

ISSN 0187-5779

TERRA

Latinoamericana

OCTUBRE - DICIEMBRE DE 2004 • VOLUMEN 22 • NÚMERO 4



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

TERRA

Latinoamericana

COMITE EDITORIAL

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

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

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

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

Dr. Juan José Peña Cabriales
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
Dr. Alejandro Velázquez Martínez

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

Dr. Winfried E. H. Blum	Austria
Dr. Elemer 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 Rajj	Brasil
Dr. Rafael Villegas Delgado	Cuba
Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. Daniel Buschiazzo E.	Argentina

TERRA

Latinoamericana

EDITORIAL COMMITTEE

EDITOR	Dr. Antonio Vázquez Alarcón
ASSOCIATE EDITOR	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
TECHNICAL EDITORS	Dr. David Cristóbal Acevedo Dr. David Espinosa Victoria Dra. Ma. del Carmen González Chávez Dra. Edna Alvarez Sánchez Dr. Mateo Vargas Hernández Dra. Carmen Gutiérrez Castorena Dr. Manuel Sandoval Villa
STYLE EDITORS	M.C. Jorge Alvarado López Ina Aalmers de Aguilar
ENGLISH EDITOR	Diane Fumiko Miyoshi Udo

EDITORIAL STAFF

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

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Juan José Peña Cabriales
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
Dr. Alejandro Velázquez Martínez

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Winfried E. H. Blum	Austria
Dr. Elemer 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 Delgado	Cuba
Dr. José Aguilar Ruiz	España
Dr. Fernando Santibañez Quezada	Chile
Dr. David Buschiazio E.	Argentina

TERRA

Latinoamericana

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 2003-2005

Presidente	Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez
Vicepresidente	Dr. José A. Cueto Wong
Secretario General	Ing. Andrés Espinosa Carmona
Tesorero	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Secretario Técnico	Dr. Enrique Salazar Sosa
Secretaría de Relaciones Internacionales	Dr. Rogelio Juárez González
Vocales	Dr. Ernesto Frías Ramírez
	Dra. Christina Siebe Grabach
	Dr. Juan Pedro Flores Marges
	Dra. Claudia Hidalgo Moreno
	Dr. David Cristobal Acevedo
	M.C. Yolanda L. Fernández Pavía
	M.C. Laura B. Reyes Sánchez

DIVISIONES Y DISCIPLINAS

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

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

División II: Relación Suelo - Clima - Biota

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

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

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

División IV: Educación y Asistencia Técnica

- a) Educación
- b) Crédito y Asistencia Técnica

TERRA Latinoamericana registro en trámite.
Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Octubre-Diciembre de 2004 Volumen 22 Número 4
ISSN 0187 - 5779

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

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

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

TERRA

Latinoamericana

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

President	Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez
Vicepresident	Dr. José A. Cueto Wong
Secretary	Ing. Andrés Espinosa Carmona
Treasurer	Dr. Javier Z. Castellanos Ramos
Technical Adviser	Dr. Enrique Salazar Sosa
International Relations	Dr. Rogelio Juárez González
Voters	Dr. Ernesto Frías Ramírez
	Dra. Christina Siebe Grabach
	Dr. Juan Pedro Flores Marges
	Dra. Claudia Hidalgo Moreno
	Dr. David Cristobal Acevedo
	M.C. Yolanda L. Fernández Pavía
	M.C. Laura B. Reyes Sánchez

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Assistance

TERRA Latinoamericana Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
October-December, 2004 Volume 22 Num. 4

ISSN 0187 - 5779

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

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

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

TERRA

Latinoamericana

OCTUBRE - DICIEMBRE DE 2004 • VOLUMEN 22 • NÚMERO 4
OCTOBER- DECEMBER, 2004 • VOLUME 22 • NUMBER 4

DIVISION I

- 389 Génesis de suelos del Parque Nacional "El Tepeyac".
Soil genesis of the National Park "El Tepeyac".
Gilberto Vela-Correa y David Flores-Román

DIVISION II

- 401 Comparación de tres métodos de análisis de silicio en tejido foliar de pepino.
Comparison of three methods of silicon analysis in cucumber leaf tissue.
S. Parra-Terraza, G.A. Baca-Castillo, R. Carrillo-González, J. Kohashi-Shibata, A. Martínez-Garza y C. Trejo-López
- 409 Índices de reflectancia y rendimiento del frijol con aplicaciones de nitrógeno.
Spectral reflectance indices and yield in bean with nitrogen applications.
M. Gutiérrez-Rodríguez, J. Alberto Escalante-Estrada, M. Teresa Rodríguez-González y Matthew P. Reynolds
- 417 Respuesta del balance hídrico al raleo de una plantación joven de *Pinus radiata* (D. Don) en el seco interior de Chile.
Responses of water balance to thinning of young *Pinus radiata* (D. Don) stands in dry land of Chile.
Anton Huber y Ramiro Trecaman
- 425 Producción de CO₂ en Andosoles afectados por incendios forestales en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo.
CO₂ production in Andosols affected by forest fires in the National Park El Chico, Hidalgo.
Elena Ikkonen, Efraín Ángeles-Cervantes y Norma E. García-Calderón
- 433 Tomate industrial con riego por cinta.
Industrial tomato under tape irrigation.
Adán Fimbres-Fontes

TERRA

Latinoamericana

DIVISION III

- 437 Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, estado de México.
Calibration of the hydrologic model SWAT in the watershed "El Tejocote", Atlacomulco, State of Mexico.
Elibeth Torres-Benites, Demetrio S. Fernández-Reynoso, José Luis Oropeza-Mota y Enrique Mejía-Saenz

- 445 Normas DRIS preliminares para nogal pecanero.
Preliminary DRIS Norms for pecan tree.
Ma. del Consuelo Medina-Morales

DIVISION IV

- 451 Uso de tecnología para el mejoramiento del suelo: Estudio psicosocial.
Use of technology for soil improvement: Psychosocial study.
Luis Alipio Guillén-Pérez, Concepción Sánchez-Quintanar y Serafín Mercado-Doménech

NOTA DE INVESTIGACION / Research Note

- 459 Effects of mulching, irrigation and foliar fertilization upon growth, production and nutrient concentration of 'Agua Nueva II' apple.
Efectos de cubierta, riego y fertilización foliar en crecimiento, producción y concentración nutrimental de manzana 'Agua Nueva II'.
A. Enrique Becerril-Román, Armando Ibáñez-Martínez, and Rafael A. Parra-Quezada
- 467 Silicio y potencial osmótico de la solución nutritiva en el crecimiento de pepino.
Silicon and osmotic potential of nutrient solution in the growth of cucumber.
S. Parra-Terraza, G.A. Baca-Castillo, R. Carrillo-González, J. Kohashi-Shibata, A. Martínez-Garza y C. Trejo-López

TERRA

Latinoamericana

- 475 Influencia de la harina de sangre y fertilizantes en características físicas y rendimiento de jícama.
Influence of bloodmeal and fertilizers on physical characteristics and yield of yam bean.
José Héctor Abraham-Gutiérrez, Abel Gil-Muñoz, Engelberto Sandoval-Castro, Benjamín V. Peña-Olvera y F.H. Eduardo Almeida-Acosta

ENSAYO / Essay

- 485 El papel de óxidos de hierro en suelos.
Role of iron oxides in soils.
Otilio Acevedo-Sandoval, Enrique Ortiz-Hernández, Misael Cruz-Sánchez y Enrique Cruz-Chávez
- 499 Salinidad en el bajo río Conchos: Aportes y tendencias.
Salinity variations along the lower Rio Conchos: Sources and trends.
Mélida Gutiérrez y Enrique Carreón-Hernández
- 507 Hongos micorrízicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad.
Arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation and its stability.
M.C.A. González-Chávez, M.C. Gutiérrez-Castorena y Sara Wright
- 515 Educación ambiental, imprescindible en la formación de nuevas generaciones.
Environmental Education, Essential in the Development of New Generations.
Margarita R. Gómez-Moliné y Laura Bertha Reyes-Sánchez

TERRA

Latinoamericana

CARTA AL EDITOR / *Letter to the Editor*

523 Cuarenta y cinco años de la Ciencia del Suelo en el Colegio de
Postgraduados-México
David Espinosa-Victoria

Revisores y Editores Técnicos de este número Reviewers and Technical Editors of this number	533
Índice de Autores Volumen 22/Authors index Volume 22	535
Normas para publicación/Instructions to authors	537

GÉNESIS DE SUELOS DEL PARQUE NACIONAL "EL TEPEYAC" Soil Genesis of the National Park "El Tepeyac"

Gilberto Vela-Correa^{1†} y David Flores-Román²

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo fueron: a) determinar las propiedades morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas de los suelos y capas endurecidas; b) plantear una hipótesis sobre su origen; y c) determinar la distribución de las principales unidades de suelos en el parque nacional "El Tepeyac". Los suelos se formaron a partir de materiales dacíticos y andesíticos, así como de cenizas volcánicas que en el momento de depositarse se estratificaron y se consolidaron. Se caracterizan por su pedregocidad y presentar una secuencia de formación AR y/o AC; en algunos casos pueden presentar un horizonte Bt. Son ligeramente ácidos, ricos en materia orgánica, con una alta capacidad de intercambio catiónico y un elevado porcentaje de saturación de bases. En los suelos de ladera de formación *aluvio-colluvial*, domina la haloisita como producto del intemperismo del vidrio volcánico y, en los terrenos planos, los procesos de alteración *in situ* del material parental propiciaron que se formara montmorillonita. Los estratos endurecidos se caracterizan por un dominio del Si sobre el Al y el Fe, debido a la presencia de materiales silícicos con un bajo grado de intemperismo. Los suelos se clasificaron como Phaeozem lúvicos y Phaeozem lépticos.

Palabras clave: *Edafogénesis, tepetates, tobas, Sierra de Guadalupe.*

SUMMARY

The objectives of this study were (a) to determine the main morphological, physical, chemical, and mineralogical properties of the soils and indurated

¹ Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana - Xochimilco. Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Coyoacán, 04960 México D.F.

[†] Autor responsable: (gvela@cueyatl.uam.mx)

² Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.

Recibido: Diciembre de 2002. Aceptado: Julio de 2004.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 22: 389-399.

layers; (b) to state hypotheses about their origin; and (c) to determine main soil distribution units in the national park "El Tepeyac". The soils in the study area were formed from materials of dacitic and andesitic origin and volcanic ashes, which were consolidated at their deposit and formed hardened layers. They are rocky and present a sequence of A/C and/or A/R horizon formation. In some cases they present a Bt horizon. The soils are lightly saline and rich in organic matter, with a high CEC and percentage of base saturation. Halloisite is dominant in slope soils and montmorillonite in plain soils. In Cqm layers exists abundance of Si over Al and Fe, due to the presence of siliceous materials with low weathering level. The greater part of the soils were of alluvio-colluvial formation and were classified as Leptic phaeozems and Luvic phaeozems.

Index words: *Edafogenesis, tepetates, tuff, Sierra de Guadalupe.*

INTRODUCCIÓN

La génesis de suelos es el estudio de la intemperización de los minerales primarios, la liberación de sus elementos, así como las posibles re combinaciones para formar nuevos constituyentes estables y minerales. Incluye los procesos que se producen durante o después de la intemperización, relacionados con la morfología, el arreglo y su redistribución en horizontes de los constituyentes del suelo (Brady, 1984; Birkeland, 1990; Rondón y Elizalde, 1994).

En la actualidad, los estudios de edafogénesis han cobrado mucha importancia, en virtud de que al suelo se le considere, de manera más apropiada, en los diversos programas de conservación de los recursos naturales, ya que se trata de un recurso no renovable, por lo que su degradación acarrea graves consecuencias económicas, sociales y ambientales (Artieda, 2004). Con anterioridad, el desconocimiento, la falta de interés y de recursos económicos han propiciado que, en algunas ocasiones, se hayan ejecutado diversas acciones sin considerar los procesos de formación y las características físicas

y químicas de los suelos. Tal es el caso del Parque Nacional El Tepeyac, donde varios de los programas que se han llevado a cabo se elaboraron con datos generados hace más de 15 años, por lo que la información no es vigente y, en muchos de los casos, ya no se ajusta a las necesidades actuales.

Lamentablemente, el parque sufre el impacto de incendios, destrucción de la vegetación original, así como la extracción de piedra y tierra. Además de que una de las principales causas del deterioro de la zona es el cambio de uso del suelo, ya que siendo suelos totalmente forestales se han convertido en terrenos agrícolas. Otra situación que se presenta es el establecimiento de asentamientos humanos irregulares, siendo evidentes en las laderas del parque, que han sido ocupadas por la población aledaña a ellas.

La información generada a partir de estudios recientes puede ser de gran utilidad en la elaboración de propuestas que permitan la restauración y conservación de esta zona que se encuentra altamente alterada, más aún si se trata de una de las escasas áreas verdes existentes al norte de la Ciudad de México. Por lo anterior, los objetivos de este trabajo, fueron: 1) determinar las propiedades morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas de los suelos; 2) plantear una hipótesis sobre su origen y 3) determinar la distribución cartográfica de los principales grupos de suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El parque nacional El Tepeyac forma parte de la Sierra de Guadalupe, la cual se localiza en los límites entre el Distrito Federal y el estado de México. El parque está formado por una pequeña cordillera al sureste de la Sierra, integrada por los cerros: Zacatenco, Vicente Guerrero, Gachupines y Tepeyac, los cuales cubren una superficie de 284.66 ha, con una altitud entre 2250 y 2500 m (Figura 1).

La zona es de origen volcánico, debido a los procesos explosivos de gran intensidad que se presentaron en las etapas iniciales de su formación y que culminaron con procesos extrusivos, manifestándose con derrames de lava de corta extensión, siendo ejemplo de ello los volcanes Vicente Guerrero y Zacatenco. Otras elevaciones se originaron casi exclusivamente por la actividad efusiva, como es el caso de los domos volcánicos, conocidos como el Chiquihuite y el Tepeyac. En la mayoría de estas elevaciones se encuentran laderas donde la pendiente

es mayor que 25% en las que predominan las andesitas, incluyendo brechas, pórfidos y vitrificados como material parental de los suelos (Mosser, 1977, 1990). A partir del fechamiento de algunas de estas rocas, se ha estimado una edad Pliocénica (14 Ma) para el oriente de la Sierra de Guadalupe.

El clima, de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1988), es C(wo)(w) templado subhúmedo, con precipitaciones escasas en el verano, siendo la temperatura media anual de 16 °C y la precipitación total anual de 584.7 mm. La vegetación en su mayoría está integrada por un bosque artificial donde las especies que predominan son *Eucalyptus* spp., *Schinus molle*, *Casuarina equisetifolia* y diversas especies de *Pinus* spp. (Vela y Flores, 2000).

Muestreo de Suelos

Se elaboró el plano topográfico de la zona en estudio a escala 1:20 000, tomando como base las cartas topográficas a escala 1:20 000 editadas por Sistemas de Información Geográfica, S. A. (SIGSA, 1986); la ubicación de los sitios de muestreo se determinó a partir de un muestreo aleatorio estratificado, mediante el análisis de fotografías aéreas a escala 1:20 000 y apoyándose con diversos recorridos por el área. En total se trabajaron ocho perfiles de suelos, pero específicamente en este estudio, se presentan los resultados de los perfiles característicos del parque, los cuales son: P-1 Los Gachupines, P-2 Vicente Guerrero y P-3 Zacatenco (Figura 1). La descripción de los perfiles y la toma de muestras de suelos se realizaron con base en Cuanalo (1990), la designación de los horizontes de acuerdo con Soil Survey Staff (1999) y la clasificación de los grupos de suelos a partir de la World Reference Base (FAO-ISRIC-SICS, 1999).

Análisis de Suelos

Las determinaciones físicas que se realizaron a cada una de las muestras de suelo fueron: color, (Munsell, 1994); densidad aparente (Klute, 1986), densidad real con base en Soil Survey Staff (1984); la granulometría se determinó de acuerdo con Day (1965). Las determinaciones químicas que se llevaron a cabo fueron: capacidad de intercambio catiónico (Jackson, 1976); el pH relación 1:2 mediante el potenciómetro con electrodo de vidrio; la materia

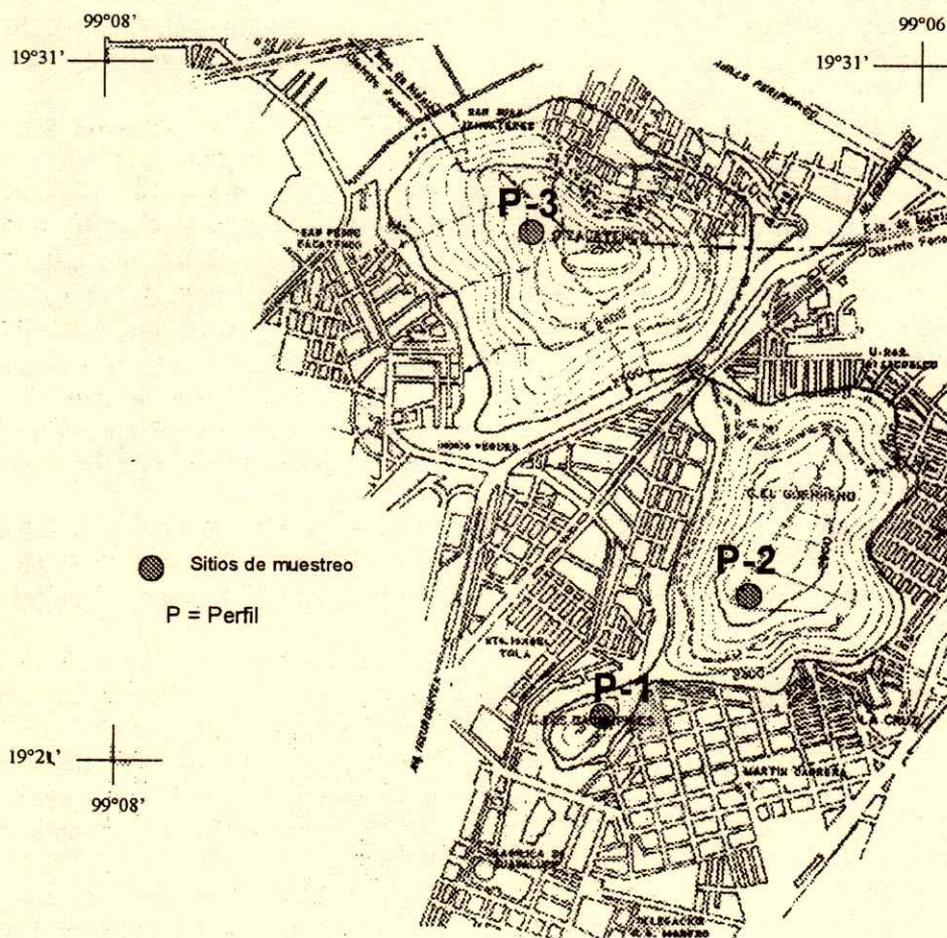


Figura 1. Localización de la zona en estudio (Sitiros de muestreo; P = perfil).

orgánica por Walkley y Black (1934); los óxidos libres de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 de acuerdo con Mehra y Jackson (1960); los óxidos totales por Verbeek *et al.* (1982) y la meteorización mediante los balances geoquímicos a partir de Krauskopf (1979). El análisis mineralógico se realizó mediante difracción de rayos X, utilizando un generador Philips PW 1130/96 con radiación de cobre K α , monocromador de grafito, filtro de Vanadio y condiciones de excitación de 30 KV-20mA, la identificación mineralógica de arcillas se basó en Mineral Powder Diffraction File, Search Manual and Data Book (JCPDS, 1986a, 1986b). Asimismo, a las muestras se les aplicaron pretratamientos con saturación de K y calentamientos a 350 y 550 °C, posteriormente, se realizó la evidencia confirmativa. También se efectuó un estudio en el microscopio electrónico de barrido, utilizando láminas especialmente preparadas, con el propósito de

determinar el grado y la alteración de los materiales endurecidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características Morfológicas de los Suelos

Perfil 1. Los Gachupines. Se ubica en las faldas al norte del cerro Gachupines a 30 m del llamado "muro ecológico" con una altitud de 2300 m. La vegetación del lugar está compuesta principalmente por árboles de *Eucalyptus* spp. "eucaliptos" y *Schinus molle* "pirul", así como diversas gramíneas *Cynodon dactylon* "pata de gallo", *Hordeum jubatum* "cebada silvestre" y *Avena fatua* "avena loca". El material parental está formado por lavas de andesita, presentándose afloramientos en la parte sur del cerro; la profundidad del suelo es de 36 cm hasta el contacto lítico.

Se identificaron dos horizontes, el horizonte A con 5 cm de espesor a partir de la superficie; su color es 10YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro en seco y 10YR 2/1 gris muy oscuro en húmedo; presenta una separación tenue con la siguiente capa, su consistencia es suelta en seco y friable en húmedo, con menos de 1% de piedras de tamaño pequeño; la estructura es granular, débilmente desarrollada con abundantes raíces de tamaño fino.

El horizonte A2 tiene una profundidad de 5 a 36 cm; su color es 10YR 3/1 gris muy oscuro en seco y 10YR 2/1 negro en húmedo; presenta una separación marcada de forma horizontal con el lecho rocoso, formado por andesitas, es ligeramente adhesivo; pedregoso con fragmentos de roca, entre 5 a 10 cm de diámetro; tiene una estructura prismática angular débilmente desarrollada, con abundantes raíces de tamaño fino.

Perfil 2. Vicente Guerrero. Este perfil se encuentra a una altitud de 2445 m, en la cima del cerro Vicente Guerrero, en la parte plana (pendiente < 3%), donde se practica agricultura de temporal en pequeñas terrazas de forma irregular, conocidas como "apancales", que se trabajan con yunta o a mano. Se cultiva maíz criollo y los linderos de las parcelas están formados por plantas de *Agave atrovirens* "maguey", *Schinus molle* "pirul" y *Eucalytus* spp. "eucalipto". En su superficie es pedregoso, ya que presenta piedras menores que 30 cm de diámetro de naturaleza andesítica.

El horizonte Ap tiene una profundidad de 20 cm, su color es 5YR 4/1 gris oscuro en seco y 10YR 2/1 negro en húmedo; presenta una transición a la siguiente capa tenue de forma horizontal; su consistencia es ligeramente dura en seco y friable en húmedo; es ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; su estructura es poliédrica subangular, débilmente desarrollada; es ligeramente pedregoso, predominando las piedras pequeñas de forma subangular; se observó la presencia de miriápodos. Este horizonte se encontraba bien drenado.

