1964. Nitrate accumulation in crops and nitrate poisoning in animals. *Adv. Agron.* 16: 197-247.

RESEÑA DE LIBROS

Presentación

CAÑA DE AZUCAR: Hacia un manejo sustentable. 2001. Sergio Salgado García, Lauro Bucio Alanís, David Riestra Díaz y Luz del C. Lagunes Espinoza. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco. Villahermosa, Tabasco. 394 p. ISBN 968-839-331-2.

El libro de distinguidos autores se extiende por las principales áreas que componen en un todo armónico los conocimientos actualizados de la Botánica, la Genética, la Fisiología y demás ciencias auxiliares en la comprensión, explicación y métodos posibles para encontrar nuevos caminos para superar los rendimientos de campo y fábrica. Son éstas las razones que explicarán el creciente entusiasmo que despertará su lectura. Recientemente ha cobrado importancia la siembra de pequeñas plántulas al usual de cordones de trozos de caña sobre los surcos y convendrá conocer costos, beneficios y riesgos de la obtención de plántulas por yemas o por cultivo de tejidos. Las intensas batallas de competitividad que se libran en todos los países cañeros han llevado en los últimos años a un sistema australiano de siembra que se está probando en diversos ingenios para aumentar la densidad de surcos y, al mismo tiempo, permitir la cosecha mecanizada y hacer más económico el riego por goteo. Los métodos de muestreo de campo y análisis para programar la cosecha fueron establecidos en México hace más de 40 años y no han tenido modificación alguna y esto naturalmente causa una inquietud al investigador. Los capítulos de suelos, análisis de ellos, de tejidos vegetales y experimentos de campo de superficies de respuesta a las dosis de fertilizantes, han tenido cada uno sus altas y bajas en el favor de agricultores e investigadores en los últimos sesenta años. Estas sensibles e importantes herramientas para llevar a los cañeros la mejor recomendación lamentablemente no se discuten.

Dr. Basilio A. Rojas Martínez, Profesor Investigador Emérito,
Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática,
Colegio de Postgraduados, México.

El libro es un excelente compendio de las experiencias de los autores en el Campus Tabasco, del Colegio de Postgraduados, complementado con los resultados de otros investigadores nacionales, todo ello dentro de un marco temático enriquecido con información internacional, para ofrecer al lector en forma detallada, ordenada y amena, con numerosas ilustraciones, las mejores técnicas de instalación, atención y utilización del cultivo de la caña de azúcar. En el tiempo presente, cuando el cultivo de la caña de azúcar está experimentando en México momentos difíciles por la abierta competencia del mercado internacional y por el uso de sustitutos de la sacarosa, este libro cobra mayor relevancia como una valiosa herramienta para un uso más racional y eficiente de los insumos al cultivo de la caña de azúcar, que mejore los ingresos de los productores cañeros y garantice la sostenibilidad del agrosistema.

Dr. Roberto Núñez Escobar, Profesor Investigador Emérito,
Instituto de Recursos Naturales
Colegio de Postgraduados, México.

La amplitud de los temas involucrados, hacen de esta obra un valiosa contribución, y seguramente servirán de apoyo para los técnicos y estudiantes interesados en el cultivo comercial de la caña de azúcar.

Dr. Silverio Flores Cáceres, Asesor Técnico de la Cámara Nacional de la Industria Azucarera y Alcohólica, México.

En esta obra los autores presentan los resultados más relevantes de sus investigaciones, las experiencias de capacitación, sin excluir como es lógico, la vasta experiencia acumulada a nivel nacional e internacional sobre el cultivo de la caña de azúcar. La amplitud de temas involucrados en esta obra la hacen una herramienta de apoyo indispensable para los productores, técnicos y estudiantes de agronomía interesados en dar al cultivo de la caña de azúcar un manejo sostenible para incrementar en el corto plazo y sostener la productividad del sector cañero mexicano.

M.C. Jaime Lastra Escudero
Presidente de la Fundación Produce Tabasco A.C.

Esta obra dedicada a uno de los cultivos agrícolas más importantes de Latinoamérica, aborda en sus 20 capítulos aspectos relevantes desde las características botánicas y fisiológicas de esta gramínea hasta todos los elementos vinculados a su cultivo eficiente y sostenible. El contenido está escrito en lenguaje comprensible aun para aquellos que no son especialistas, por lo que llena un espacio en la bibliografía mundial sobre el cultivo de la caña de azúcar. El libro contiene valiosa información original por lo que está llamado a jugar un papel importante y será de consulta obligada por los cañicultores del mundo.

Dr. Rafael Villegas Delgado
Académico Titular de la Academia de Ciencia de Cuba y
Subdirector del Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar.

Revisores quienes participaron en este número

Acosta Hernández, Rafael	Montecillo, estado de México
Adame Martínez, Salvador	Toluca, estado de México
Armenta Bojórquez, Dagoberto A.	Guasave, Sinaloa, México
Becerril Román, A. Enrique	Montecillo, estado de México
Bravo Lozano, Ángel A.	Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México
Castellanos Ramos, Javier Z.	Celaya, Guanajuato, México
Cueto Wong, José A.	Ciudad Lerdo, Durango, México
Espinosa Hernández, Vicente	Montecillo, estado de México
Estrada Avalos, Juan	Ciudad Lerdo, Durango, México
Geissert Kientz, Daniel	Xalapa, Veracruz, México
González Barrios, José Luis	Ciudad Lerdo, Durango, México
Krasil Nkov, Pavel	México, D.F.
López Alcocer, Eduardo	Guadalajara, Jalisco, México
López Martínez, José D.	Ciudad Lerdo, Durango, México
Nakama, Vicente	Castelar, Argentina
Pastor Sáez, J. Narciso	Lleida, España
Pineda Pineda, Joel	Chapingo, estado de México
Ramírez Gama, Rosa María	México, D.F.
Rebolledo Robles, Héctor H.	Chapingo, estado de México
Ruiz Vega, Jaime	Sta. Cruz Xococotlán, Oaxaca, México
Salgado García, Sergio	H. Cárdenas, Tabasco, México
Sánchez García, Prometeo	Montecillo, México
Sánchez Sánchez, Ernesto	Navojova, Sonora, México
Tavarez E., Carlos	México, D.F.
Tiscareño López, Mario	Aguascalientes, México
Trinidad Santos, Antonio	Montecillo, México
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México

Editores Técnicos quienes evaluaron los artículos de este número

Corlay Chee, Langen	Chapingo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
González Chávez, Carmen	Montecillo, estado de México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México