A una profundidad de 20 a 35 cm se encuentra el horizonte 2A que tiene una coloración 10YR 4/1 gris oscuro en seco y 5Y 3/1 gris muy oscuro en húmedo; presenta una separación marcada de forma irregular con la siguiente capa; ligeramente húmedo; con una consistencia dura en seco y friable en húmedo; es ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; la estructura es poliédrica subangular, débilmente desarrollada; ligeramente pedregoso, con presencia de piedras de tamaño medio de forma angular y

subangular; su permeabilidad es moderada; presenta pocas raíces de tamaño fino; se observó la presencia de miriápodos. Este horizonte se encontraba bien drenado.

El horizonte 2Bt se encuentra entre 35 a 48 cm de profundidad; su color es 10YR 6/3 pardo pálido en seco y 10YR 5/2 pardo grisáceo en húmedo; la transición con el horizonte 3BC es de forma irregular; se encontraba húmedo; su consistencia es blanda en seco y friable en húmedo; es ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; su estructura es poliédrica subangular, débilmente desarrollada; es ligeramente pedregoso, con piedras de tamaño pequeño de forma subangular; su permeabilidad se considera moderada; presenta pocas raíces, principalmente de tamaño fino y delgado.

El horizonte 3BC, con una profundidad de 48 a 55 cm, presentó un color 2.5YR 6/2 rojo pálido en seco y 10YR 5/2 pardo grisáceo en húmedo; su consistencia es blanda en seco y muy firme en húmedo; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. A partir de 55 cm, se encuentra una capa de material endurecido, conocida como "tepetate". El color de esta capa es 7.5YR 4/3 gris rosáceo en seco y 10YR 4/3 pardo grisáceo oscuro en húmedo; en campo, a esta capa se le designó como un horizonte 4Cqm.

Perfil 3. Zacatenco. Se localiza en la cima del cerro Zacatenco, a 30 m del camino principal y a 25 m de la mojonera que divide al Distrito Federal del Estado de México a una altitud de 2475 m. Es un área reforestada con *Pinus radiata*, además de existir diversas gramíneas, como *Cynodon dactylon* y *Hordeum jubatum*. Sobre el terreno se encuentran distribuidas algunas rocas de origen andesítico de 20 a 30 cm de diámetro.

En este perfil, el horizonte Ah presenta una coloración 10YR 4/2 pardo grisáceo oscuro en seco y 5YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro en húmedo; su espesor es de 29 cm a partir de la superficie; la transición a la siguiente capa es marcada de forma horizontal; su consistencia en seco es ligeramente dura y muy friable en húmedo. Asimismo, es ligeramente adhesivo y ligeramente plástico; presenta una estructura poliédrica subangular, débilmente desarrollada; es ligeramente pedregoso, con abundantes raíces de tamaño fino.

El horizonte 2Cqm se encuentra a partir de 29 cm de profundidad; su color es 10YR 4/2 pardo pálido en seco y 10YR 4/4 pardo amarillento oscuro en húmedo; se encontró ligeramente húmedo; su consistencia es

muy dura en seco y extremadamente firme en húmedo; ligeramente adhesivo y ligeramente plástico.

Propiedades Físicas

En los tres perfiles, las texturas que dominan son la franco-arcillosa y la franco-arcillo-limosa; en los horizontes superficiales la densidad aparente oscila entre 0.82 a 1.13 Mg m⁻³, misma que se incrementa con la profundidad hasta llegar a ser mayor que 1.5 Mg m⁻³ en los horizontes Cqm del P-2 y P-3. La densidad real alcanza valores de 1.85 a 2.21 Mg m⁻³, aumentando con la profundidad en

correspondencia con la presencia de materiales menos intemperizados (Cuadro 1).

Los resultados del análisis granulométrico se presentan en el Cuadro 2; en los horizontes superficiales del P-1 predominan las arenas de tamaño fino y grueso, así como limos gruesos. En el P-2, las arenas gruesas y medias están presentes, en particular en el horizonte 3BC, mientras que los limos gruesos están distribuidos en los horizontes superficiales y las arcillas se presentan en los horizontes 2Bt y 3BC, donde existe un porcentaje mayor al doble con relación al horizonte A2 y el horizonte Cqm. En el P-3, la fracción mineral está integrada por arenas finas

Cuadro 1. Características físicas.

Horizonte	Profundidad cm	Color		Densidad		Redondez [†]			Esfericidad [†]	
		Seco	Húmedo	aparente	real	ma	a	sa	A	B
				Mg m ⁻³		%				
Perfil 1 Los Gachupines										
A	0 a 5	10YR 3/2	10YR 2/1	0.82	1.85	50	50		30	70
A2	5 a 36	10YR 3/1	10YR 2/1	1.05	1.96	50	50		25	75
2R	> 36	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Perfil 2 Vicente Guerrero										
Ap	0 a 20	5YR 4/1	10YR 2/1	1.08	1.69	10	45	45	5	95
2A	20 a 35	10YR 4/1	5Y 3/1	1.13	2.03	10	90		15	85
2Bt	35 a 48	10YR 6/3	10YR 5/2	1.03	2.06	85	15		15	85
3BC	48 a 55	2.5YR 6/2	10YR 5/2	1.05	2.21	100				100
4Cqm	> 55	7.5YR 7/2	10YR 4/3	1.69	2.06	---	---	---	---	---
Perfil 3 Zacatenco										
Ah	0 a 29	10YR 4/2	5YR 3/2	1.01	1.87	15	50	35	20	80
2Cqm	> 29	10YR 6/3	10YR 4/4	1.59	2.21	35	60	5	20	80

[†] ma = muy angular; a = angular; sa = subangular. [†] A = alta; B = baja.

Cuadro 2. Distribución del tamaño de partículas.

Horizonte	Profundidad cm	Arena [†]					Total	Limo [†]			Total	Arcilla [§]	Clase textural [#]
		mg	g	m	f	mf		g	m	f			
Perfil 1 Los Gachupines													
A	0 a 5	1.7	2.8	1.0	6.1	1.4	13.0	31.1	13.8	6.3	51.2	35.8	CrI
A2	5 a 36	2.9	3.0	0.5	10.2	0.7	17.3	35.3	8.0	3.7	47.0	35.7	CrI
2R	> 36	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Perfil 2 Vicente Guerrero													
Ap	0 a 20	1.9	9.6	3.8	7.9	0.2	23.4	29.3	14.0	3.4	46.7	29.9	Cr
2A	20 a 35	1.8	4.1	2.0	3.2	1.9	13.0	25.8	18.2	24.9	68.9	18.1	Cl
2Bt	35 a 48	1.1	2.9	0.3	4.2	0.8	9.3	23.8	16.0	3.2	43.0	47.7	Rl
3BC	48 a 55	4.1	12.0	10.8	1.1	1.3	29.3	8.8	11.6	8.2	28.6	42.1	R
4Cqm	> 55	4.7	18.1	3.6	9.0	13.9	49.3	20.3	5.5	1.9	27.7	23.0	Cra
Perfil 3 Zacatenco													
Ah	0 a 29	1.3	8.3	2.7	8.8	6.8	27.9	23.7	10.2	9.0	42.9	29.2	Cr
2Cqm	> 29	2.7	14.2	2.3	8.6	10.2	38.0	20.0	12.6	6.4	39.0	23.0	C

[†] mg = muy gruesa (2 a 1 mm); g = gruesa (1 a 0.5 mm); m = media (0.5 a 0.25 mm); f = fina (0.25 a 0.05 mm); mf = muy fina (0.10 a 0.05 mm). [†] g = grueso (0.05 a 0.02 mm); m = medio (0.02 a 0.005 mm); f = fino (0.005 a 0.002 mm). [§] partículas menores que 0.002 mm. [#] Cr = franco-arcillosa; CrI = franco-arcillo-limosa; Cra = franco-arcillo-arenosa; Cl = franco-limosa; Ca = franco-arenosa; C = franca; R = arcillosa y Rl = arcillo-limosa.

en el horizonte Ah y arenas gruesas en el horizonte 2Cqm, hay presencia de limos gruesos y medios en ambos horizontes y el porcentaje de arcillas es mayor en el horizonte Ah. Es conveniente mencionar que en la fracción mineral en estos suelos las formas que dominan son angulares y muy angulares, con una esfericidad muy baja, atribuible a procesos de depositación y formación *in situ*, en particular en el horizonte 2Bt del P-2

Propiedades Químicas

En general, puede decirse que el pH tiende a la neutralidad en los tres perfiles (Cuadro 3), aunque es moderadamente alcalino en los horizontes 2Bt y 3BC del P-2, posiblemente debido a la acumulación de bases provenientes de los horizontes Ap y 2A, mientras que en los horizontes 4Cqm es moderadamente alcalino, como lo observaron en otras situaciones Acevedo y Flores (2000). El contenido de materia orgánica con base en Tavera (1985) es de medio a rico en los horizontes superficiales y decrece con la profundidad hasta llegar a valores considerados como muy pobres, en particular en los horizontes 4Cqm del P-2 y 2Cqm del P-3.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue de media a muy alta en los horizontes superficiales en los tres perfiles. Específicamente en el P-2, los horizontes 2Bt y 3BC presentaron los valores más altos de CIC, lo que se atribuye, en gran parte, al alto contenido de arcillas (Cuadro 3). Además, por ser suelos para cultivo y encontrarse en terrazas con

pendientes menores que 3%, en condiciones de drenaje moderadas, se impacta directamente sobre los procesos de neoformación de estas partículas. Estas características indican que en el P-2 hay una buena fertilidad y un fortalecimiento en la agregación y estructuración de los minerales secundarios. A los horizontes 4Cqm del P-2 y 2Cqm del P-3 se les caracterizó como materiales tobáceos, ya que estos materiales son bastante duros en seco y no se colapsaron al estar en contacto con agua, pero se disgregaron al sumergirse en una solución caliente de KOH concentrada a 30%.

El PSB es mayor que 50% con predominio de los iones Ca y Mg, lo cual se relaciona con el pH y la escasa precipitación que se presenta en la zona. En el P-2, por las cantidades de Mg se infiere que los procesos de intemperización de los minerales primarios, principalmente de los aluminosilicatos, propiciaron la formación de cloritas y montmorillonitas.

Génesis de los Suelos

Los suelos del parque nacional "El Tepeyac", como la mayoría de los suelos que se han formado sobre rocas eruptivas y en condiciones de clima estacional, son poco profundos y contienen restos de las rocas originales. La Sierra de Guadalupe se originó a partir de diversos periodos geológicos, formando estructuras con predominancia de brechas y lavas básicas oscuras, luego fluyeron lavas ácidas, las que, a su vez, fueron cubiertas por depósitos de cenizas,

Cuadro 3. Propiedades químicas.

Horizonte	Profundidad cm	pH 1:2 [†]	MO [‡] %	C [§] %	CIC [¶]	Bases intercambiables				PSB [#] %
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
						cmol(+) kg ⁻¹				
Perfil 1 Los Gachupines										
A11	0 a 5	6.9	4.25	2.47	39.88	30.10	18.70	1.73	2.92	100
A12	5 a 36	7.3	2.14	1.24	33.63	34.30	20.30	2.10	0.73	100
2R	> 36	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Perfil 2 Vicente Guerrero										
Ap	0 a 20	7.2	2.82	1.63	22.50	6.0	16.0	0.6	0.6	100
A12	20 a 35	7.2	2.19	1.27	31.23	6.0	24.0	1.0	0.3	100
Bt	35 a 48	7.8	0.62	0.36	49.00	8.0	25.0	1.1	0.3	70
BC	48 a 55	7.8	0.81	0.47	45.00	6.0	26.0	1.1	0.3	74
Cqm	> 55	8.2	0.54	0.31	11.33	4.2	4.8	1.4	2.1	100
Perfil 3 Zacatenco										
Ah	0 a 29	6.6	2.37	1.37	21.60	20.3	9.1	1.9	1.2	100
2Cqm	> 29	7.2	0.73	0.42	27.87	21.7	15.4	2.2	1.5	100

[†] pH en agua; [‡] MO = materia orgánica; [§] C = carbono orgánico; [¶] CIC = capacidad de intercambio catiónico; [#] PSB = porcentaje de saturación de bases.

arenas y gravas como materiales piroclásticos que se consolidaron en el momento de su depósito. Lo anterior se manifiesta en los perfiles P-1 y P-3, ya que éstos se consideraron como discontinuidades litológicas, dado que en el P-1 en la base se encuentra andesita y sobre ella está depositado material coluvial que forma los horizontes A y 2A. Específicamente en el P-3, el horizonte Ah es un material coluvial depositado sobre el horizonte 2Cqm de origen tobáceo producto de un evento volcánico, por lo que no existen pérdidas o ganancias de un horizonte a otro, aunque puede hacerse una comparación a partir de la alteración existente entre los horizontes (Cuadro 4). En este cuadro, la constante de aluminio (K) se obtiene de dividir el porcentaje de aluminio de la roca inalterada (Cqm) entre el porcentaje de aluminio de la roca alterada

(C, BC Bt, A₁₂, A₁₁ y Ap). Esta constante se multiplica por cada uno de los óxidos de los horizontes alterados. Los resultados se comparan con la roca alterada y por sustracción se obtienen las pérdidas (-) o ganancias (+) (Krauskopf, 1979).

En los horizontes superficiales de los tres perfiles, la cantidad determinada de SiO₂ fue muy elevada en comparación con la de Al₂O₃, además de trazas de óxidos de Fe y Mg, reportándose un ligero incremento de CaO en el P-2 atribuible a la alteración de materiales ferromagnesianos y feldespatos (Elsass *et al.*, 2000).

En el Cuadro 5, se señala que el orden y la abundancia de óxidos libres en los tres perfiles fue SiO₂>Fe₂O₃>Al₂O₃, que corresponden a una etapa temprana en el desarrollo de los suelos, reflejándose un bajo grado de alteración (Acevedo y Flores, 2000).

Cuadro 4. Óxidos totales y pérdidas o ganancias por intemperismo.

Horizontes	Óxidos totales								
	SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	AlO ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
	%								
Perfil 1 Los Gachupines									
A (0 a 5)	60.07	3.95	2.17	17.01	0.10	0.49	0.28	3.42	0.20
A2 (5 a 36)	60.51	4.22	2.32	18.51	0.14	0.50	0.17	2.72	0.08
2R (> 36)	56.21	3.82	2.10	19.19	0.13	0.45	0.10	4.77	0.84
A(K)*Al ₂ O ₃	57.78	3.91	2.15	19.03	0.12	0.45	0.11	3.85	0.08
A2(K)*Al ₂ O ₃	48.01	3.19	1.75	19.07	0.40	0.01	3.82	0.01	2.34
Pérdidas o ganancias									
A	-1.57	-0.09	-0.05	0.16	0.01	0	0.01	0.92	0.76
A2	8.20	0.63	0.35	0.12	-0.27	0.10	0.09	1.41	0.83
Perfil 2 Vicente Guerrero									
Ap (0 a 20)	53.36	4.08	2.24	17.19	0.14	4.66	0.67	5.42	0.24
2A (20 a 35)	47.90	4.06	2.22	19.06	0.12	6.80	0.19	4.51	0.08
2Bt (35 a 48)	50.31	3.66	2.01	14.68	0.09	6.88	0.24	2.99	0.01
3BC (48 a 55)	51.18	3.51	1.93	16.42	0.09	4.02	0.18	2.89	0.04
4Cqm (> 55)	61.62	3.96	1.99	21.13	0.14	0.08	0.00	1.03	1.10
Ap(K)*Al ₂ O ₃	65.63	5.02	2.76	21.14	0.17	5.73	0.82	6.67	0.30
2A(K)*Al ₂ O ₃	52.69	4.47	2.44	20.97	0.13	7.48	0.21	4.96	0.09
2Bt(K)*Al ₂ O ₃	72.45	5.27	2.89	21.14	0.13	9.91	0.35	4.31	0.01
3BC(K)*Al ₂ O ₃	73.19	5.02	2.76	23.48	0.13	5.75	0.26	4.13	0.06
Pérdidas o ganancias									
Ap	4.01	1.06	0.77	0.01	0.03	5.65	0.82	5.64	-0.80
2A	-8.93	0.51	0.45	-0.16	-0.01	7.40	0.21	3.93	-1.01
2Bt	10.83	1.31	0.90	0.01	0.01	9.83	0.35	3.28	-1.09
3BC	11.57	1.06	0.77	2.35	-0.01	5.67	0.26	3.10	-1.04
Perfil 3 Zacatenco									
Ah (0 a 29)	58.36	3.95	2.17	19.22	0.12	0.56	0.11	3.89	0.08
2Cqm (> 29)	54.56	3.63	1.99	21.67	0.46	0.40	0.01	3.82	0.01
Ah(K)*Al ₂ O ₃	65.95	4.46	2.45	21.72	0.14	0.51	0.12	4.40	0.09
Pérdidas o ganancias									
Ah	3.80	0.32	0.18	-	-0.34	0.05	0.10	0.07	0.07

Cuadro 5. Óxidos libres.

Horizonte	Profundidad cm	Óxidos libres			Relaciones molares	
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Fe ₂ O ₃
----- % -----						
Perfil 1 Los Gachupines						
A	0 a 5	0.81	0.27	0.50	5.09	4.31
A2	5 a 36	0.81	0.20	0.42	6.87	5.13
2R	> 36	---	---	---	---	---
Perfil 2 Vicente Guerrero						
Ap	0 a 20	0.68	0.20	0.30	5.56	4.32
2A	20 a 35	0.77	0.19	0.47	6.88	4.36
2Bt	35 a 48	0.98	0.13	0.51	12.79	5.19
3BC	48 a 55	1.00	0.12	0.43	14.14	6.18
4Cqm	> 55	1.07	0.11	0.45	16.51	6.32
Perfil 3 Zacatenco						
Ah	0 a 29	0.66	0.23	0.30	4.56	5.48
2Cqm	> 29	0.86	0.26	0.82	5.26	2.61

Las relaciones molares de SiO₂/Al₂O₃ y de SiO₂/Fe₂O₃ mostraron un predominio del SiO₂, en particular en el P-2, reflejándose en un grado mayor de alteración en los horizontes superficiales y menor en los inferiores, en particular en el 3BC y 4Cqm. En cuanto a los horizontes 4Cqm del P-2 y 2Cqm del P-3, se observa que el principal agente cementante es la sílice, que se atribuye a los procesos de alteración del vidrio volcánico y de diversos materiales piroclásticos, que se consolidaron a partir de procesos diagénicos en el momento de su depósito. La relación SiO₂/Al₂O₃ fue de 16.51 para el 4Cqm del P-2 y 5.26 para el horizonte 2Cqm del P-3, estos valores se consideran característicos de materiales poco alterados, donde la escasa precipitación favorece la acumulación de sílice y el que no haya indicios de iluviación en las capas inferiores de los perfiles (Kendrick y McFadden, 1996).

Propiedades Mineralógicas

Los resultados del análisis por difracción de rayos-X indicaron que la fracción arcilla está compuesta por esmectita, montmorillonita, haloisita y caolinita (Cuadro 6). La haloisita se encuentra en los tres perfiles, como producto de la alteración del vidrio y feldespatos, cuya presencia es común en los suelos de origen volcánico (García *et al.*, 1986; Elsass *et al.*, 2000). Asimismo, se estima que esta alteración del vidrio volcánico generó cantidades importantes de compuestos amorfos alófanos en estos suelos. En el P-2 dominan la esmectita y la montmorillonita; la primera se encuentra en los horizontes Ap y 2A y la

segunda en los horizontes 2Bt y 3BC, lo que denota una mayor velocidad de alteración, favorecida por las condiciones de drenaje y lavado moderados en un sitio con pendiente menor que 3%, por lo que se considera que estas arcillas se originaron a partir de procesos de neofonnación, mediante la hidrólisis del vidrio volcánico y la alteración de las plagioclasas cálcicas.

En el P-3, se determinó la presencia de caolinita, que pudo haberse originado a partir de la intemperización de la haloisita, pasando por una fase amorfa, con pérdida parcial de sílice, favorecido esto por las reacciones de hidrotermalismo que, en alguna época, se manifestaron en la Sierra de Guadalupe (Acevedo y Flores, 2000).

Por otra parte, con la ayuda de secciones delgadas, se realizó la observación de los materiales que

Cuadro 6. Análisis de la fracción arcilla.

Horizonte	Profundidad cm	Mineral		
		Caolinitas	Esmectitas	Haloisitas
Perfil 1 Los Gachupines				
A	0 a 5			X
A2	5 a 36			X
2R	> 36	-	-	-
Perfil 2 Vicente Guerrero				
Ap	0 a 20		X	X
2A	20 a 35		X	X
2Bt	35 a 48		X	X
3BC	48 a 55		X	X
4Cqm	> 55		X	X
Perfil 3 Zacatenco				
Ah	0 a 29	X		X
2Cqm	> 29			X

componen los horizontes 4Cqm y 2Cqm de los perfiles P-2 y P-3, respectivamente, donde se determinó que estos materiales están compuestos por una matriz de vidrio desvitrificada, con fragmentos de andesitas y piroclastos que se consolidaron en el momento de su depósito, formando una toba. Los principales minerales que se observaron fueron plagioclasas angulosas y subangulosas, feldespatos de potasio y escasos fragmentos de cuarzo, además de biotitas, piroxenos y hornblenda. La matriz se relaciona con depósitos de cenizas volcánicas (Figura 2). Las rocas que yacen en la Sierra de Guadalupe se presentan sin orden alguno, por lo que pueden encontrarse basaltos junto con andesitas y dacitas, caracterizadas por una textura porfídica con un bajo grado de alteración, por lo que se atribuye el origen de estos materiales a procesos principalmente diagénicos y, en una escala menor, a procesos pedogénicos.

Clasificación y Distribución de Suelos

Los suelos se clasificaron con base en los criterios propuestos por la FAO-ISRIC-SICS (1999), los grupos a los cuales pertenecen los perfiles estudiados son: el P-1 y el P-3 corresponden a Phaeozem léptico (PHle) y el suelo del perfil P-2 a un Phaeozem lúvico (PHlv).

El grupo de suelos que predomina son los Phaeozem lépticos que se encuentran en las laderas y partes más altas de los cerros Zacatenco y

Gachupines, donde ocupan 229.39 ha equivalentes a 80.58% de la zona en estudio (Figura 3). En particular en el cerro Los Gachupines, estos suelos se han reforestado con *Eucalyptus* spp., *Acacia filiforme* y *Casuarina equisetifolia*, no así en el cerro Zacatenco, donde son muy pedregosos y sólo se encuentran algunas gramíneas, como *Cynodon dactylon*, *Hordeum jubatum* y *Distichlis spicata*. Los Phaeozem lúvicos ocupan 55.27 ha o sea 19.42%, se localizan en los terrenos que están sujetos a uso agrícola en el cerro Vicente Guerrero.

CONCLUSIONES

- Los suelos del parque nacional "El Tepeyac" se formaron a partir del intemperismo de rocas eruptivas, como la andesita, y de diversos materiales piroclásticos que se consolidaron en el momento de su depósito, por lo que los suelos son someros, pedregosos, tienden a la neutralidad, son ricos en materia orgánica, con una elevada CIC y un alto porcentaje de saturación de bases.

- Los suelos se caracterizan por presentar un desarrollo de horizontes AC por lo que se consideran como suelos jóvenes que están fuertemente influenciados por el relieve del terreno, propiciando la formación de suelos **aluvio-coluviales** en las laderas de los cerros.

- En los suelos que muestran una secuencia de horizontes ABC, se considera que se originaron por la alteración de tobas de origen dacítico y andesítico que

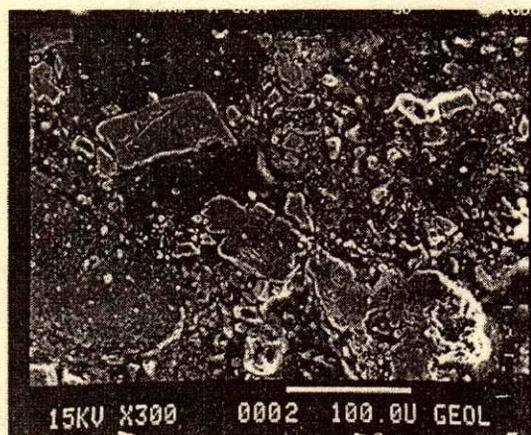
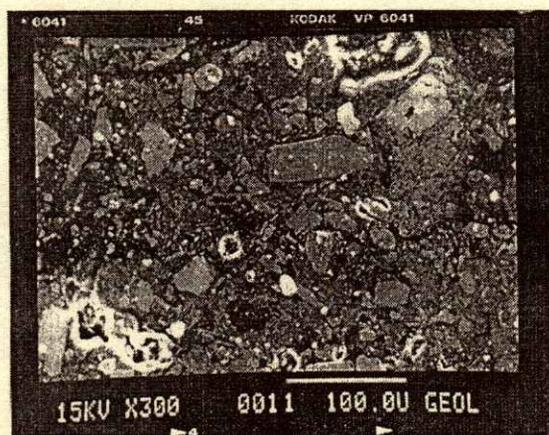


Figura 2. La fotomicrografía de la izquierda corresponde al horizonte 4Cqm del P-2 y la de la derecha al 2Cqm del P-3, ambas muestran fragmentos de cuarzo, plagioclasas y cenizas consolidadas, las cuales son propias de una toba.

CLAVE

PHlv = Phaeozem lúvico
 PHle = Phaeozem léptico

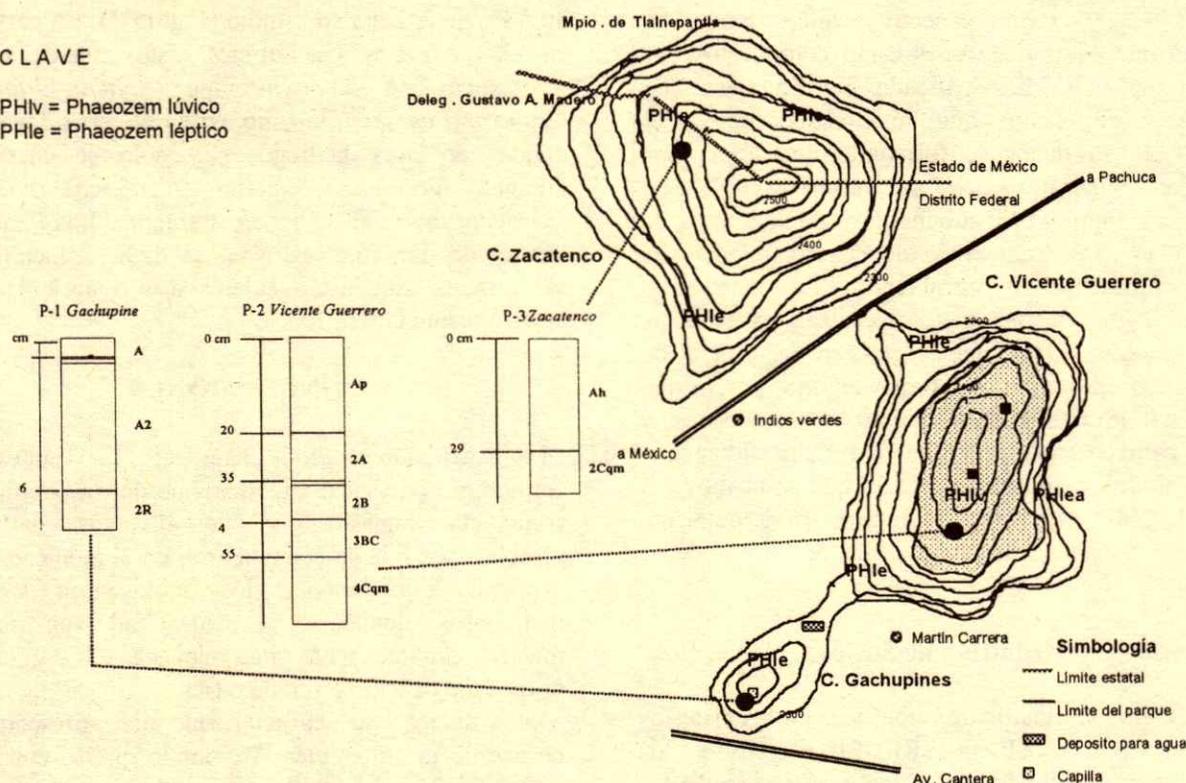


Figura 3. Distribución de unidades de suelos.

favoreció los procesos de formación *in-situ* en las partes planas, en particular en las parcelas agrícolas "apancles" que aún existen en el parque.

- Los horizontes 4Cqm y 2Cqm del P-2 y P-3, respectivamente, se caracterizaron como tobas poco alteradas, por el alto contenido de SiO₂ y a la carencia de rasgos pedológicos, por lo que se infiere que son materiales piroclásticos que se estratificaron y consolidaron en el momento de su depósito.

- La arcilla, presente en los tres perfiles, es la haloisita, que se considera como producto de la alteración de los feldespatos y ceniza volcánica. En el P-2 hay predominio de esmectitas de tipo montmorillonítico, atribuidas a la alteración de minerales primarios y que por las condiciones limitadas de drenaje se infiere, es de formación *in situ*.

- El suelo del P-1 se originó a partir del transporte de materiales provenientes de las partes altas y su posterior deposición en las partes medias y bajas de las laderas, reflejándose en una secuencia de horizontes A/2R, ya que no existen indicios de un

horizonte de acumulación y/o eluviación de materiales.

- Los suelos del P-2 y P-3 se formaron a partir de materiales piroclásticos de origen dacítico, donde los procesos diagenéticos provocaron que la sílice, la alteración de las plagioclasas y el vidrio volcánico se unieran, para propiciar el desarrollo de capas endurecidas.

- Los suelos estudiados en general se consideran propios para realizar prácticas forestales, ya que para fines agrícolas presentan limitaciones físicas como la pendiente, pedregocidad y profundidad.

- Los suelos se clasificaron como Phaeozem lúvicos y Phaeozem lépticos, dominando estos últimos que cubren 85.58% de la superficie total del parque.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue posible gracias al apoyo otorgado por la DGAPA de la Universidad Nacional Autónoma de México y por el Consejo Nacional de Ciencia y

Tecnología al Proyecto No. 26294-B. Igualmente, se reconoce la ayuda brindada por Patricia E. Altúzar-Coello, Margarita Reyes-Salas, María de Lourdes Rodríguez-Gamiño, Humberto Núñez-Cardona, Elisa Pimentel, Silvia Martha Herrera-Rodríguez y Alma Socorro Velázquez-Rodríguez. Por último a la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural, en especial al personal de Sierra de Guadalupe.

LITERATURA CITADA

- Acevedo-Sandoval, O.A. y D. Flores-Román. 2000. Genesis of white fragipans of volcanic origin. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 17: 152-162.
- Artieda-Cabello, O. 2004. Génesis y distribución de suelos en un medio semiárido. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Quinto (Zaragoza), España. <http://www.geocities.com/RainForest/Andes/4080/genesis.htm> (05 marzo 2004).
- Birkeland, P.W. 1990. Soil-geomorphic research: A selective overview. *Geomorphology* 3: 207-224.
- Brady, N.C. 1984. *The nature and properties of soils.* MacMillan. New York.
- Cuanalo-de la Cerda, H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 3a ed. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. pp. 545-566. *In:* Black, C.A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1.* American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Elsass, F., D. Dubroeuq y M. Thiry. 2000. Diagenesis of silica minerals from clay minerals in volcanic soils of Mexico. *Clay Minerals* 35: 477-489.
- FAO-ISRIC-SICS. 1999. Base referencial mundial del recurso suelo. Informes sobre recursos mundiales de suelos 84. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos-Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo. Roma, Italia.
- García, E. 1988. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlos a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- García-Calderón, N.E., A. Pinilla, T. Alexandre y N. Aguilera-Herrera. 1986. Relación entre la fertilidad natural y la mineralogía de algunos suelos sobre materiales volcánicos. pp. 567-578. *In:* *Anales de Edafología y Agrobiología.* Tomo XLV. Núm. 11-12. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España.
- Jackson, M.L. 1976. *Análisis químico de suelos.* Omega. Barcelona, España.
- JCPDS. Joint Committee on Powder Diffraction Standards. 1986a. Mineral powder diffraction search manual: Swarthmore, PA, International Centre for Diffraction Data. Newtown Square, PA.
- JCPDS. Joint Committee on Powder Diffraction Standards. 1986b. Mineral powder diffraction search manual: Swarthmore, PA, International Centre for Diffraction Data. Newtown Square, PA.
- Kendrick, J.K. y L.D. McFadden. 1996. Comparison and contrast of processes of soil formation in the San Timoteo badlands with chronosequences in California. *Quaternary Res.* 46: 149-160.
- Klute, A. 1986. *Methods of soil analysis. Part 1-Physical and mineralogical methods.* American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Krauskopf, K.B. 1979. *Introduction to geochemistry.* McGraw-Hill-Kogakusha. Tokyo, Japan.
- Mehra, O.P. y M.L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.* 7: 317-327.
- Mosser, F. 1977. Historia geológica de la Cuenca de México. En *Memorias de las Obras del Drenaje Profundo del Distrito Federal.* Ed. D.D.F. Tomo I México p:7-38.
- Mosser, F. 1990. Estratigrafía y estructuras del Valle de México. pp. 29-36. *In:* Ovando-Shelley, E. y F. González-Valencia (eds.). *El subsuelo de la Cuenca de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo.* Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México D.F.
- Munsell. 1994. *Soil color charts.* Ed. Munsell[®] Color Company Inc. New Winsor, NY.
- Rondón De Rodríguez, C. y G. Elizalde-Albes. 1994. Procesos pedogenéticos en un modelo de sistema suelo, formado por nueve subsistemas. *Venezuelas* 2(1): 32-36.
- SIGSA. Sistemas de Información Geográfica, S.A. 1986. *Cartas Urbanas (Politécnico, Azcapotzalco, Ticomán y Villa de las Flores).* Escala 1:20 000. México, D.F.
- Soil Survey Staff. 1984. *Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey.* Soil Survey Investigations Report 1. Natural Resources Conservation Service-US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey.* Agriculture handbook 436. 2nd ed. US Department of Agriculture and Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.
- Tavera-San Germán, G. 1985. Criterios para la interpretación y aprovechamiento de los reportes de laboratorio para las áreas de asistencia técnica. *Publicación Especial 3.* Delegación La Laguna de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Torreón, Coahuila, México.
- Vela-Correa, G. y D. Flores-Román. 2000. Caracterización física, química y mineralógica de algunos suelos de la Sierra de Guadalupe, México. pp. 102-107. *In:* Quintero-Lizaola, R., T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibañez-Huerta y N.E. García-Calderón (eds.). *La Edafología y sus perspectivas al Siglo XXI.* Tomo I. Universidad Nacional Autónoma de México-Colegio de Postgraduados-Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Verbeek, A.A., M.C. Mitchel y A.M. Ure. 1982. The analysis of small samples of rock and soil by atomic absorption and emission spectrometry after a lithium metaborate fusion/nitric acid dissolution procedure. *Analytica Chimica Acta* 135: 215-228.
- Walkley, A. e I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.

COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SILICIO EN TEJIDO FOLIAR DE PEPINO

Comparison of Three Methods of Silicon Analysis in Cucumber Leaf Tissue

S. Parra-Terraza^{1†}, G.A. Baca-Castillo², R. Carrillo-González², J. Kohashi-Shibata²,
A. Martínez-Garza³ y C. Trejo-López²

RESUMEN

El silicio es un elemento que puede ser benéfico para el desarrollo de plantas en condiciones de estrés biótico o abiótico, por lo que su cuantificación precisa en el tejido vegetal es de interés, desde el punto de vista de la nutrición de los cultivos. Para medir la concentración del silicio hay varios métodos, pero la mayoría de ellos tiene una o más desventajas. Aunado a lo anterior, es necesario considerar que no hay materiales de referencia o estándares para Si. En el presente estudio, se evaluaron tres métodos de extracción y cuantificación de Si: (1) fusión con NaOH y determinación colorimétrica de Si (método de referencia); (2) digestión con la mezcla HNO₃:H₂SO₄:HClO₄ y determinación gravimétrica de Si; y (3) digestión seca y disolución de la ceniza en HF para la determinación colorimétrica del Si. Se emplearon hojas de pepino cultivado en invernadero, donde se probaron nueve soluciones nutritivas, resultando de la combinación de dos factores: SiO₃²⁻ (0, 0.75 y 1.5 mol m⁻³) y potencial osmótico (-0.036, -0.072 y -0.108 MPa). El silicio cuantificado por los métodos de fusión y de digestión seca fue estadísticamente equivalente. El análisis de regresión entre las concentraciones de Si determinadas por los métodos de fusión y de digestión seca mostró una relación lineal significativa, con un coeficiente de determinación (R²) de 0.9488 y un coeficiente de variación (CV) de 15.59%. El método basado en la digestión con la mezcla tri-ácida sobreestimó en 256.8% el contenido de Si, con respecto al método de fusión. El valor de R² fue de 0.5599 y un CV de 45.71%.

¹ Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México.

[†] Autor responsable (psaul@uasnet.mx)

² Instituto de Recursos Naturales, ³ Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, estado de México.

Recibido: Julio de 2003. Aceptado: Junio de 2004.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 22: 401-407.

Palabras clave: Cucumis sativus L., digestión húmeda, análisis de plantas.

SUMMARY

Silicon may be beneficial for plants growing under biotic or abiotic stress conditions. For this reason, its chemical analysis in plant tissue is important, from the perspective of crop nutrition. There are several analytical methods for the quantification of silicon; nevertheless, these methods have one or more disadvantages. In addition, plant standard reference material is not available, so there are some uncertainties about analytical procedures to be used for accurate silicon estimation. In this study three methods of silicon extraction and quantification were compared: (1) high-temperature fusion with NaOH (reference method); (2) wet ashing with acid solution of HNO₃:H₂SO₄:HClO₄; and (3) dry ashing with dissolution of the ash in HF. Cucumber leaves from plants grown in a greenhouse were utilized. Nine treatments of nutrient solutions resulted from the combination of two factors: SiO₃²⁻ concentrations (0, 0.75, and 1.5 mol m⁻³) and osmotic potential (-0.036, -0.072 and -0.108 MPa). The silicon quantified by the dry ashing and fusion methods were statistically equivalent. The regression analysis between silicon values quantified with the two methods indicated a significant linear relationship with a determination coefficient (R²) of 0.9488 and the variation coefficient (CV) of 15.59%. The method based on wet digestion overestimated the silicon content by 256.8% with respect to the fusion method. Its R² value was 0.5599 and the CV was 45.71%.

Index words: Cucumis sativus L., wet digestion, plant analysis.

INTRODUCCIÓN

En el área de nutrición de los cultivos, el contenido de silicio en el tejido vegetal ha generado interés debido a reportes científicos que indican un

efecto benéfico de ese elemento en el crecimiento y desarrollo de plantas, en condiciones de estrés abiótico o biótico (Epstein, 1999). Con base en estos contenidos, Jones y Handreck (1967) clasificaron a las plantas en tres grupos: gramíneas con alta acumulación de silicio en hojas (5 a 15%), gramíneas de acumulación intermedia (1 a 3%), y la mayoría de las dicotiledóneas de acumulación baja (< 1.0%). Por su parte, Takahashi y Miyake (1977), citados por Epstein (1994), determinaron el contenido de silicio en hojas de 175 especies y las clasificaron en dos grupos: plantas acumuladoras (> 1.0% Si) y no acumuladoras (< 1.0% Si). Aunque el pepino (*Cucumis sativus* L.) es una dicotiledónea, éste puede acumular altas cantidades de silicio en las hojas, cuando la solución nutritiva tiene una alta concentración de este elemento (Miyake y Takahashi, 1983). Esta acumulación de silicio puede aumentar la resistencia de las plantas de pepino al ataque de cenicilla polvorienta (*Sphaerotheca fuliginea* (Schlechtend: Fr. Pollacci) (Samuels *et al.*, 1991). Adatia y Besford (1986) reportaron que el aumento en el contenido de silicio en hojas de pepino incrementó su rigidez, lo cual favoreció la mayor intercepción de luz solar y aumentó el contenido total de clorofila en hojas.

Para cuantificar el silicio en la materia vegetal, se han propuesto varios métodos: (a) digestión seca de la muestra, purificación de la ceniza y determinación gravimétrica del silicio, antes y después de tratar el residuo con HF (Vogel, 1955); (b) digestión del material vegetal con una mezcla alcalina y determinación colorimétrica del silicio en una solución diluida (Kilmer, 1965); y (c) extracción del silicio del material vegetal con una solución 1 M HCl-2.3 M HF y determinación en un espectrofotómetro de absorción atómica, con flama generada por una mezcla gaseosa de acetileno-óxido nitroso o con el uso de un espectrofotómetro de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) (Novozamsky *et al.*, 1984); (d) digestión del material vegetal con HNO₃ y disolución de los silicatos con Na₂CO₃. El silicio se determina por colorimetría (Nayar *et al.*, 1974); (e) digestión inducida en autoclave (Elliott y Snyder, 1991); (f) digestión del material vegetal con una mezcla tri-ácida (HNO₃:H₂SO₄:HClO₄) y determinación gravimétrica del silicio (Yoshida *et al.*, 1976); y (g) digestión seca y disolución de la ceniza en HF para la determinación colorimétrica del silicio (Van der Vorm, 1987). Los métodos difieren en el

tipo de digestión utilizado para mineralizar y solubilizar el silicio, y las técnicas usadas para cuantificarlo. De estos métodos, no existe uno aceptado universalmente, debido a que todos presentan una o más desventajas como: la oxidación de la materia orgánica requiere de mucho tiempo, se usan ácidos potencialmente peligrosos, requieren de calibración, hay pérdidas por salpicado y se necesitan equipos especiales (Van der Vorm, 1987; Taber *et al.*, 2002). El silicio puede cuantificarse por gravimetría, colorimetría, espectrofotometría de absorción atómica y espectroscopía de emisión con plasma acoplado inductivamente (Novozamsky *et al.*, 1984; Van der Vorm, 1987; Jones y Dreher, 1996; Taber *et al.*, 2002). De estas técnicas analíticas, la más accesible, pero a la vez la más laboriosa, de amplio uso en el pasado, es la determinación por gravimetría (Kilmer, 1965). La técnica colorimétrica puede detectar concentraciones mínimas cercanas a 0.01 mg L⁻¹ de Si (APHA, 1995), aunque la sensibilidad de este procedimiento puede verse afectada por cualquier error analítico, debido a los altos factores de dilución utilizados (Taber *et al.*, 2002). El análisis por absorción atómica tiene un límite mínimo de detección de 0.3 mg L⁻¹ de Si y una concentración óptima de 5 a 150 mg L⁻¹ de Si a una longitud de onda de 251.6 nm (APHA, 1995). Por espectroscopía de emisión con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) el intervalo de análisis es de 5 a 120 mg L⁻¹ de Si en la longitud de onda de 251.6 nm, pero tiene interferencias importantes con Fe, Mn, Cr y V (HMSO, 1996). Los dos primeros elementos, por lo general presentes en los tejidos vegetales, pueden causar una sobreestimación de la concentración del Si. Debido a la facilidad del método y al uso de equipo no sofisticado y fácilmente accesible, usualmente el silicio solubilizado se analiza por colorimetría, después de neutralizar el NaOH con ácido acético o de eliminar el HF con una solución diluida de ácido bórico (Elliott y Snyder, 1991; Van der Vorm, 1987, respectivamente). El principio de la determinación colorimétrica involucra la reacción del ácido silícico con el ácido molibdico, formándose ácido silicomolibdico con la forma oxidada de coloración amarilla y la forma reducida de color azul. La forma reducida se obtiene al tratar la muestra con ácido sulfónico-naphtol-amino. El color azul es más intenso que el color amarillo, lo cual incrementa la sensibilidad para su análisis químico (Jones y Dreher, 1996). Un aspecto muy importante a ser considerado cuando se analiza silicio en el tejido vegetal es la

inexistencia de materiales de referencia o estándares (Taber *et al.*, 2002), lo que deja la incertidumbre sobre la precisión de los datos obtenidos. Con base en lo anterior, esta investigación se realizó con el objetivo de comparar los métodos de Yoshida *et al.* (1976); Kilmer (1965), modificado por Elliott y Snyder (1991); y Van der Vorm (1987), modificado por Rafi *et al.* (1997) para extraer y cuantificar el silicio en hojas de pepino.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron hojas con pecíolos provenientes de plantas de pepino del tipo europeo, cultivar Kalunga, las cuales se cultivaron en invernadero, empleando como medio la solución nutritiva. El material vegetal contenía concentraciones variables de silicio, ya que para su obtención se emplearon nueve soluciones nutritivas resultantes de la combinación de dos factores: SiO_3^{2-} (0, 0.75 y 1.50 mol m^{-3}) y Ψ_s (-0.036, -0.072 y -0.108 MPa), los aportes de silicio se realizaron con $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Las hojas de pepino con pecíolos se secaron a 70 °C durante 36 h en una estufa con circulación forzada de aire. Posteriormente, el material vegetal seco se molió y se tamizó a través de una malla 40. La extracción y cuantificación de silicio se realizó por tres procedimientos: 1) oxidación de la materia orgánica y disolución ácida de los componentes con estimación gravimétrica del silicio (Yoshida *et al.*, 1976); 2) fusión con NaOH y estimación colorimétrica de silicio (Kilmer, 1965), modificado por Elliott y Snyder (1991); y 3) digestión seca y disolución de la ceniza en HF, con estimación colorimétrica de silicio (Van der Vorm, 1987), modificado por Rafi *et al.* (1997). Las pruebas estadísticas realizadas a los datos obtenidos incluyeron regresión lineal simple y, para la comparación de medias, se utilizó la prueba 't' de Student. Estas pruebas se realizaron con el programa de cómputo Versión 8 (SAS Institute, 1999).

Descripción de los Métodos

Método gravimétrico. Se pesó 1 g de materia vegetal y se colocó en matraces microkjeldahl de 30 mL. Se dejó en predigestión durante la noche con 10 mL de una mezcla de ácidos, preparada con 750 mL de HNO_3 65%, 150 mL de H_2SO_4 98.5% y 300 mL de HClO_4 61%. La digestión se realizó en una plancha con campana de extracción, incrementando lentamente la temperatura hasta 100 °C en 2 h.

Después, se elevó a 150 °C y se mantuvo así durante 1 h. Se continuó incrementando rápidamente la temperatura hasta 320 °C. Cuando las muestras dejaron de hervir hasta obtener un color claro, se retiraron de la plancha, se enfriaron a temperatura ambiente y se aforaron a 50 mL con agua destilada. Se filtraron en papel Whatman 42 sin cenizas. Los filtros se colocaron en crisoles de níquel, previamente pesados, se secaron en la estufa a 80 °C durante 2 h y se llevaron a la plancha a 350 °C para su combustión. Se colocaron en la mufla a 550 °C por 2 h, se pusieron en un desecador durante 12 h y se pesaron en balanza analítica para obtener el SiO_2 . Este valor se multiplicó por 46.7, el cual proviene de la división de los pesos moleculares de Si/SiO_2 y su multiplicación por 100, para obtener el porcentaje de Si.

Fusión con NaOH. Se pesó 0.1 g de materia vegetal y se colocó en crisoles de níquel. Estos se transfirieron a la mufla y se incrementó la temperatura a 300 °C, manteniéndose durante 30 min. Posteriormente, se incrementó a 550 °C y se mantuvo así por 30 min. Después de enfriarse, se añadió a los crisoles 4.5 g de una solución de NaOH a 50%. Los crisoles se cubrieron parcialmente y se colocaron en una plancha caliente hasta evaporar la solución. Posteriormente, los crisoles y su contenido se calentaron lentamente en un mechero durante 10 min. Después de que los crisoles se enfriaron a temperatura ambiente, se añadieron 25 mL de agua destilada y se dejaron en reposo por una noche. Finalmente, el contenido de los crisoles se aforó a 50 mL y se transfirió a botellas de polietileno, previamente lavadas con NaOH 0.1 M.

El análisis colorimétrico fue una modificación del procedimiento descrito por Elliott y Snyder (1991). A 5 mL de alícuota se les añadieron los reactivos siguientes: 29 mL de ácido acético a 20%; 10 mL de solución de molibdato de amonio (54 g L^{-1} , pH 7.0); 5 mL de ácido tartárico a 20%; 1 mL de solución reductora formada por A (2 g de Na_2SO_3 y 0.4 g de 1-amino-2-naphthol-4-ácido sulfónico aforados a 25 mL con agua destilada) y B (25 g de NaHSO_3 disueltos en 200 mL de agua destilada). Las soluciones A y B se mezclaron y se aforaron a 250 mL. Después de añadir la solución reductora, se aforó a 50 mL con ácido acético a 20%. Transcurrieron cinco minutos entre la adición del molibdato de amonio y el ácido tartárico. Las muestras se mezclaron y se dejaron en reposo por 30 min. Se determinó la absorbancia en un espectrofotómetro a 650 nm de longitud de onda. Se preparó una solución patrón de 50 mg L^{-1} de Si y un

patrón secundario de 10 mg L^{-1} de Si, a partir de SiO_2 grado reactivo, de acuerdo con el procedimiento ya mencionado. La curva de calibración se preparó tomando alícuotas de 0, 3, 6 y 9 mL del estándar secundario. Las concentraciones finales fueron 0, 0.6, 1.2 y 1.8 mg L^{-1} de Si y los valores de absorbancia obtenidos estuvieron entre 0 y 0.27, estableciéndose una relación lineal ($Y = 0.1483X + 0.009$) y un coeficiente de correlación (r) de 0.9966.

Digestión seca y disolución de la ceniza en HF. Se pesaron 0.3 g de material vegetal en crisoles de porcelana. Los crisoles se transfirieron a la mufla y la digestión se realizó a $550 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 3 h. Se añadieron 48 mL de una solución de H_2SO_4 0.08 M y las muestras se colocaron en frascos de polietileno de 150 mL. Se agregaron 2 mL de una solución de HF de 48 a 51%. Se agitaron durante 1 h en un agitador mecánico oscilatorio. Se dejaron en reposo una noche y se les agregó 50 mL de H_2SO_4 0.08 M a cada muestra. Se tomó una alícuota de 1 mL y se mezcló con 24 mL de una solución de H_3BO_3 a 0.32%. Todo el material que se utilizó se lavó con una solución diluida de HF 0.1%.

Análisis colorimétrico. A una alícuota de 1.5 mL se le añadió 1.5 mL de una mezcla 1:1 de H_2SO_4 0.08 M:heptamolibdato de amonio [$20 \text{ g (NH}_4)_6 \text{ Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O L}^{-1}$]. Se agitó manualmente y se dejó reposar durante 5 min. Se agregaron 1.5 mL de una solución de ácido tartárico (33 g L^{-1}), se añadieron

1.5 mL de una solución de ácido ascórbico (4 g L^{-1}), se agitó y se dejó en reposo por 10 min. Se leyó la absorbancia en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 811 nm. La curva de calibración se preparó tomando alícuotas de 0, 3, 6 y 9 mL de una solución de 1000 mg L^{-1} de Si preparada a partir de $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, las cuales se aforaron a 50 mL y se agitaron 1 h en el agitador mecánico. Considerando las alícuotas, se añadieron 48, 45, 42 y 39 mL de H_2SO_4 0.08 M más 2 mL de HF 48 a 51%. Las concentraciones finales de silicio en la curva fueron de 0, 0.3, 0.6 y 0.9 mg L^{-1} , con absorbancia de 0 a 0.630, con una relación lineal ($Y = 0.69X + 0.012$) y un coeficiente de correlación (r) de 0.9985.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método de fusión con NaOH se seleccionó como el método de referencia para evaluar los dos métodos restantes, debido a su alta exactitud y precisión (Kilmer, 1965; Van der Vorm, 1987). Considerando lo anterior, las concentraciones de silicio en las hojas cuantificadas por los tres métodos se compararon mediante análisis de regresión. Este análisis mostró que las concentraciones de silicio determinadas por el método de Van der Vorm presentaron una relación lineal con el silicio cuantificado con el método de fusión (Figura 1). La ecuación de regresión que describe la relación entre

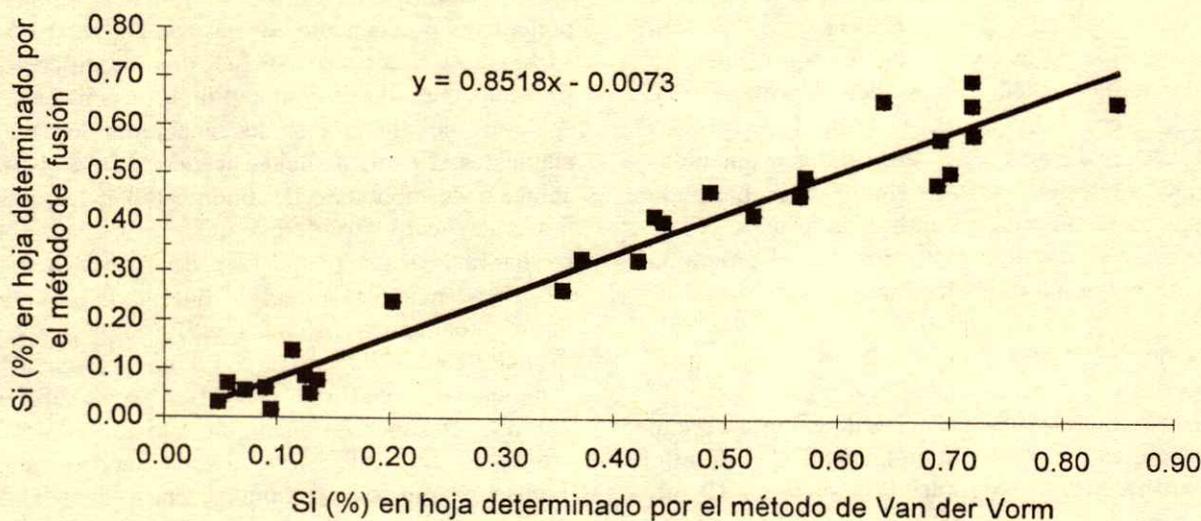


Figura 1. Correlación entre las determinaciones de silicio en hojas de pepino obtenidas por los métodos fusión con NaOH y el método de Van der Vorm en la etapa fenológica de inicio de la fructificación.

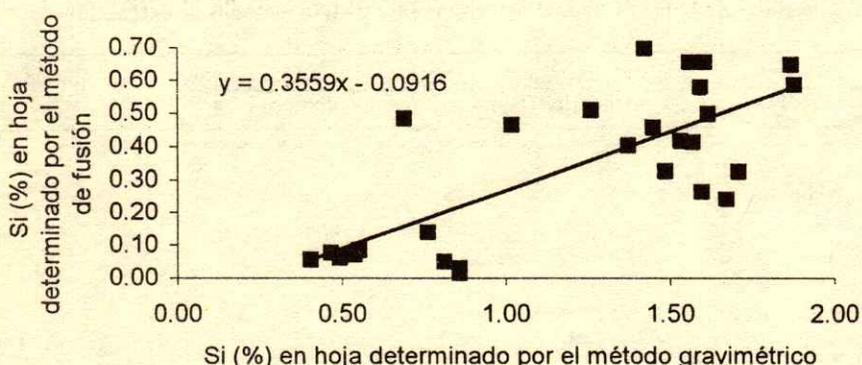


Figura 2. Correlación entre las determinaciones de silicio en hojas de pepino obtenidas por los métodos fusión con NaOH y el método gravimétrico en la etapa fenológica de inicio de la fructificación.

los dos métodos es $Y = -0.0073 + 0.8518X$. Esta ecuación o modelo de regresión lineal simple, es adecuado para describir el comportamiento de los datos ($P < 0.0001$). El coeficiente de determinación (R^2) del modelo fue 0.9488. Este valor indica una fuerte relación positiva entre las determinaciones de silicio en la hoja obtenidas por los métodos de Van der Vorm y de fusión. El coeficiente de variación (CV) entre estos dos métodos fue de 15.59%.

Con respecto a las concentraciones de silicio determinadas por el método gravimétrico, se encontró una tendencia lineal entre estos valores y las concentraciones de silicio cuantificadas por el método de fusión (Figura 2). Esta tendencia también puede describirse mediante el modelo lineal, cuya ecuación es $Y = -0.0916 + 0.3559X$. Este modelo de regresión es adecuado para describir el comportamiento de los datos ($P < 0.0001$). El valor de los coeficientes de determinación y de correlación fueron, respectivamente, 0.5599 y 0.7482, mientras que el coeficiente de variación fue de 45.71%.

Con base en los valores de R^2 y CV obtenidos en el análisis de regresión (Cuadro 1), entre los métodos Van der Vorm y el gravimétrico, y considerando al

método de fusión como el método de referencia, es posible seleccionar al método de Van der Vorm como el más adecuado para cuantificar silicio en hojas de pepino. Las concentraciones de silicio en las hojas de pepino determinadas por los tres métodos de análisis se presentan en el Cuadro 2. Las medias de las concentraciones fueron, respectivamente, 0.3393%, 1.2107% y 0.4069% Si para los métodos de fusión, gravimétrico y de Van der Vorm. Estos dos últimos presentaron concentraciones de silicio mayores que 256.8% y 19.92%, en relación con el de fusión. La sobreestimación del silicio cuantificado por el método gravimétrico probablemente se explique por la formación de un residuo insoluble de sílice que retiene otros elementos (Na, Fe, K y Ca), debido a procesos de oclusión o adsorción, lo cual incrementa los valores de silicio (Ihnat, 1982). Por esta razón, se recomienda la disolución del residuo con HF para volatilizar el silicio en forma de tetrafluoruro de silicio, estimando por diferencia la concentración de silicio en la muestra (APHA, 1995). Los coeficientes de variación de los métodos gravimétrico, de fusión con NaOH y de Van der Vorm fueron de 39.81%, 67.56% y 64.42%, respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 1. Coeficientes de determinación (R^2), correlación (r), variación (CV) y modelos lineales ajustados de los valores de silicio extraídos por dos métodos de análisis en hojas de pepino.

Método [†]	R^2	r	CV %	Modelos lineales ajustados [‡]	Pr > F
Van der Vorm	0.9488	0.9740	15.59	$Y = 0.8518X - 0.0073$	0.0001
Yoshida <i>et al.</i>	0.5599	0.7482	45.71	$Y = 0.3559X - 0.0916$	0.0001

[†] Van der Vorm (1987), modificado por Rafi *et al.* (1997); Yoshida *et al.*, (1976).

[‡] Ecuación matemática del tipo $Y = \beta_0 + \beta_1X$. Donde: Y = concentración de silicio determinada por el método de fusión; β_0 = ordenada en el origen; β_1 = pendiente debida al factor X; y X = concentración de silicio determinada por el método correspondiente.

Cuadro 2. Concentraciones de silicio en hojas de pepino determinadas por tres métodos de extracción.

Tratamiento	Métodos de extracción			Valor de 't' observado
	Fusión con NaOH (A)	Gravimétrico (B)	Van der Vorm (C)	
	----- % -----			
1	0.0589 [‡]	0.4955	0.0905	
	0.0545	0.4060	0.0727	
	0.0748	0.4675	0.1363	
2	0.2625	1.5988	0.3547	
	0.2380	1.6736	0.2032	A x B = 8.48**
	0.3224	1.7110	0.4227	A x C = 1.01ns
3	0.4644	1.0191	0.4803	B x C = 7.01**
	0.6530	1.6082	0.8487	
	0.3243	1.4866	0.3721	
4	0.0482	0.8134	0.1300	
	0.0137	0.8602	0.0954	
	0.0294	0.8607	0.0487	
5	0.4123	1.5708	0.4371	
	0.6965	1.4258	0.7200	
	0.5763	1.5946	0.6918	
6	0.4562	1.4500	0.5671	
	0.4159	1.5334	0.5254	
	0.4961	1.6180	0.5716	
7	0.0835	0.5530	0.1257	
	0.1357	0.7630	0.1140	
	0.0689	0.5390	0.0571	
8	0.4822	0.6919	0.6891	
	0.4011	1.3745	0.4451	
	0.5070	1.2623	0.7003	
9	0.6461	1.8700	0.7197	
	0.5851	1.8794	0.7210	
	0.6540	1.5619	0.6410	
Promedio	0.3393%	1.2107%	0.4069%	
CV [‡]	67.56%	39.81%	64.42%	

** Altamente significativo y ns = no significativo, según 't' de Student ($P \leq 0.05$). † Tres repeticiones por tratamiento; ‡ Coeficiente de variación.

El método gravimétrico presentó el menor CV de los tres métodos, debido a que sobreestimó el contenido de silicio de las muestras en forma uniforme, por lo que la desviación estándar de estos valores fue menor, por consiguiente, fue el método más preciso. Sin embargo, esto no significa que este método sea el más exacto. Para complementar la información proporcionada por el análisis de regresión, se realizó la prueba 't' de Student al contenido de silicio, cuantificado por los tres métodos. Dicha prueba no mostró diferencia significativa entre los métodos de Van der Vorm y de fusión. Esto indica que los dos métodos determinaron contenidos de silicio estadísticamente similares. Para el método gravimétrico, el valor observado de 't' fue altamente significativo, lo que sugiere que el contenido de silicio estimado por este método es mayor y no comparable estadísticamente con el obtenido por fusión. Aunado a

lo anterior, el método gravimétrico requiere de bastante tiempo para oxidar la materia orgánica y el uso de ácidos potencialmente peligrosos, por lo que se le considera lento y laborioso (Van der Vorm, 1987; Elliott y Snyder, 1991). En este estudio, las muestras analizadas requirieron de 48 h, incluyendo 15 h de digestión a 320 °C. Por lo que respecta a los métodos de fusión con NaOH y Van der Vorm, ambos se basan en la destrucción de la materia orgánica mediante combustión con altas temperaturas y requieren de 24 h entre el pesado de la muestra y la determinación de silicio en forma colorimétrica.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo sugieren que el contenido de silicio en hojas de pepino determinado por los métodos de fusión con NaOH y de

Van der Vorm fue estadísticamente equivalente. El método de Van der Vorm estimó un contenido de silicio mayor (19.92%), en relación con el de fusión. El coeficiente de correlación (r) entre ambos métodos fue de 0.9740, con un coeficiente de variación de 15.59%. Los dos procedimientos involucran una digestión seca que requiere de 24 h entre el pesado de la muestra y la determinación de silicio por colorimetría. Sin embargo, es necesario considerar que el método de Van der Vorm utiliza HF, el cual es un ácido peligroso, por lo que debe manejarse en una campana con extracción de gases, utilizando gafas protectoras y guantes. El método gravimétrico, además de ser considerado como un método lento por requerir de 48 h entre el pesado de la muestra y la cuantificación de silicio, sobreestimó en 256.8% el contenido de este elemento, con respecto al método de fusión. El coeficiente de correlación (r) entre los dos métodos fue de 0.7482 con un CV de 45.71%.

LITERATURA CITADA

- Adatia, M.H. y R.T. Besford. 1986. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. *Ann. Bot. (London)* 58: 343-351.
- APHA. American Public Health Association. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. pp. 4-115, 4-121. APHA, AWWA and WEF. Washington, DC.
- Elliott, C.L. y G.H. Snyder. 1991. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *J. Agric. Food Chem.* 39: 118-119.
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)* 91: 11-17.
- Epstein, E. 1999. Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50: 641-664.
- HMSO. Her Majesty's Stationary Office. 1996. Inductively coupled plasma spectrometry. Methods for the examination of waters and associated materials. London, UK.
- Ihnat, M. 1982. Importance of acid-insoluble residue in plant analysis for total macro and micro elements. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 13: 969-979.
- Jones, L.H. y K.A. Handreck. 1967. Silica in soils, plant and animals. *Adv. Agron.* 19: 107-149.
- Jones, R.L. y G.B. Dreher. 1996. Silicon. pp. 627-637. *In: Sparks, D.L. (ed.). Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. SSSA Book Series 5. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Madison, WI.*
- Kilmer, V.J. 1965. Silicon. pp. 959-962. *In: Black, C.A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy. Madison, WI.*
- Miyake, Y. y E. Takahashi. 1983. Effect of silicon on the growth of solution-cultured cucumber plant. *Soil Sci. Plant Nutr.* 29: 71-83.
- Nayar, P.K., A.K. Misra y S. Patnaik. 1974. Rapid microdetermination of silicon in rice plant. *Plant Soil* 42: 491-494.
- Novozamsky, I., R. van Eck y V.J.G. Houba. 1984. A rapid determination of silicon in plant material. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15: 205-211.
- Rafi, M.M., E. Epstein y R.H. Falk. 1997. Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Plant Physiol.* 151: 497-501.
- Samuels, A.L., A.D.M. Glass, D.L. Ehret y J.G. Menzies. 1991. Mobility and deposition of silicon in cucumber plants. *Plant Cell Environ.* 14: 485-492.
- SAS Institute Inc. 1999. User's guide. Versión 8. Cary, NC.
- Taber, H.G., D. Shogren y Lu Gang. 2002. Extraction of silicon from plant tissue with dilute HCl and HF and measurement by modified inductive coupled argon plasma procedures. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 1661-1670.
- Van der Vorm, P.D.J. 1987. Dry ashing of plant material and dissolution of the ash in HF for the colorimetric determination of silicon. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 18: 1181-1189.
- Vogel, A.I. 1955. A textbook of quantitative inorganic analysis. Longmans. London, England.
- Yoshida, S., D.A. Forno, J.H. Cock y K.A. Gómez. 1976. Laboratory Manual for Physiological Studies of Rice. 3rd ed. International Rice Research Institute. Los Banos, Laguna. The Philippines.

ÍNDICES DE REFLECTANCIA Y RENDIMIENTO DEL FRIJOL CON APLICACIONES DE NITRÓGENO

Spectral Reflectance Indices and Yield in Bean with Nitrogen Applications

M. Gutiérrez-Rodríguez¹, J. Alberto Escalante-Estrada^{1†}, M. Teresa Rodríguez-González¹
y Matthew P. Reynolds²

RESUMEN

Se realizaron aplicaciones de nitrógeno (0, 100 y 200 kg ha⁻¹) en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno para buscar incrementos en la biomasa, en el rendimiento y su relación con el índice de reflectancia del dosel (NDVI). El estudio se llevó a cabo en Montecillo, estado de México durante el ciclo de lluvias (junio-septiembre, 2001) con una densidad de 25 plantas m⁻² y un diseño de bloques completos al azar. La reflectancia del dosel se midió con un radiómetro portátil (FieldSpec, USA) a 14, 25, 32, 39, 50, 84 y 88 días después de la siembra (dds). Los resultados señalan que el rendimiento agronómico más alto (549 g m⁻²) se logró con la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N, mientras que el más bajo (323 g m⁻²) correspondió a N0. El número de racimos, número de vainas y semillas m⁻² fueron los componentes relacionados con estos cambios en el rendimiento. La biomasa y el índice de cosecha también fueron significativamente más altos en N200 (1003 g m⁻² y 46%, respectivamente), que con N0 (932 g m⁻² para biomasa y 35% para el índice de cosecha). El valor más alto de NDVI se presentó en la etapa de floración-llenado de vaina (50 a 84 dds) y, posteriormente, conforme el cultivo llegó a la madurez fisiológica, disminuyó. El NDVI mostró una correlación alta con la radiación interceptada ($r^2 = 0.62$ a 0.80), biomasa ($r^2 = 0.73$ a 0.98), índice de área foliar ($r^2 = 0.89$ a 0.91) y con el rendimiento final ($r^2 = 0.99$). El rendimiento y la biomasa del frijol incrementaron con la aplicación de N (200 kg ha⁻¹). Se observó que el NDVI puede ser un estimador del rendimiento biológico y agronómico en frijol.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris* L., radiometría, biomasa, leguminosas.

SUMMARY

Different nitrogen (N) rates (0, 100, and 200 kg ha⁻¹) were applied in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants cv. Flor de Durazno to determine whether the biomass and yield were related to the normalized difference vegetation index (NDVI). The study was carried out in Montecillo, Mexico under rainfed conditions (June-September, 2001) with a density of 25 plants m⁻² using a randomized complete block design. Canopy reflectance was measured with a portable radiometer (FieldSpec, USA) at 14, 25, 32, 39, 50, 84, and 88 days after sowing (das). The results showed that the high seed yield was increased with 200 kg ha⁻¹ N (549 g m⁻²), while N0 treatment had low seed yield (323 g m⁻²). Raceme number, pod number and seeds m⁻² were related to high yield. Biomass and harvest index were also higher in N200, 1003 g m⁻² and 46%, respectively, compared with 932 g m⁻² and 35% for the N0 treatment. The maximum NDVI values occurred during the flowering-pod filling stage (50 to 84 das); when the plants began senescence, the NDVI values decreased. NDVI showed a strong relationship with absorbed radiation ($r^2 = 0.62$ to 0.80), biomass ($r^2 = 0.73$ to 0.98), leaf area index ($r^2 = 0.89$ to 0.91), and seed yield ($r^2 = 0.99$). Seed yield and biomass production were increased with N fertilization rates. It was observed that NDVI estimated seed yield and biomass in bean plants.

Index words: *Phaseolus vulgaris* L., radiometry, biomass, legume.

INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es la principal especie de las leguminosas que se utiliza como fuente de proteínas para la mayoría de la población en México y América Latina, aunque también se cultiva extensamente en otros países del

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

[†] Autor responsable (jasse@colpos.mx)

² International Maize and Wheat Improvement Centre (CIMMYT), Houston, TX 77205, USA.

tercer mundo (Huerta-Díaz *et al.*, 1997; Escalante-Estrada *et al.*, 1999).

El nitrógeno (N) es el principal elemento que limita el rendimiento de los cultivos (Liebman *et al.*, 1995). La aplicación de N en frijol incrementa su rendimiento (semilla) y la biomasa, debido a que estimula el crecimiento del dosel vegetal y del número de flores (Liebman *et al.*, 1995; Huerta-Díaz *et al.*, 1997; Escalante-Estrada *et al.*, 1999).

Por otra parte, la búsqueda de estimadores físicos del rendimiento de los cultivos ha sido objeto de diversas investigaciones, dentro de éstas, las técnicas de percepción remota, que se basan en la radiometría (en particular la reflectancia) pueden proveer valiosa información con medidas instantáneas sobre el estado fisiológico de un cultivo (Araus, 1996; Peñuelas, 1998; Araus *et al.*, 2001). Los índices de reflectancia se basan en ecuaciones con operaciones simples y longitudes de onda específicas, que resumen gran cantidad de información, contenida en un espectro de reflectancia. El índice de reflectancia del dosel conocido como NDVI (normalized difference vegetation index) mide el contraste de reflectancia en el espectro rojo (680 nm) e infrarrojo (900 nm) y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}}}{R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}}}$$

Donde: R_{NIR} y R_{RED} es la reflectancia en el espectro infrarrojo cercano y rojo, respectivamente (Araus, 1996; Peñuelas, 1998; Araus *et al.*, 2001).

El NDVI puede utilizarse como un indicador de la biomasa del dosel, índice de área foliar (IAF), radiación interceptada y capacidad fotosintética de un cultivo. Probablemente, es el índice más usado para analizar la vegetación a nivel continental y global (Gamon *et al.*, 1997).

Durante el ciclo de crecimiento de un cultivo, el índice NDVI puede evaluar la absorción de radiación, uno de los parámetros que determina biomasa y rendimiento final (Gamon *et al.*, 1997). Carlson y Ripley (1997) encontraron, en trigo, que la radiación interceptada y el IAF mostraron una correlación alta con el NDVI.

El rendimiento de grano también puede predecirse con medidas sucesivas de NDVI durante la estación de crecimiento (Wiegand *et al.*, 1991). En trigo, NDVI se asocia con el rendimiento de grano ($r^2 = 0.55$ a 0.66), desde la etapa de espigamiento, hasta la senescencia (Rudorff y Batista, 1990; Wiegand y Richardson, 1990).

También, es posible estimar el contenido de clorofila (el cual se relaciona con la actividad fotosintética) con los métodos de reflectancia a una longitud de 680 nm. Chappelle *et al.* (1992) desarrollaron los índices RARS (ratio analysis of reflectance spectra) para la determinación de clorofila a y b (RARSa y RARSb, respectivamente). Estos índices estimaron el contenido de clorofila a ($r = 0.93$) y clorofila b ($r = 0.82$) en hojas de soya.

En frijol, los estudios empleando radiometría son limitados, algunos de ellos miden el contenido de proteína total, área foliar y posición angular de las hojas (Wu *et al.*, 1993; Canteri *et al.*, 1998). Pero no existen estudios que se relacionen con la producción de biomasa y rendimiento de semilla.

Debido a que el crecimiento de un cultivo está determinado, en parte, por la disponibilidad de N, el cual influye en el tamaño del dosel (área foliar, biomasa, absorción de radiación y capacidad fotosintética), los índices de reflectancia pueden indicar diferencias en el crecimiento de frijol por aplicaciones de N y predecir el rendimiento final; por ello, los objetivos del presente trabajo fueron: (i) conocer el efecto de la aplicación de N (0, 100 y 200 kg ha⁻¹) sobre la producción de biomasa, rendimiento y sus componentes; (ii) determinar la relación entre NDVI con la radiación interceptada, IAF y biomasa a través del desarrollo del cultivo; (iii) determinar el índice RARSa como estimador del contenido de clorofila; y (iv) determinar la relación de los índices de reflectancia con el rendimiento de frijol.

MATERIAL Y MÉTODOS

Semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno de crecimiento determinado (Tipo I), proporcionadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Campos-Escudero *et al.*, 1998), se sembraron el 28 de mayo de 2001 en condiciones de temporal en Montecillo, estado de México (19°19' N, 98°54' O y 2250 m de altitud) con clima semiárido (BS1) y un Fluvisol (FAO, 1974; Escalante-Estrada *et al.*, 1999). Se aplicaron riegos de auxilio para germinación de semillas y establecimiento de plántulas. Las parcelas consistieron en tres surcos de 2 m de longitud con una separación de 0.6 m con una densidad de población de 25 plantas m⁻². Los tratamientos consistieron en la aplicación de 0 (N0), 100 (N100) y 200 (N200) kg ha⁻¹ de N. Del N, 50% se aplicó antes de la siembra y el resto al inicio de la

floración (37 dds). Además, todo el experimento se fertilizó con 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Durante el desarrollo del cultivo, se registró la temperatura máxima, mínima y media (media de cada 10 días) y la suma decenal de la precipitación (mm).

Las medidas de reflectancia del dosel se realizaron en día soleado en todas las parcelas, con base en el diseño experimental. Se tomó la lectura al azar dentro de cada unidad experimental a 14 (V1), 25 (V4), 32 (aparición de racimos), 39 (aparición de botones florales), 50 (floración), 84 y 88 días después de la siembra (dds) (llenado de vaina). Para ello, se utilizó un radiómetro portátil FieldSpec (Analytical Spectral Devices, Boulder, CO) en el intervalo de 350 a 1100 nm. El equipo se calibró previamente con un panel blanco de referencia de sulfato de bario (Labsphere Inc., North Sutton, NH). Esto se midió a una altura de 0.5 m arriba del dosel del frijol, utilizando un lente de 10° de apertura.

Los índices de reflectancia que se calcularon fueron: índice de reflectancia del dosel (NDVI) y el índice del contenido de clorofila (RARSa), como a continuación se indica:

$$\text{NDVI} = (R_{900} - R_{680}) / (R_{900} + R_{680}) \text{ y } \text{RARSa} = R_{680} / R_{800}$$

Donde: R es la reflectancia a 680, 800 y 900 nm. Araus (1996), Peñuelas (1998), Chappelle *et al.* (1992) y Araus *et al.* (2001) describieron ambas ecuaciones.

Se determinó el área foliar en un integrador de área Hayashi (Denko, Japón). El índice de área foliar (IAF) se estimó mediante la ecuación:

$$\text{IAF} = \text{AF} * \text{DP} / \text{S}$$

Donde: AF es el área foliar por planta (en dm²), DP la densidad de población (plantas m⁻²) y S el área que ocupó el cultivo (m²).

Las determinaciones de radiación interceptada se hicieron con un sensor lineal de quantum (Lycor, USA), el cual se colocó de manera perpendicular a los surcos del cultivo arriba (AD) y debajo del dosel (BD). Primero, se calculó la luz transmitida (T) por el dosel:

$$T = \text{BD} * 100 / \text{AD}$$

A partir de T, se procedió a calcular GC mediante la ecuación:

$$\text{GC} = 100 - T(\%)$$

Donde: GC (ground cover) representa la radiación interceptada por el cultivo, en porcentaje (Adams y Arkin, 1977).

En la cosecha final, se determinó el rendimiento en semilla (peso seco del grano con 10% de humedad) y sus componentes como número de semillas m⁻², tamaño de semilla (peso de 100 semillas), número de vainas con semilla m⁻², número de semillas vaina⁻¹ y el número de semillas m⁻². La biomasa total (g m⁻²) se determinó sumando el peso seco de hojas caídas, tallo y estructuras reproductivas (secadas a 75 °C por 48 h) y el índice de cosecha (IC) (materia seca de la semilla/materia seca total de la parte aérea del cultivo), se calculó siguiendo el criterio de Escalante-Estrada *et al.* (1995, 1999).

A las variables de estudio se les aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y un análisis de regresión mediante el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1990).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el desarrollo del frijol, la temperatura máxima osciló entre 23 y 27 °C, la temperatura mínima entre 11 y 14 °C y la temperatura promedio entre 17 y 19 °C. La precipitación que se acumuló durante toda la estación de crecimiento fue de 445 mm.

Rendimiento y sus Componentes

El rendimiento en semilla, los racimos m⁻², número de semillas m⁻² y vainas m⁻² incrementaron con la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N (N200), mientras que los tratamientos N0 y N100 no presentaron diferencias significativas (P ≤ 0.05) (Cuadro 1). No se observaron diferencias significativas en semillas vaina⁻¹ y peso de 100 semillas por efecto del N. El tamaño de semilla y el número de semillas por vaina son los componentes del rendimiento más estables y están más relacionados con las características propias del cultivar (Escalante-Estrada *et al.*, 1995).

En las parcelas donde se aplicó N200, se presentó el rendimiento más alto; éste se relacionó con mayor

Cuadro 1. Rendimiento y sus componentes en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno en función de la aplicación de nitrógeno a la cosecha final (98 dds).

Tratamiento	Racimos ----- m ⁻² -----	Vainas ----- vaina ⁻¹	Semillas ----- m ⁻²	Semillas ----- 100 semillas g	Rendimiento ----- g m ⁻² -----	Biomasa	IC	
N100	508.3 b [†]	410.0 b	3.9 a	835.0 b	39.8 a	332.3 b	897.9 b	0.37 b
N200	558.3 a	454.2 a	4.0 a	1042.9 a	44.0 a	459.1 a	1002.9 a	0.46 a
DMS	46.93	37.56	0.23	36.72	1.07	15.84	26.85	0.02

[†] Medias con la misma letra no son significativamente diferentes en una misma columna literal (Tukey P ≤ 0.05).

número de vainas y semillas m⁻² (Huerta-Díaz *et al.*, 1997; Escalante-Estrada *et al.*, 1999). Una tendencia similar se observó en la producción de biomasa y en el IC, que también se incrementó con la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N (Cuadro 1). El N tiene un efecto estimulante en el desarrollo vegetativo de la planta, ya que incrementa el desarrollo del tallo, área foliar, número de hojas y ramas (Huerta-Díaz *et al.*, 1997; Escalante-Estrada *et al.*, 1999).

La aplicación de 100 kg ha⁻¹ de N no ocasionó incremento significativo en el rendimiento de semilla del frijol. Probablemente, el alto contenido inicial de N en el suelo (durante la siembra) pudo ser determinante en la falta de respuesta de las plantas de frijol a esta dosis de N. Sin embargo, este nivel no se determinó en el presente estudio.

Radiación Interceptada, Índice de Área Foliar (IAF) y Biomasa

Debido a que el Tratamiento N100 no presentó diferencias significativas con Tratamiento N0 en biomasa, rendimiento de semillas, radiación interceptada, IAF y tampoco en los índices de reflectancia, sólo se discuten los Tratamientos N0 y N200 que fueron los más contrastantes.

La radiación interceptada fue superior en N200 desde 50 dds (66.2%) en relación con el Tratamiento N0 (61.2%) como se muestra en la Figura 1a. La máxima radiación interceptada (83.6%) se registró en N200 durante la etapa de llenado de vaina (84 dds) y fue significativamente superior (P ≤ 0.05) a N0 (71.1%). Al inicio de la madurez fisiológica (88 dds), la abscisión de hojas provocó que la radiación interceptada disminuyera, pero N200 mantuvo un valor significativamente más alto (52.6%) que N0 (40.5%). Una tendencia similar se observó en el IAF, que se evaluó hasta 84 dds. En esta fecha,

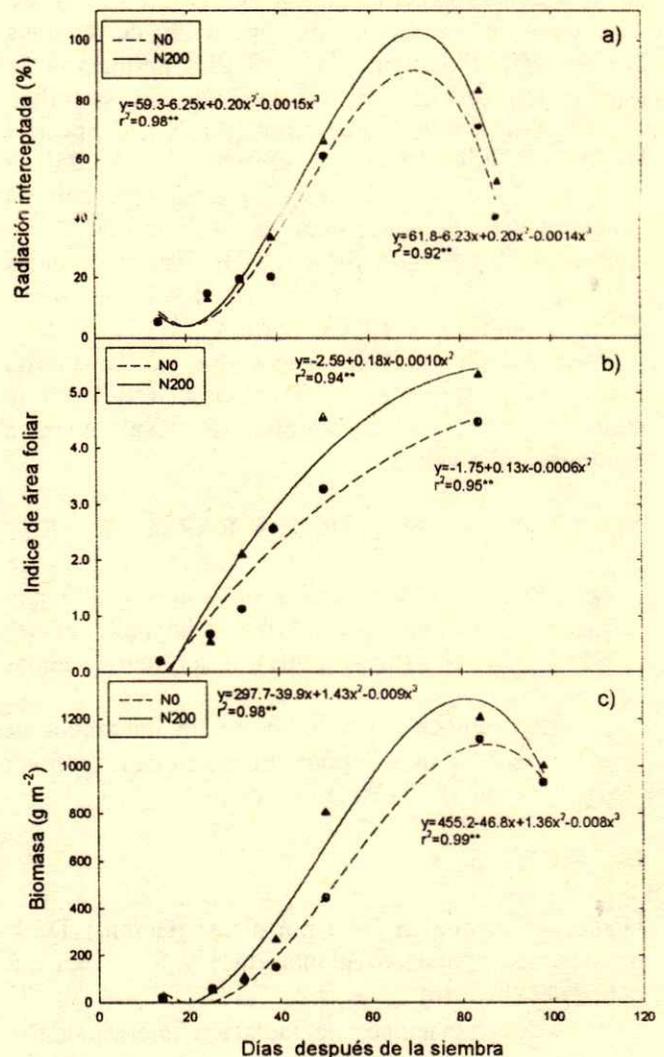


Figura 1. Dinámica de la radiación interceptada, índice del área foliar (IAF) y biomasa producida en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno en función de la aplicación de nitrógeno. () significativo a P ≤ 0.01. Montecillo, México. Verano, 2001. (●, ▲ corresponden a 0 y 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente).**

N200 fue significativamente superior (5.3) a N0 (4.5) (Figura 1b). La estimación de la eficiencia de la radiación interceptada y el IAF son componentes importantes para estimar el potencial de rendimiento de un cultivo (Carlson y Ripley, 1997; Gamon *et al.*, 1997).

La aplicación de N a un cultivo acelera la cobertura de la superficie del suelo y aumenta la interceptación de radiación (Serrano *et al.*, 2000). Una mayor cobertura del suelo por el cultivo significa un incremento del área foliar y esto fue lo que ocurrió en N200, donde la radiación interceptada se incrementó, debido a un mayor IAF provocando, a su vez, mayor acumulación de biomasa (superior a N0) (Figura 1b).

En cuanto a la biomasa producida, el frijol con 200 kg ha⁻¹ de N mostró mayor acumulación de biomasa hasta la madurez fisiológica (1003 g m⁻²) en comparación con N0 (932 g m⁻²) (Cuadro 1; Figura 1c). Los valores más altos de biomasa ocurrieron en la etapa de llenado de vaina (84 dds) para los dos tratamientos de N, pero N200 mostró el valor más alto (significativo a $P \leq 0.05$) con 1206 g m⁻², mientras que el testigo (N0) produjo 1051 g m⁻². Las diferencias en producción de materia seca entre cultivares puede atribuirse a la absorción de radiación incidente y a su conversión a materia seca (Tollenaar, 1992). La biomasa y el IAF se acumularon más rápidamente con 200 kg ha⁻¹ de N.

Dinámica del Índice de Reflectancia del Dosel (NDVI) durante el Desarrollo de Frijol

La Figura 2 muestra la dinámica del índice de reflectancia del dosel (NDVI) durante el desarrollo del frijol en función de la aplicación de N. Antes de 50 dds, el NDVI fue similar entre los tratamientos. A partir de 50 dds y hasta la madurez fisiológica, el NDVI de N200 fue superior a N0. En trigo, los valores de NDVI se incrementan en las primeras etapas de crecimiento, alcanzando un máximo en antesis y después disminuyen cerca de la madurez fisiológica (Shanahana *et al.*, 2001).

Relación del Índice de Reflectancia del Dosel (NDVI) con Radiación Interceptada, Índice de Área Foliar (IAF), Biomasa y Rendimiento de Semilla

El comportamiento de la relación entre NDVI-radiación interceptada y de NDVI-biomasa se

muestra en las Figuras 3a y 3c. En ambos casos, los valores aumentan en las primeras etapas de crecimiento hasta alcanzar su máximo en floración y llenado de vaina, posteriormente disminuyen conforme se avanza a la madurez del frijol (abscisión de hojas) (Figuras 2 y 3). La relación de NDVI con radiación interceptada y biomasa se describió con el modelo $y = ax/b+x$ hasta la etapa de llenado de grano (84 dds) (Figuras 3a y 3c). El frijol con N200 fue el que mostró mayores valores en ambas relaciones en comparación con el Tratamiento N0. La relación entre NDVI y radiación interceptada mostró una $r^2 = 0.62$ para N0 y $r^2 = 0.81$ para N200 (significativa a $P \leq 0.05$). La relación entre NDVI y biomasa mostró una $r^2 = 0.73$ para N0 y una $r^2 = 0.98$ para N200 (significativa a $P \leq 0.01$).

En el caso de la relación entre NDVI y el IAF, también, los valores incrementaron al inicio del desarrollo del cultivo y después alcanzaron un máximo en la etapa de floración-llenado de vaina (50 y 84 dds), y la relación entre ambas variables mostró una $r^2 = 0.89$ para N0 y $r^2 = 0.91$ para N200 (ambos significativos a $P \leq 0.05$ y 0.01, respectivamente) (Figura 3b).

En cuanto a la relación entre el índice NDVI (valores de la etapa de llenado de vaina, 84 dds) y el rendimiento de semilla, se observó que fue lineal, lo cual demuestra que el índice NDVI está estrechamente relacionado con el rendimiento del frijol, debido a la aplicación de N ($r^2 = 0.99$), pues un valor alto de NDVI significa un alto rendimiento

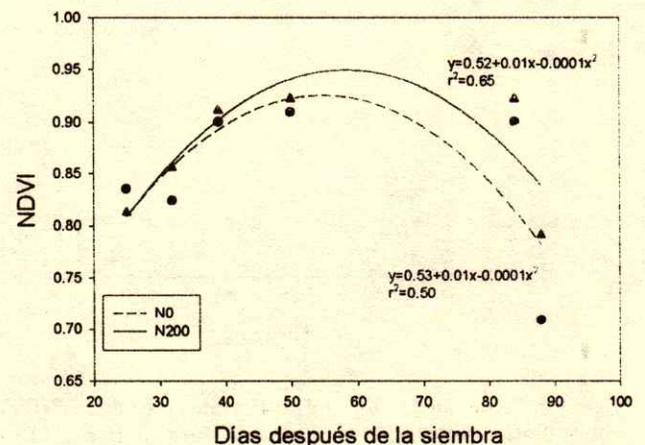


Figura 2. Dinámica del índice de reflectancia del dosel (NDVI) en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno en función de la aplicación de nitrógeno. Montecillo, México. Verano, 2001. (●, ▲ corresponden a 0 y 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente).

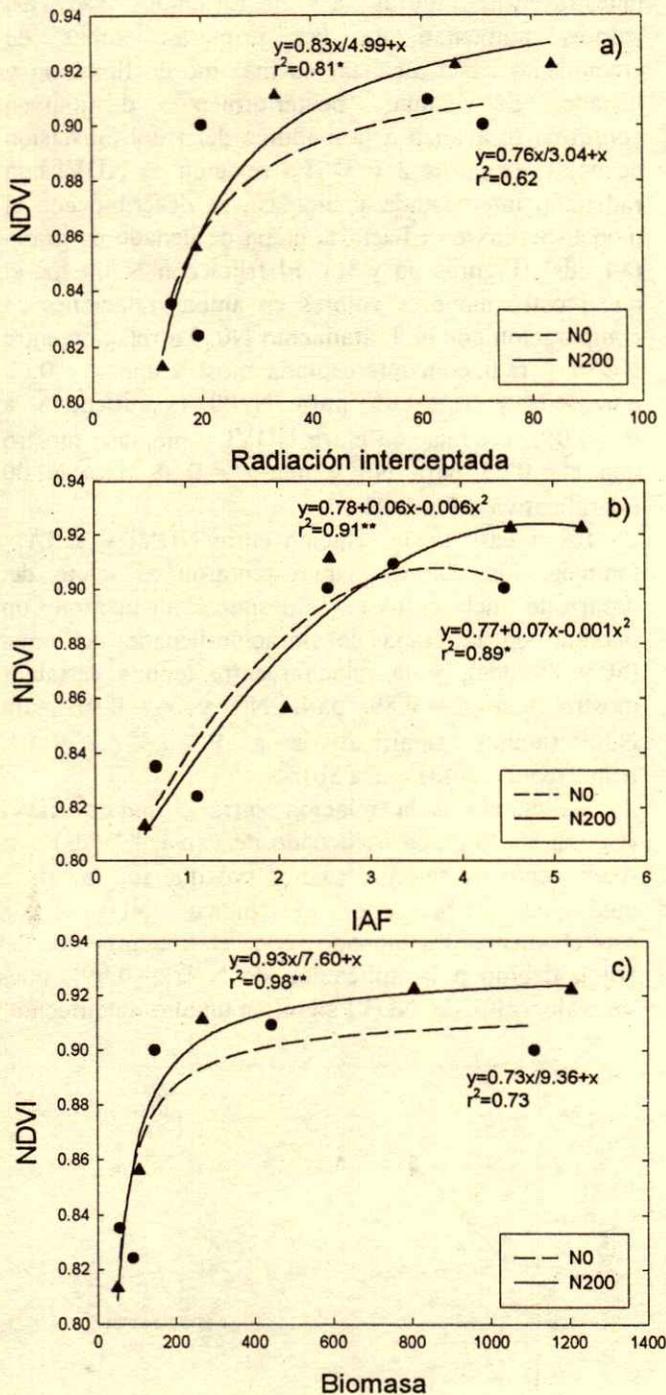


Figura 3. Relación del índice de reflectancia del dosel (NDVI) con radiación interceptada, índice de área foliar (IAF) y biomasa hasta la etapa de llenado de vaina (84 dds) en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno en función de la aplicación de nitrógeno (*,**) significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01 respectivamente. Montecillo, México. Verano, 2001. (●, ▲ corresponden a 0 y 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente).

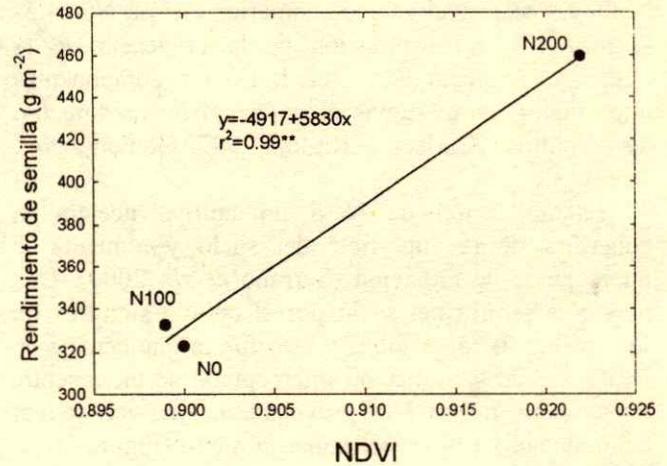


Figura 4. Relación entre el índice de reflectancia del dosel (NDVI) con el rendimiento de semilla en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno con aplicaciones de nitrógeno. (**) significativo a $P \leq 0.001$ Montecillo, México. Verano, 2001.

(Figura 4). Con medidas periódicas de NDVI durante el ciclo de crecimiento de un cultivo, puede evaluarse la absorción de radiación, pues determina biomasa total y el rendimiento final (Gamon *et al.*, 1997). La fertilización nitrogenada promueve una disminución en la reflectancia del rojo y un incremento en el infrarrojo; lo contrario sucede cuando no se aplica N. Esto ocurre por que la radiación es interceptada por un dosel más grande (mayor área foliar) y, por ello, la reflectancia en el infrarrojo aumenta (Serrano *et al.*, 2000). NDVI puede ser utilizado para predecir el rendimiento del cultivo con el empleo de ecuaciones empíricas de regresión (Wiegand *et al.* 1991; Serrano *et al.*, 2000). Wiegand y Richardson (1990) reportaron una $r^2 = 0.55$ para predecir rendimiento de grano en trigo, cuando se midió este índice en cuatro etapas de crecimiento. De manera similar, Rudorff y Batista (1990) reportaron una $r^2 = 0.66$ entre el rendimiento de trigo y una integración del índice de reflectancia del dosel, desde el embuche, hasta que las plantas estuvieron completamente senescentes. En el presente estudio, la aplicación de N al cultivo de frijol incrementó la producción de biomasa y el rendimiento de semilla, y el NDVI.

Estimación del Contenido de Clorofila a (RARSa)

El índice que estima el contenido de clorofila (RARSa) muestra una relación inversa a través del desarrollo de las plantas de frijol (Figura 5). Los

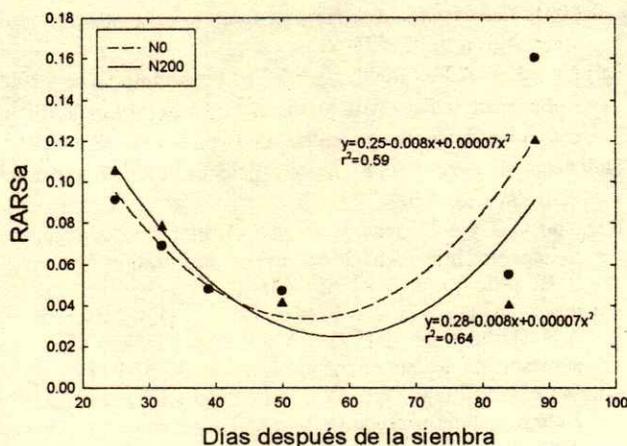


Figura 5. Dinámica del índice que estima el contenido de clorofila (RARSa) en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Flor de Durazno en función de la aplicación de nitrógeno. Montecillo, México. Verano, 2001.

(●, ▲ corresponden a 0 y 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente).

valores más altos se presentan en la etapa vegetativa y cerca de la madurez fisiológica, mientras que los valores más bajos corresponden a la etapa de floración y llenado de vaina. Esto se debe a que la molécula de clorofila absorbe radiación a 680 nm y, en una etapa joven o de senescencia, hay menor contenido de clorofila y, en consecuencia, la radiación a esta longitud de onda se refleja. Durante la etapa de floración y de llenado de vaina, cuando se tiene la máxima área foliar, hay mayor contenido de clorofila en el dosel del frijol y se absorbe más radiación a 680 nm.

El frijol con N200 presentó mayor contenido de clorofila a 84 y 88 dds (0.041 y 0.120, respectivamente), mientras que N0 mostró el contenido de clorofila más bajo (0.055 a 84 dds y 0.160 a 88 dds). El N está estrechamente asociado con la cantidad de clorofila en las hojas. Esta última puede ser un indicador del contenido de N en cultivos como maíz y la reflectancia del dosel puede ayudar a determinar este contenido de N en hojas de algodón, soya y trigo (Tarpley *et al.*, 2000).

CONCLUSIONES

El rendimiento de semilla, la biomasa y el índice de cosecha incrementaron con la aplicación de 200 kg ha⁻¹ de N. El frijol con ese tratamiento mostró mayor número de racimos m⁻², vainas m⁻² y número de semillas m⁻². Asimismo, estimuló el crecimiento de las hojas (mayor índice de área foliar) con una mayor

intercepción de radiación y producción de biomasa. El índice de reflectancia del dosel (NDVI) puede ser un estimador de la radiación interceptada del crecimiento foliar (índice del área foliar), de la producción de biomasa y del rendimiento de semilla del frijol cv. Flor de Durazno.

LITERATURA CITADA

- Adams, J.E. y G.E. Arkin. 1977. A Light interception method for measuring row crop ground cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 789-792.
- Araus, J.L. 1996. Integrative physiological criteria associated with yield potential. pp. 150-167. *In: Reynolds, M.P., S. Rajaram y A. McNab (eds.). Increasing yield potential in wheat: Breaking the barriers.* Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México, D.F.
- Araus, J.L., J. Casadesus y J. Bort. 2001. Recent tools for the screening of physiological traits determining yield. pp. 59-77. *In: Reynolds, M.P., J.I. Ortiz-Monasterio y A. McNab (eds.). Application of physiology in wheat breeding.* Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México, D.F.
- Campos-Escudero, A., L. Osoria-Rodríguez, A. Espinosa-Calderón. 1998. Flor de Durazno-90, variedad de frijol de temporal para valles altos de la mesa central. *Folleto Técnico* 13. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, México.
- Canteri, M.G., M.D. Pria, L.M. Schiebelbein, O.C. Silva, L. Amorim y F.A. Bergamin. 1998. Relationships among healthy leaf area, yield, reflectance and severity of angular leaf spot in bean plants. *Fitopatología Brasileira* 23: 498-501.
- Carlson, N.T. y D.A. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing Environ.* 62: 241-252.
- Chappelle, E.W., M.S. Kim e I.E. McMurtrey. 1992. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of Chl a, b and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sensing Environ.* 39: 239-247.
- Escalante-Estrada, J.A., E. Martínez-Villegas, L.E. Escalante-Estrada y J. Kohashi-Shibata. 1995. Relación fuente-demanda en frijol. I. Efecto de la remoción foliar sobre los componentes del rendimiento. *Rev. Fitot. Mexicana* 18: 54-60.
- Escalante-Estrada, J.A., M.T. Rodríguez-González y L.E. Escalante-Estrada. 1999. Efecto del nitrógeno en la producción y abscisión de órganos reproductivos en frijol. *Agronomía Mesoamericana* 10: 47-53.
- FAO. Food and Agricultural Organization. 1974. Approaches to land classification. *Soils Bulletin* 22. Rome, Italy.
- Gamon, I.A., L. Serrano y J. Sorsfuf. 1997. The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation-use efficiency across species, functional types and nutrient levels. *Oecologia* 112: 492-511.
- Huerta-Díaz, J., J.A. Escalante-Estrada, J.Z. Castellanos-Ramos, R. Robles-Sánchez y J.A. Flores-Reyes. 1997. Producción de biomasa y grano en frijol *Phaseolus vulgaris* L. En función de la fertilización nitrogenada y la inoculación con *Rhizobium*

- leguminosarum* Biovar *phaseoli*. Rev. Fitot. Mexicana 20: 45-56.
- Liebman, M., S. Corson, R.J. Rowe y W.A. Halteman. 1995. Dry bean responses to nitrogen fertilizer in two tillage and residue management systems. Agron. J. 87: 538-546.
- Peñuelas, J. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. Trends in Plant Sci. 3: 151-156.
- Rudorff, B.F.T. y G.T. Batista. 1990. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. Remote Sensing Environ. 31: 53-63.
- SAS Institute. 1990. SAS/STAT user's guide. Version 6. Cary, NC.
- Serrano, L., I. Filella y J. Peñuelas. 2000. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. Crop Sci. 40: 723-731.
- Shanahan, J.F., J.S. Schepers, D.D. Francis, G.E. Varvel, W.W. Wilhelm, J.M. Tringe, M.R. Schlemmer y D.J. Major. 2001. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. Agron. J. 93: 583-589.
- Tarpley, L., K.R. Reddy y G.F. Sassenrath-Cole. 2000. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. Crop Sci. 40: 1814-1819.
- Tollenaar, M. 1992. Radiation use efficiency of an old and a new maize hybrid. Agron. J. 84: 536-541.
- Wiegand, C.L. y A.J. Richardson. 1990. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield. II. Results. Agron. J. 82: 630-636.
- Wiegand, C.L., A.J. Richardson, D.E. Escobar y A.H. Gerbermann. 1991. Vegetation indices in crop assessments. Remote Sensing Environ. 35: 105-119.
- Wu, X.Q., D.S. Liang, Y.F. Wu, H.F. Yang y X.Q. Wang. 1993. Determination of crude protein and fibre contents in French bean by means of near infrared reflectance spectroscopy. Crop Genet. Resour. 1: 28-29.

RESPUESTA DEL BALANCE HÍDRICO AL RALEO DE UNA PLANTACIÓN JOVEN DE *Pinus radiata* (D. Don) EN EL SECANO INTERIOR DE CHILE

Responses of Water Balance to Thinning of Young *Pinus radiata* (D. Don) Stands in Dry Land of Chile

Anton Huber^{1†} y Ramiro Trecaman¹

RESUMEN

Se determinó el efecto que tiene el raleo de una plantación de *Pinus radiata* (D. Don) sobre el recurso agua en la zona del secano interior de Chile Central. Para ello, se cuantificó la precipitación, su redistribución, la evapotranspiración, la percolación y la variación temporal del contenido de agua del suelo durante 12 meses en una plantación de cinco años de edad, con dos densidades (1250 y 750 árboles ha⁻¹). De la precipitación anual (965 mm), que superó en 43% al promedio de la zona, 42 y 36% fue interceptada por el dosel de los árboles en la plantación de mayor y menor densidad, respectivamente. La cantidad de agua, involucrada en la evapotranspiración neta en cada plantación, fue equivalente a 59 y 48%, mientras que la precolación fue de 6 y 17%. Si se adicionan a la evapotranspiración neta las pérdidas de agua por interceptación, puede concluirse que el equivalente a 101 y 84% de la precipitación anual fue utilizado en la evapotranspiración, a pesar que el estudio se realizó en un año excepcionalmente lluvioso. Plantaciones de *Pinus radiata* de alta densidad en la zona del secano interior, cuando están ubicadas en terrenos planos donde no se produce escorrentía superficial, prácticamente no generan precolación, porque casi la totalidad de la precipitación se utiliza en la interceptación y la evapotranspiración neta. El raleo tuvo un efecto positivo sobre la percolación, en especial porque redujo las pérdidas de agua por interceptación de dosel.

Palabras clave: Evapotranspiración, percolación, plantaciones forestales.

¹ Instituto de Geociencias, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile. Casilla 567, Valdivia, Chile.

[†] Autor responsable (ahuber@uach.cl)

Recibido: Diciembre de 2002. Aceptado: Mayo de 2004.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 22: 417-424.

SUMMARY

The effects of thinning a *Pinus radiata* (D. Don) stand on the water resource in the dry zone of Central Chile were determined. Precipitation, rainfall partitioning, interception losses, soil water content, net evapotranspiration and percolation were calculated during 12 months in a five year-old stand, with two densities: 1250 and 750 tree ha⁻¹. Of the annual precipitation (965 mm), which surpassed the average of the zone by 43%, 42 and 36% were intercepted by the tree canopy in the plantation of greater and lesser density, respectively. The amount of water involved in net evapotranspiration was equivalent to 59 and 48%, and in percolation to 6 and 17%, respectively. If interception losses are added to the net evapotranspiration, it is concluded that the equivalent of 101 and 84% of the annual precipitation was lost in the total evapotranspiration, even though the study was done in a rainy year. High-density stands in the dry land zone, when they are located in flat lands, do not generate percolation because practically all is lost in interception and net evapotranspiration. Forest thinning had a positive effect on percolation, especially because it reduced the losses of rain by canopy interception.

Index word: Evapotranspiration, percolation, forest plantation.

INTRODUCCIÓN

La forestación modifica el balance hídrico de un lugar debido a la cantidad de precipitación que es retenida por el dosel de los árboles (Calder, 1998; Xiao *et al.*, 2000; Huber y Iroumé, 2001; Huber y Trecaman, 2002; Iroumé y Huber, 2002; Zarnoch *et al.*, 2002) y al importante monto de agua involucrado en la evapotranspiración (Oyarzún y Huber, 1999; Huber y Trecaman, 2002). La evapotranspiración de los bosques está regulada principalmente por las

características de la cubierta vegetal, las condiciones climáticas y la capacidad de retención de agua útil de los suelos. Esta última propiedad tiene especial importancia en zonas que poseen un clima mediterráneo y donde el déficit de precipitación es una situación estacional o habitual (Peña *et al.*, 1993). La cantidad de precipitación que llega al suelo de un bosque y el agua involucrada en la evapotranspiración y percolación pueden ser modificadas con el manejo forestal (Stoneman, 1993; Álvarez y Giglio, 1997; Huber y Trecaman, 2000; Van Dijk y Bruijnzeel, 2001). El raleo de los bosques es una práctica silvícola habitual para lograr estos objetivos (Bosch y Hewlett, 1982; Dye, 1993; López *et al.*, 1998; Huber y Trecaman, 2002).

En Chile, durante las últimas cuatro décadas, se ha ejecutado una política forestal que ha incentivado la forestación. En la actualidad, en Chile hay más de 2 millones de hectáreas forestadas con especies exóticas, donde *Pinus radiata* es la más importante, con una participación que supera 77% (INFOR, 2001). Las plantaciones forestales se encuentran preferentemente en ambas vertientes de la Cordillera de la Costa y en la Depresión Intermedia del país, entre 30 y 41° latitud sur. En la porción más meridional de esta extensa franja de territorio, se ubica el secano interior del centro de Chile, el cual posee una extensión aproximada de 1,6 millones de hectáreas y ocupa la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa (sotavento). Esta zona se caracteriza por presentar un período de escasa precipitación de alrededor de ocho meses, el que coincide con la época más cálida del año (Romero, 1985).

A pesar de las extensas superficies forestadas en el secano interior, no hay estudios que analicen el impacto de los cambios de cubierta o de los manejos silvícolas sobre el recurso hídrico. En Chile, la mayoría de estos trabajos se han realizado en localidades ubicadas más hacia el sur del país, en una zona más lluviosa (Caldentey y Fuentes, 1995; Oyarzún y Huber, 1999; Huber y Trecaman, 2000, 2002; Huber y Iroumé, 2001).

El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto que tiene el raleo de una plantación joven de *Pinus radiata* sobre el recurso hídrico en la zona del secano interior de Chile Central. Para ello, se determinó los aportes de agua por precipitación, la variación temporal y espacial del contenido de agua del suelo y la cantidad de agua involucrada en evapotranspiración y percolación en

dos plantaciones coetáneas con distinta densidad de árboles.

MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en la Provincia de Linares, VII Región, al suroeste de la ciudad de San Javier en el predio "El Carmen" (71°49' O, 35° 40' S), perteneciente a la empresa Forestal Celco S.A.

La zona posee un clima templado cálido con lluvias invernales y una estación seca de ocho meses, característica de un clima mediterráneo típico (Csb1) (Fuenzalida, 1976).

La precipitación promedio anual es de 670 mm [mapa de isoyetas "Concepción" 1:500 000 (MOP, 1987)]; 80% de ella se registra entre los meses de marzo y agosto. El resto del año es deficitario en lluvias debido a la presencia del anticiclón semipermanente del Pacífico que no permite el paso de los frentes de lluvia (Romero, 1985). La temperatura media anual es de 14.7 °C con una amplitud térmica que supera 13 °C. Julio es el mes más frío con 8.2 °C y enero el más cálido con 22.0 °C (MOP, 1987). La evaporación potencial anual es de 1244 mm y tiene un curso estacional bien pronunciado con una máxima cercana a 250 mm en los meses de verano y una mínima de 40 mm en julio (MOP, 1987).

Para el estudio se seleccionó una plantación de *Pinus radiata* (D. Don) de cinco años con una densidad de 1250 árboles ha⁻¹, altura media de 5.1 m y un diámetro a la altura de pecho (DAP) de 9.5 cm. En ella se delimitaron dos parcelas de 100 x 100 m; la primera quedó con la densidad original y la segunda se raleó en septiembre de 2001, para dejarla con 750 árboles ha⁻¹. La cobertura del dosel fue de 68 y 34%, respectivamente.

El suelo de la zona corresponde a la serie Pocilla (Alfisols; PO 524/Er) (IREN, 1964) (Cuadro 1). Su material de origen es un complejo metamórfico, desarrollado a partir de material sedimentario y volcánico. Presenta un drenaje externo muy rápido e interior moderado, posee una alta velocidad de infiltración y la cantidad de agua aprovechable depende de su espesor que fluctúa entre 0.5 y 2 m (Carrasco *et al.*, 1993).

La evapotranspiración neta, que corresponde sólo al agua extraída del suelo, se determinó con la fórmula del balance hídrico, basada en la ecuación de continuidad de Feller (1981).

$$Evtrn = Pp - (Ic + \Delta W + A + Per)$$

Donde: Evtrn = evapotranspiración neta (mm); Pp = precipitación incidente (mm); Ic = pérdidas de agua por intercepción del dosel (mm); ΔW = variación del contenido de agua del suelo (mm); A = escorrentía superficial (mm); Per = percolación (mm).

La precipitación incidente (Pp) se registró con dos pluviógrafos ubicados a campo abierto, en terrenos aledaños a las parcelas. La cantidad de agua retenida por el dosel de las plantaciones forestales (Ic) se calculó con la ecuación:

$$Ic = Pp - (Pd + Pf)$$

Donde: Ic = pérdidas de agua por intercepción (mm); Pp = precipitación incidente (mm); Pd = precipitación directa (mm); Pf = escurrimiento fustal (mm).

La precipitación que atravesó el dosel de las plantaciones para llegar al suelo (precipitación directa) se recolectó con una canaleta metálica en forma de V, de 15 cm de ancho y 25 m de largo, ubicada a 30 cm sobre el suelo y enviada a un tambor con un registrador electrónico de nivel de agua. Para expresar la precipitación directa en milímetros de altura, se dividió los litros de agua recolectados en cada evento de lluvia por la superficie de la canaleta en m².

La precipitación que usó como senda de fluido el tronco de los árboles para llegar al suelo (escurrimiento fustal) se determinó a partir de la cantidad de agua recolectada por collarines de goma, sellados alrededor del tronco, de 15 árboles por parcela y conducidos a un tambor similar al utilizado para la precipitación directa. Para calcular el escurrimiento fustal equivalente a milímetros de altura de agua, se dividió los litros de agua que ingresaron al estanque en cada evento de lluvia por la cantidad de árboles que tenían collarín; luego, este valor se multiplicó por la densidad de árboles de cada plantación.

La variación temporal del contenido de agua del suelo hasta 3 m de profundidad (ΔW) se determinó con una sonda de neutrones Troxler 4300. La calibración de este dispersor de neutrones se hizo en terreno, de acuerdo con lo propuesto por Brechtel (1983). Estas mediciones se realizaron cada mes en 15 tubos enterrados en el suelo de cada parcela. Las tuberías se ubicaban sobre y entre las hileras de plantación para reducir al máximo los errores asociados a la desigual distribución del agua en el suelo de los bosques (Huber y Trecaman, 2000).

Cuadro 1. Descripción de las características del perfil del suelo de la zona del estudio.

Profundidad cm	Descripción
0 a 15	Pardo oscuro en húmedo, 7,5YR 3/2; pardo en seco, 10YR 5/3; textura franca, estructura granular fina, débil; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, friable; raíces abundantes; materia orgánica media; pH 6.0; límite inferior claro recto.
15 a 45	Pardo rojizo oscuro en húmedo, 5YR 3/3; textura franco arcillosa, densa; estructura de bloques subangulares medios, fuertes; plástico y adhesivo, friable; serosidades de arcilla delgadas, en los poros; pH 5.8; límite inferior gradual ondulado.
45 a 75	Pardo rojizo oscuro en húmedo, 5YR 3/4; rojo amarillento en seco, 5YR 4/6; textura arcillosa; estructura masiva; muy plástico, muy adhesivo, friable; serosidades de arcilla, gruesas, en las grietas; roca muy descompuesta en sílices; pH 5.8; límite inferior gradual ondulado.
75 a 100	Roca muy descompuesta, rica en sílices, pH 5.8

La escorrentía superficial (A) no se consideró, porque la plantación se ubica en un terreno que tiene una pendiente inferior a 2%.

La percolación (Per) se consideró equivalente a la cantidad de agua que atravesó el suelo a un nivel de referencia preestablecido a 3 m de profundidad. Se estableció esta profundidad porque en excavaciones previas, realizadas para caracterizar el perfil del suelo, se encontró que la profundidad máxima del sistema radicular no sobrepasa 2 m. Por consiguiente, los 3 m de profundidad están considerando la zona de influencia que pueden tener las raíces en el aprovechamiento del agua del suelo (Huber y Trecaman, 2000). El agua percolada se recogió en cuatro bandejas de 30 x 30 cm por parcela. Cada bandeja estuvo conectada a un recipiente ubicado bajo tierra hacia el cual drenaba el agua recogida. Cada mes, y con ayuda de una bomba portátil, se recuperó el agua almacenada en estos recipientes y se determinó su volumen. La equivalencia del agua percolada en milímetros de agua se realizó dividiendo los litros recolectados en cada bidón por la superficie de cada bandeja y luego se calculó el promedio de estos valores para cada parcela.

En adición, se realizaron mediciones de la temperatura y humedad del aire a campo abierto con un higrómetrografo HOBO para caracterizar las condiciones meteorológicas del período del estudio.

Las mediciones se realizaron entre octubre 2001 y octubre 2002.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La precipitación registrada durante el año de estudio (965 mm) superó en 43% el valor promedio para la zona que es de 670 mm [mapa de isoyetas "Concepción" 1:500 000 (MOP, 1987)]. En comparación con el registro histórico de una estación meteorológica próxima [San Javier 71°44' O, 35°35' S (Oficina Meteorológica de Chile, 1967)], la distribución temporal de la lluvia se caracterizó por un verano más seco al habitual y un otoño e invierno (abril-agosto) extraordinariamente lluvioso.

De la precipitación, 42 y 36% fue interceptada por el dosel de las parcelas de mayor y menor densidad, respectivamente (Cuadro 2). Esta diferencia fue estadísticamente significativa (Prueba de Wilcoxon; $w = 3003.5$; I_c más densa > I_c más rala $p = 0.02571$; $n = 81$). Esta situación permitió que al suelo de la parcela más rala llegara 60 mm más de lluvia. El mayor aporte de agua puede ser importante si se considera la escasa pluviometría que tiene el sector y al hecho de que el crecimiento de *Pinus radiata* en el centro-sur de Chile se mantiene durante todo el año si hay suficiente disponibilidad de agua en el suelo (Huber y García, 1999; Huber y Trecaman, 2002). En años con una cantidad y distribución normal de la lluvia, la pérdida relativa de agua por interceptación

debe ser mayor, porque la fracción retenida por el dosel tiene una relación inversa con la cantidad de precipitación (Huber y Iroumé, 2001). En esas condiciones aumentaría la diferencia entre los porcentajes de interceptación de ambas parcelas, porque las características del dosel adquieren mayor importancia a medida que la precipitación disminuye (Caldentey y Fuentes, 1995; Crockford y Richardson, 2000; Huber y Iroumé, 2001).

La fracción de precipitación interceptada en el dosel alcanzó los valores más altos que se han registrado en áreas forestales templado-lluviosas de Chile (Oyarzún y Huber, 1999; Huber y Iroumé, 2001), y más que duplicó lo registrado por Putuhena y Cordery (2000) en plantaciones similares ubicadas en el sur de Australia. Las condiciones climáticas de la zona (Figura 1) y las características de los eventos de lluvia, que se distinguen por su baja cantidad e intensidad, explican este resultado.

El aporte de agua por escurrimiento fustal (3 y 2%) en estas plantaciones no fue importante por la reducida área de copa que tienen los árboles a esta edad. En plantaciones forestales de mayor edad, establecidas en zonas con climas mediterráneos, estos valores pueden superar 6% (Crockford y Richardson, 2000; Huber y Iroumé, 2001). El escurrimiento fustal puede ser importante porque esta agua llega al suelo en la base de los troncos, donde se concentra la mayor cantidad de raíces de los árboles (Huber y Trecaman, 2000). En el presente trabajo, el escurrimiento fustal

Cuadro 2. Componentes de la redistribución de las precipitaciones y del balance hídrico en las parcelas de mayor (a) y menor densidad (b) (mm).

Componente	Período de medición												Total
	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	
Pp	15.4	8.4	0.0	0.0	28.1	168.4	180.7	83.4	245.2	169.7	31.2	34.7	965.2
a) 1250 árboles ha ⁻¹													
Pd	4.6	3.6	0.0	0.0	12.5	88.6	128.7	43.6	140.5	75.8	12.3	18.9	529.1
Pf	0.2	0.2	0.0	0.0	1.1	5.3	5.4	3.2	7.7	4.1	0.5	0.6	28.3
Ic	10.6	4.6	0.0	0.0	14.5	74.5	46.6	36.6	97.0	89.8	18.4	15.2	407.8
R	412.5	385.5	366.1	350.3	346.5	356.0	406.0	422.5	523.5	531.5	521.5	441.5	
Per	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.7	46.5	0.0	0.0	60.2
Evtm	102.2	30.7	19.4	15.8	17.4	84.4	84.0	30.3	33.5	25.4	22.7	99.6	565.4
b) 750 árboles ha ⁻¹													
Pd	5.3	4.1	0.0	0.0	15.8	107.9	133.9	49.8	157.9	91.7	12.5	23.3	602.2
Pf	0.1	0.1	0.0	0.0	0.6	3.1	3.1	1.7	4.0	2.1	0.2	0.4	15.4
Ic	10.0	4.1	0.0	0.0	11.7	57.4	43.7	31.9	83.2	75.9	18.5	11.0	347.4
R	432.5	407.5	389.6	378.8	362.4	405.5	473.0	495.5	521.5	522.0	516.5	470.0	
Per	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	104.3	46.5	0.0	0.0	150.8
Evtm	56.0	29.2	17.9	10.8	32.8	67.9	69.5	29.5	31.2	16.8	18.2	70.2	450.0

Pp = precipitación, Pd = precipitación directa, Pf = escurrimiento fustal, Ic = pérdidas de agua por interceptación, R = contenido de agua del perfil de suelo, Per = percolación y Evtm = evapotranspiración.

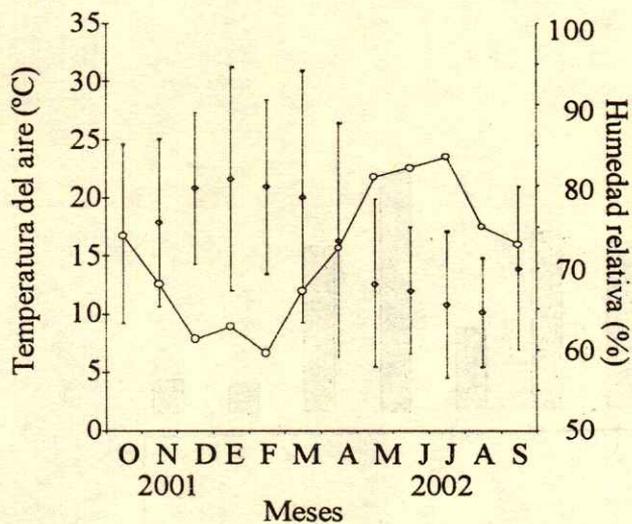


Figura 1. Temperatura promedio, máxima y mínima mensual del aire (°C), y humedad relativa del aire promedio mensual (%) para la zona de estudio.

no fue relevante, en especial durante el verano, porque las lluvias fueron de poco monto y baja intensidad (Cuadro 2), lo que no permitió que parte de la precipitación usara el tronco de los árboles como senda de fluido para llegar al suelo.

La precipitación mensual y la variación temporal y espacial del contenido de agua del perfil del suelo hasta 3 m de profundidad se presentan en la Figura 2. Puede observarse que prácticamente todo el perfil del suelo registró cambios en la cantidad de agua a través del año. Esta variación fue más intensa en los horizontes superiores de la parcela más rala y a mayor profundidad en la más densa. Durante todo el año, el contenido de agua del suelo fue superior en la parcela más rala (Cuadro 2). Ello se explica porque recibió más precipitación neta y porque tuvo una menor evapotranspiración neta.

Durante los meses de octubre a marzo, debido a la escasa precipitación (Cuadro 2) y a que, según Huber y García (1999), las condiciones meteorológicas, establecidas por la temperatura y la humedad relativa del aire, fueron favorables para la evapotranspiración (Figura 1), la mayor cantidad de agua del suelo en los primeros 50 cm de profundidad fue consumida por la evapotranspiración neta en ambas parcelas. Esta condición provocó que, al final del estío, ambas parcelas tuvieran prácticamente agotada su reserva de agua. La principal diferencia entre ambas parcelas fue que este agotamiento se alcanzó primero en la parcela

más densa, debido a que recibió menos precipitación neta y tuvo una mayor evapotranspiración.

En ambas parcelas, la precipitación de otoño y gran parte de la de invierno se utilizó para volver a saturar el suelo (Cuadro 2). Si se considera que el período de otoño-invierno durante el año de estudio fue excepcionalmente húmedo, puede inferirse que en un año con pluviometría normal el suelo debería saturarse más tarde, en especial en la parcela más densa. Incluso existe la posibilidad de que no se alcance a saturar e impedir con ello la percolación.

En la parcela más densa, se encontró una mayor variación temporal del contenido de agua en la parte inferior del perfil del suelo. Ello se debió a que al inicio del estudio, que coincidió con el final del período lluvioso, el suelo de ambas parcelas estuvo saturado, mientras que al final del estío la parcela con mayor densidad agotó más rápidamente la reserva de agua del suelo. Esta situación se debe a que una parcela más densa tiene una mayor abundancia de raíces en esa profundidad (López *et al.*, 1998).

En el Cuadro 2, se presenta la variación mensual de los componentes del balance hídrico para las dos parcelas. La cantidad total de agua involucrada en la evapotranspiración neta fue de 566 y 450 mm para las parcelas con mayor y menor densidad, lo que corresponde a 59 y 47% de la precipitación total, respectivamente. Si a estos valores se adicionan las pérdidas de agua por intercepción del dosel, la evapotranspiración total asciende a 973 y 813 mm, lo que equivale a 101 y 84% de la precipitación anual. De acuerdo con ello, la cantidad de agua involucrada en la evapotranspiración total de la parcela más densa superó los aportes por precipitación, por lo que el contenido de agua del suelo al final del período de estudio fue inferior al del inicio (Figura 2). Este resultado corrobora las conclusiones de Calder (1998), Huber y Trecaman (2000) y Van Dijk y Bruijnzeel (2001), quienes señalaron que la intercepción puede ser tan importante como la evapotranspiración neta y constituir en el principal efecto de los bosques sobre el balance hídrico.

La mayor evapotranspiración neta en ambas parcelas se registró en primavera y otoño (Cuadro 2). Ello se explica porque durante estas estaciones todavía hubo suficiente agua en el suelo y condiciones meteorológicas propicias para generar evapotranspiración (Figura 1). Durante el estío este componente del balance hídrico se redujo exclusivamente por la falta de agua en el suelo,

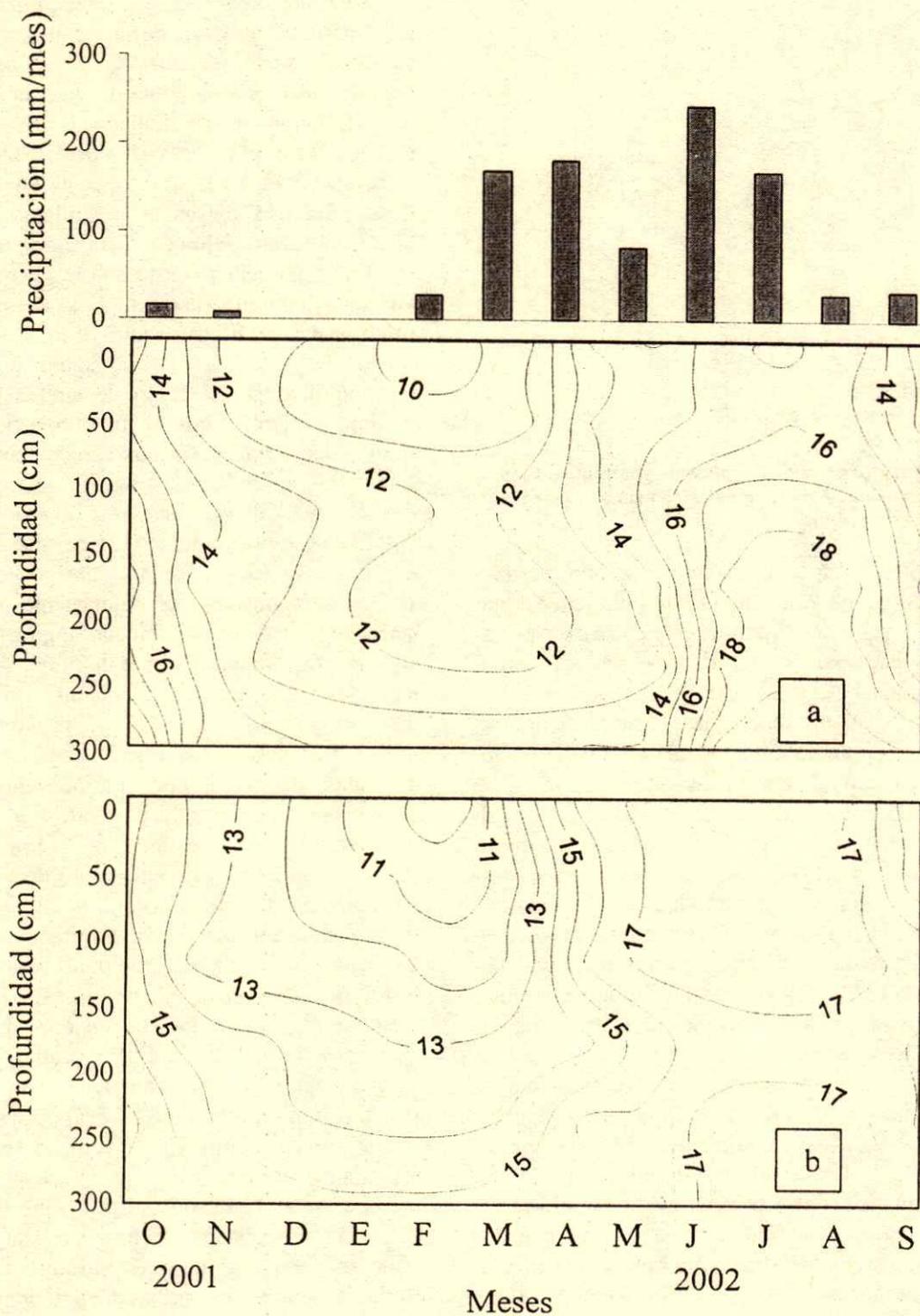


Figura 2. Precipitación y variación espacial y temporal del contenido de agua del suelo (% volumen) en las parcelas de mayor (a) y menor (b) densidad.

mientras que en los meses de invierno disminuyó por las condiciones meteorológicas menos favorables para la evapotranspiración (Figura 1). A ello hay que agregar la menor actividad fisiológica que tienen los árboles durante este período del año (Huber y García, 1999). El curso bimodal de la evapotranspiración neta ya había sido registrado por Abrahamson *et al.* (1998) y por Huber y Trecaman (2002) en zonas más lluviosas con suelos arenosos, los que tienen reducida capacidad de retención de agua. Esta situación limita la evapotranspiración durante el período estival por falta de agua.

A pesar de la diferencia que hubo en la evapotranspiración neta entre ambos tratamientos, ésta no fue estadísticamente significativa (Prueba de Wilcoxon; $w = 61$; EVT más densa $>$ EVT más rala $p = 0.272181$; $n = 12$). Ello se debió principalmente a que sólo durante los meses más lluviosos, cuando el suelo tuvo suficiente cantidad de agua útil disponible, la evapotranspiración neta fue superior en la parcela más densa. En los meses restantes, cuando en ambas parcelas hubo un déficit manifiesto de agua, la evapotranspiración neta fue baja y similar entre ellas (Cuadro 2).

Debido a la desigual cantidad de precipitación que llegó al suelo y a la distinta evapotranspiración neta de cada parcela, la percolación también fue diferente (Cuadro 2). En la parcela más densa, la percolación total del período fue de 60 mm, lo que equivale a 6% de la precipitación total; en la parcela más rala, estos valores ascendieron a 181 mm y 19%, respectivamente. La menor percolación en la parcela más densa se debió principalmente a la mayor intercepción en el dosel registrada al inicio del período de lluvias (Cuadro 2) y a la superior cantidad de agua involucrada en la evapotranspiración. Por lo tanto, puede inferirse que en años con una pluviometría normal, en terrenos planos donde están establecidas plantaciones de *Pinus radiata* de mayor densidad, toda el agua de lluvia se puede utilizar en la evapotranspiración, lo que impediría la generación de percolación.

CONCLUSIONES

La forestación con *Pinus radiata* en la zona del secano interior de Chile afecta el recurso hídrico, porque reduce la cantidad de agua que llega al suelo, debido a las mayores pérdidas de agua por intercepción del dosel, y disminuye el contenido de agua en el suelo, porque aumenta la

evapotranspiración neta. El menor aporte de agua por precipitación neta y el superior consumo por evapotranspiración son los responsables de la reducción de la percolación. Este impacto puede ser atenuado con un adecuado manejo de la densidad de las plantaciones. En años con una distribución normal o deficitaria de la precipitación no se generaría percolación en los sitios con estas plantaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del estudio "Efectos de la cubierta forestal sobre la dinámica hidrológica en suelos de secano del centro de Chile", investigación financiada por el Proyecto FONDECYT 1010713 y la importante colaboración de Forestal Celco S.A.

LITERATURA CITADA

- Abrahamson, D.A., P.M. Dougherty y S.J. Zarnoch. 1998. Hydrological components of a young loblolly pine plantation on a sandy soil with estimates of water use and loss. *Water Resources Res.* 34(12): 3503-3513.
- Álvarez, M. y M. Giglio. 1997. Raleo de renovales en la Reserva Forestal Magallanes, efectos silvícolas e hidrológicos. pp. 127-145. *In:* Economía ambiental y su aplicación a la gestión de cuencas hidrográficas. Corporación Nacional Forestal, Department for International Development, Environmental Resources Management. Santiago, Chile.
- Bosch, J. y J. Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrology* 55: 3-23.
- Brechtel, H.M. 1983. Probleme beim Einsatz von Neutronensonde im Rahmen Hydrologischer Messprogramme. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau. Verlag Paul Parey. Potsdam, Germany.
- Caldentey, J. y J. Fuentes. 1995. Niederschlagsverteilung in drei Waldbeständen der Gebirgskette Nahuelbuta, Chile. *Sonderdruck aus Wetter und Leben* 47(2-4): 120-140.
- Calder, I.R. 1998. Water use by forest, limits and control. *Tree Physiol.* 18: 625-631.
- Carrasco, P., J. Millán y L. Peña. 1993. Suelos de la cuenca del río Biobío. Características y problemas de uso. Gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Biobío y del área marina costera adyacente. Serie Análisis Territorial. Editorial Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- Crockford, R.H. y D.P. Richardson. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrol. Process.* 14: 2903-2920.
- Dye, P. 1993. Growth and water use of forest plantation. *Book Review. South African For. J.* 169: 65-66.
- Feller, M. 1981. Water balance in *Eucalyptus regnans*, *E. oblicua*, and *Pinus radiata* forest in Victoria. *Austr. For.* 44(3): 153-161.
- Fuenzalida, H. 1976. Clima: Geografía económica de Chile. Texto refundido. Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile.

- Huber, A. y F. García. 1999. Importancia de los factores meteorológicos en la transpiración potencial de *Pinus radiata*. *Phyton* 65: 143-152.
- Huber, A. y A. Iroumé. 2001. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *J. Hydrology* 248: 78-92.
- Huber, A. y R. Trecaman. 2000. El efecto de las características de una plantación de *Pinus radiata* en la distribución espacial del contenido de agua edáfica. *Bosque* 21(1): 37-44.
- Huber, A. y R. Trecaman. 2002. Efecto de la variabilidad interanual de las precipitaciones sobre el desarrollo de las plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don) en la zona de los arenales VIII Región, Chile. *Bosque* 23(2): 43-49.
- INFOR. Instituto Forestal. 2001. Estadísticas Forestales. Boletín Estadístico 84. Instituto Forestal. Santiago, Chile.
- IREN. Instituto de Investigación de Recursos Naturales. 1964. Suelos: Descripciones proyecto aerofotogramétrico Chile/O.E.A./B.I.D. Corporación de Fomento a la Producción. Publicación CIREN. Santiago, Chile.
- Iroumé, A. y A. Huber. 2002. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile. *Hydrol. Process.* 16: 2347-2361.
- López, B., S. Sabaté y C. Gracia. 1998. Fine roots dynamics in a Mediterranean forest: Effects of drought and stem density. *Tree Physiol.* 18: 601-606.
- MOP. Ministerio de Obras Públicas. 1987. Balance hídrico de Chile. Dirección General de Aguas. Santiago, Chile.
- Oficina Meteorológica de Chile. 1967. Pluviometría de Chile. III Parte, Fascículo III. Ministerio de Defensa Nacional. Fuerza Aérea de Chile. Santiago, Chile.
- Oyarzún, C. y A. Huber. 1999. Balance hídrico en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* en el sur de Chile. *Terra* 17: 35-44.
- Peña, L., O. Carrasco, M. Figueroa, C. Oyarzún y B. Lo Cascio. 1993. Pérdidas por erosión hídrica en suelos agrícolas y forestales de la cuenca del río Biobío. pp. 47-59. *in*: Carrasco, P., L. Peña, J. Millán, M. Figueroa, C. Oyarzún, B. Lo Cascio y E. Giordano. Elementos cognoscitivos sobre el recurso suelo y consideraciones generales sobre ordenamiento agroforestal. Gestión de recursos hídricos de la cuenca del río Biobío y del área marina costera adyacente. Serie propuestas de ordenamiento (4). Editorial Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- Putuhena, W.M. e I. Cordery. 2000. Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to *Pinus radiata*. *Agric. For. Meteorology* 100: 59-72.
- Romero, H. 1985. Geografía de los climas. Colección Geografía de los Climas. Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- Stoneman, G. 1993. Hydrological response to thinning a small jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest catchment. *J. Hydrology* 150: 393-407.
- Van Dijk, A.I. y L.A. Bruijnzeel. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. *J. Hydrology* 247: 230-238.
- Xiao, Q., E.G. McPherson, S.L. Ustin, M.E. Grismer y J.R. Simpson. 2000. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrol. Process.* 14: 763-784.
- Zarnoch, S.J., D.A. Abrahamson y P.M. Dougherty. 2002. Sampling throughfall and stemflow in young loblolly pine plantations. Res. Pap. SRS-27. US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. Asheville, NC.

PRODUCCIÓN DE CO₂ EN ANDOSOLES AFECTADOS POR INCENDIOS FORESTALES EN EL PARQUE NACIONAL EL CHICO, HIDALGO

CO₂ Production in Andosols Affected by Forest Fires in the National Park El Chico, Hidalgo

Elena Ikkonen¹, Efraín Ángeles-Cervantes² y Norma E. García-Calderón^{3†}

RESUMEN

En el Parque Nacional "El Chico" se evaluó la dinámica de producción de CO₂ en suelos de bosques de *Abies religiosa* (H.B.K) Schlecht. et Cham. después de incendios superficiales leves y moderados, y se interpretó la dinámica de producción de CO₂ como un índice de la actividad biológica. Se ha comprobado que el efecto del incendio de copa moderado sobre la respiración del suelo es insignificante, ya que los valores de los flujos de CO₂ del suelo tres años después del incendio son iguales a los de los sitios afectados con incendios 35 años antes o no afectados con incendios. La respiración del suelo en sitios afectados con incendios superficiales en 1998 fue 1.8 veces menor que los afectados con incendios moderados: el flujo de CO₂ correspondió a valores de 0.036 y de 0.065 mg de CO₂ g⁻¹ de suelo seco día⁻¹, respectivamente.

Palabras clave: *Abies religiosa*, *Actividad biológica*, *respiración del suelo*.

SUMMARY

Soil respiration in soils of *Abies religiosa* (H.B.K.) Schlecht. et Cham. forests was evaluated in the National Park El Chico after forest fires of low and moderate intensities; the dynamics of CO₂ production was measured in these sites as an index of biological activity. It was shown that the effect of moderate forest fires on soil respiration is low, as the values of CO₂ fluxes from soil three years after the fire were similar to those of the sites affected by forest fires 35 years ago or not affected at all. Soil

respiration at sites affected by surface fires in 1998 was 1.8 times lower than at sites affected by moderate forest fire: CO₂ fluxes corresponded to values of 0.036 and 0.065 mg CO₂ g⁻¹ dry soil d⁻¹, respectively.

Index words: *Abies religiosa*, *Biological activity*, *soil respiration*.

INTRODUCCIÓN

La emisión de los gases de invernadero es un problema crucial en el medio ambiente, la combustión de combustibles fósiles y la deforestación producen emisiones de 6.6×10^{15} g de C año⁻¹ (Hagedorn *et al.*, 2001). La producción de bióxido de carbono por el suelo es un indicador indirecto de la actividad microbiológica del suelo, ya que mide la tasa de respiración de los microorganismos (Wüthrich *et al.*, 2002).

Los incendios en los bosques generan la liberación de grandes cantidades de carbono en forma de bióxido de carbono. Se han estimado las pérdidas de CO₂ globales a partir de los ecosistemas terrestres debidas a los incendios, pero en general las mediciones ignoran la pérdida de C de los suelos. Los incendios también tienen un efecto indirecto sobre la emisión de los gases de invernadero a la atmósfera, porque los incendios forestales afectan la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo (Haslam *et al.*, 2001), así como su actividad biológica, que aumenta el consumo de energía por unidad de biomasa (Wüthrich *et al.*, 2002). Por eso, los incendios pueden reducir o aumentar el CO₂ del suelo en periodos de tiempo prolongados.

A escala internacional, los bosques del género *Abies* se han considerado como ecosistemas frágiles, sensibles a la contaminación y al cambio climático (Stocks y Kasischke, 2000). En México, estos bosques están constituidos principalmente por *Abies religiosa* (H.B.K) Schlecht. et Cham. y han reducido su extensión por factores como tala, plagas, enfermedades, contaminación ambiental y malas prácticas de manejo forestal. Además, presentan escasa o nula regeneración y las reforestaciones en las

¹ Instituto de Biología, Centro de Investigación de Karelia, Academia Rusa de Ciencias. Petrozavodsk, Rusia.

² Facultad de Estudios Superiores-Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

³ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

† Autor responsable (negc@hp.fciencias.unam.mx)

que se ha utilizado esta especie, han tenido poco éxito. En el Parque Nacional "El Chico", se observó la regeneración de *Abies religiosa* después de incendios con diferente intensidad. Como la dinámica de producción de CO₂ es un índice de la actividad biológica en el suelo, se le midió como un parámetro de su recuperación en los sitios afectados por incendios. También se evaluó el efecto de la humedad del suelo sobre la intensidad del flujo de CO₂. Además, se presenta un experimento metodológico sobre el efecto de la masa de la muestra en la intensidad del flujo del gas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Parque Nacional "El Chico" se ubica en el Estado de Hidalgo, aproximadamente a 24 km al noroeste de la ciudad de Pachuca, en el extremo occidental de la Sierra de Pachuca, perteneciente a la Sierra Madre Oriental. El parque se ubica entre 20° 10' 10" y 20° 13' 25" N y entre 98° 41' 50" y 98° 46' 02" O; el sitio a 20° 11' 20" N y 98° 43' 12" O. Este parque posee una topografía de pendientes abruptas y escarpadas cuyas elevaciones fluctúan entre 2500 y 3100 msnm.

Las formaciones geológicas de la región derivan de rocas ígneas, principalmente del tipo andesita.

El clima del Parque corresponde a un clima templado húmedo, con precipitación del mes más seco menor que 40 mm, presenta un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10% del total anual, con 2 máximos de lluvias separados por estaciones secas: una de mayor duración, en invierno, y otra de corta duración en medio de la estación lluviosa de verano. Las primeras lluvias aparecen, en general, en mayo y se extienden hasta octubre.

El principal tipo de vegetación es el bosque de *Abies religiosa* y, en menor extensión, la asociación *Abies - Quercus* y Bosques de *Quercus*. Las especies de encinos más frecuentes son *Quercus laurina*, *Q. rugosa* y *Q. texcocana*.

El bosque de *A. religiosa* presenta un estrato herbáceo y arbustivo escaso entre los que destacan *Senecio angustifolius* D. C., *Juniperus monticola* f. *compacta* Martínez, *Stevia jorullensis* H.B.K., *Acaena elongata* L., *Alchemilla procumbens* Rose *Potentilla ehrenbergiana* Schlecht., *Sibthorpia repens* (Mutis ex L.F.) O. Kuntze, *Salvia elegans* Vahl. y una abundante cubierta de musgo de *Thuidium delicatulum* (Hedw.) B.S.G.

Durante los meses de mayo y junio de 1998, se presentaron incendios forestales en varias zonas del Parque. En agosto de 1998, después de recorrer varias de ellas, se localizó una zona ubicada aproximadamente en el km 13 de la carretera Pachuca-Mineral El Chico, que representaba los diferentes tipos de incendios y, de acuerdo con Shvidenko y Nilsson (2000), se clasificaron como incendio superficial, incendio de copa moderado e incendio de copa severo.

Los sitios de este estudio fueron afectados por incendios de copa moderada. En este tipo de incendio se afectaron estratos herbáceo, arbustivo y varios individuos del estrato arbóreo, sin embargo, permanecieron vivos varios individuos adultos, en general los más grandes de 40 a 50 m de altura, con aproximadamente 30 árboles vivos ha⁻¹. La huella de los incendios alcanza una altura en el fuste hasta 8 m. En la actualidad, los estratos arbustivo y herbáceo son muy abundantes y alcanzan desarrollos hasta de 3 m de alto. Las especies que destacan en estos estratos son: *Abies religiosa* (H.B.K.) Schlecht. & Cham., *Eupatorium glabratum* H.B.K., *Buddleia cordata* H.B.K., *Symphoricarpos microphyllus* H.B.K., *Senecio angulifolius* D.C., *Verbena elegans* H.B.K., *Gnaphalium* sp., *Alchemilla procumbens* Rose. y *Ribes affine* H.B.K. y ocupan un área de aproximadamente dos hectáreas. El suelo es un Andosol húmico, con una profundidad máxima de 130 cm.

La temperatura del suelo, medida con un termómetro para semisólidos, varía de 7 a 10 °C en invierno, hasta 20 °C durante el verano, y la temperatura es de aproximadamente 15 a 20 °C durante la época de lluvias.

La humedad disponible del suelo, estimada con un humedímetro Kelwey, en los primeros 10 cm, varía de 5 a 10% en marzo-abril hasta 60% en septiembre.

La temperatura ambiental superficial, medida con un termohidrómetro TEL-TRU mod. PT50R, a 5 cm sobre la superficie del suelo, varía de 3 °C, en invierno, hasta 30 °C de mayo-agosto; el promedio en los meses de verano es de 20 °C.

La humedad ambiental, medida a 5 cm sobre la superficie del suelo, varía desde 15% en marzo-abril, hasta 100% en septiembre.

Las muestras de suelo para la evaluación de los flujos de CO₂ se tomaron en cuatro sitios forestales del Parque Nacional El Chico, el 29 de noviembre de 2002.

Primer sitio: bosque afectado por un incendio superficial (leve) en 1998; situado en una barranca, donde la regeneración es escasa.

Segundo sitio: bosque afectado por un incendio de copa moderado en 1998; situado en una montaña, donde la regeneración es muy abundante.

Tercer sitio: bosque afectado hace 35 años por un incendio de copa moderado, con regeneración muy abundante.

Cuarto sitio: bosque no afectado por incendios.

El muestreo y la transportación de las muestras se efectuaron de la siguiente manera. De la superficie del suelo se limpió con cuidado el mantillo. Después, se obtuvo un monolito del suelo de un área de 15 × 20 cm y de 10 cm de profundidad, cortándolo de la capa superficial del suelo. Éste se cubrió con una película de polivinilcloruro para prevenir el contacto con el oxígeno de la atmósfera y para disminuir el proceso de mineralización de la materia orgánica del suelo. Los monolitos se transportaron al laboratorio y se mantuvieron hasta el inicio del experimento en un congelador.

Al tercer día después del muestreo, cada uno de los monolitos se separó en 7 a 8 muestras, obteniendo un total de 30 muestras del suelo (repeticiones biológicas). La masa de las muestras de suelo absolutamente seco varió entre 80 y 150 g. Todas las raíces y piedras del tamaño visible se eliminaron del suelo con cuidado. Cada muestra se colocó en un cilindro de polivinilcloruro, ajustando al suelo en el fondo y las paredes del cilindro. Sólo la superficie de la muestra tuvo contacto directo con la atmósfera.

Cuatro muestras de cada monolito se humedecieron con agua destilada en varias cantidades para evaluar el efecto de la humedad del suelo sobre la intensidad de la productividad de bióxido de carbono. Para prevenir la desecación excesiva de las muestras, durante todo el experimento se cubrieron con papel húmedo, que no impedía el intercambio de gases entre el suelo y el aire.

El momento de separación de los monolitos se consideró como el inicio del experimento. La muestra se incubó a 25 °C. Las primeras evaluaciones de los flujos del CO₂ se hicieron el día posterior a la separación de los monolitos. Se consideró que, durante este tiempo, el equilibrio de las fases se estabilizaba en el suelo, y todo el gas producido por el volumen de la muestra difundía libremente al aire. Los flujos del CO₂ se analizaron durante ocho días con una frecuencia de una vez cada dos días en

tres repeticiones. La mitad de las muestras se analizó cada día.

La intensidad del flujo del CO₂ se evaluó con el analizador de gases infrarrojo (DX6000, ©RMT Ltd., Rusia) conectado a una Laptop Toshiba 2215 XCDS. La muestra del suelo se colocó en una cámara de metal cubierta herméticamente con una copa, con un ventilador agregado y conectada con el analizador por un sistema de tubos. El volumen del aire en el sistema "cámara - tubos de conexión - analizador" se mantuvo estrictamente constante. El ventilador en el sistema de investigación es necesario para igualar y estabilizar la concentración de bióxido de carbono en todo el volumen del sistema y para acelerar el contacto del gas producido con el equipo de evaluación del analizador.

La intensidad del flujo del gas se evaluó por la velocidad del aumento de concentración del CO₂ en el espacio cerrado de volumen conocido. Para recalcular la concentración del bióxido de carbono de los valores en porcentaje del volumen con respecto a los valores de la masa, se utilizó la ecuación de Mendeleev-Klaiperon (Smagin, 2000).

Después de colocar la muestra en la cámara para evaluar el intercambio de CO₂ y de cerrar herméticamente el sistema, fue necesario esperar durante un minuto para que se produjera el equilibrio en el contenido de CO₂ en todo el volumen del aire del sistema. Luego se registró el cambio de la concentración del gas durante 3 min con una frecuencia de una evaluación por segundo.

Después de terminar con el ciclo de evaluación, las muestras de suelo se secaron a la temperatura de 105 °C para evaluar el peso en seco absoluto y su contenido de humedad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La concentración inicial del CO₂ en el sistema de evaluación varió de 350 a 450 mg kg⁻¹. Estos valores dependen directamente de las concentraciones de bióxido de carbono en el laboratorio donde se realizó el experimento. El análisis de correlación no mostró efecto de variación de las concentraciones del CO₂ en este diapazón con respecto a la producción de bióxido de carbono de la muestra. El relativamente corto período de tiempo de exposición de la muestra en la cámara es suficiente para el registro de la velocidad de producción del gas. Sin embargo, el aumento de la cantidad del CO₂ no es tan grande como para afectar la dinámica del flujo del gas en el suelo.

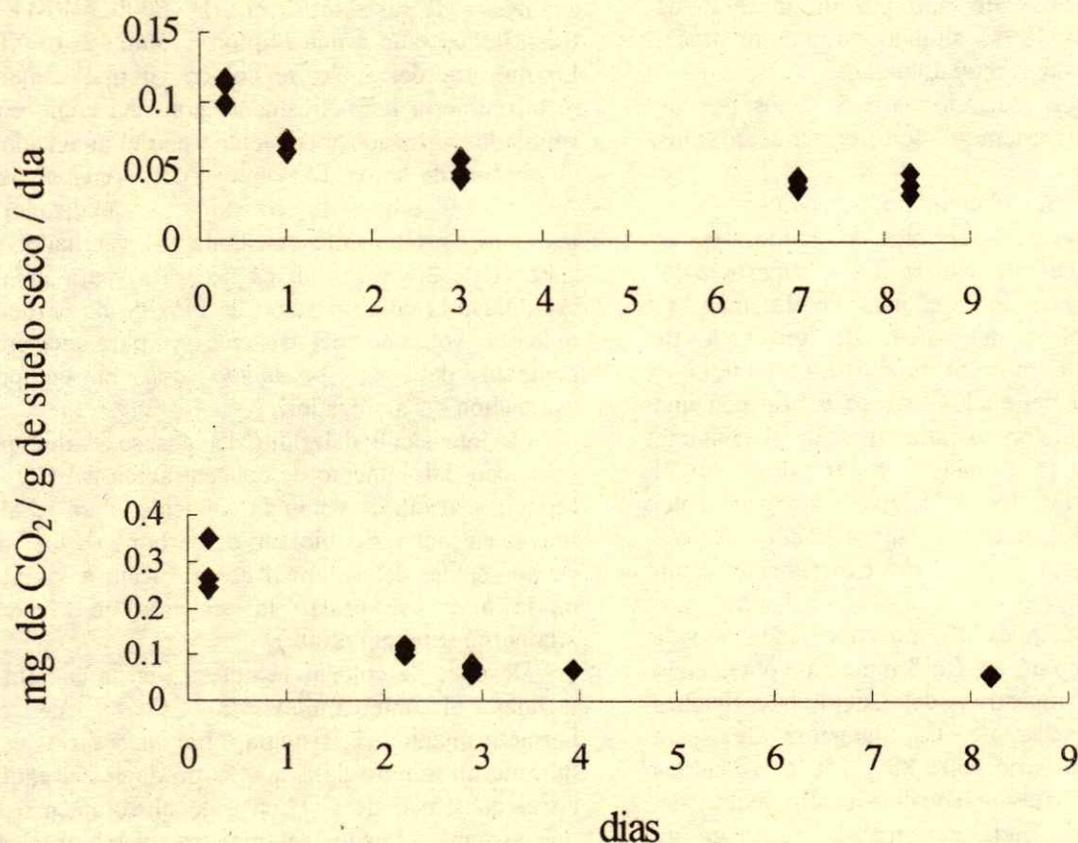


Figura 1. Dinámica de producción de CO₂ en muestras tomadas al azar; a corresponde a una de las muestras del Sitio 2 y b a una de las muestras del Sitio 3.

La producción de bióxido de carbono en los suelos estudiados no fue permanente durante todo el experimento. Para obtener el tiempo necesario para la estabilización de los flujos del CO₂ de los suelos se valoró la dinámica de la emisión del gas de las muestras al azar de varios sitios. Algunos de los resultados sobre la dinámica de los flujos están delineados en la Figura 1. Todas las muestras tienen valores de flujo más elevados al inicio del experimento y éstos se estabilizan en los días 3 y 4. Algunos autores (Powlson, 1980; Magnusson, 1993; Pannikov *et al.*, 1997) también notaron el aumento en la intensidad de descomposición de la materia orgánica del suelo en el periodo inicial después de la toma y perturbación de la muestra. En general, este hecho se explica por el aumento de la aireación del suelo después de desordenar su estructura, exposición de las zonas anaerobias y la agitación del substrato y

las comunidades de microorganismos. Larionova *et al.* (2001) notaron que el efecto del desorden de la estructura del suelo es resultado del muestreo continuo durante dos a tres días. Por lo tanto, se considera que el proceso de producción del gas es permanente. Los resultados del presente estudio son similares a los de Larionova *et al.* (2001).

La intensidad del flujo de CO₂ del suelo, después de humedecerlo hasta 90%, es baja en los dos primeros días (Figura 2). Con posterioridad, el flujo se estabiliza en un valor más alto que al principio. Los valores bajos de los flujos al inicio del experimento se explican por la disolución del CO₂ en el agua del suelo y por su difusión lenta en los poros ocupados con agua.

En las Figuras 1 y 2, se advierte un leve aumento de los flujos después de tres a cuatro días del experimento, en el periodo de estabilidad relativa.

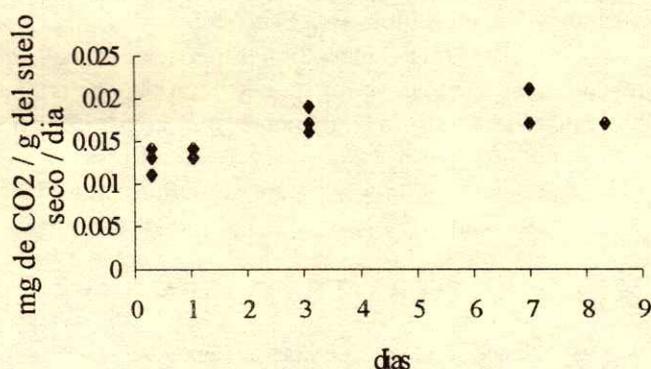


Figura 2. Dinámica de producción de CO₂ de una muestra del Sitio 1 con 90% de humedad.

Esta disminución en la intensidad de producción del CO₂ puede deberse al término del consumo de los componentes frágiles de la materia orgánica del suelo. También, aunque se tengan las medidas necesarias para proteger las muestras de la desecación, el suelo pierde un poco de humedad. Entonces, por las razones anotadas, sólo los resultados del último día del experimento se utilizaron para los cálculos.

Los valores promedio de la producción de bióxido de carbono de las repeticiones biológicas y analíticas para los cuatro sitios se presentan en el Cuadro 1.

La intensidad de los procesos bióticos y abióticos, responsables de la producción de bióxido de carbono en los horizontes superficiales del suelo, es similar en los Sitios 2, 3 y 4. Para el Sitio 1, la intensidad de la producción de CO₂ es 1.8 veces menor que en los suelos de los otros sitios e igual a 0.036 mg de CO₂ g⁻¹ de suelo seco día⁻¹; se considera que la respiración del suelo corresponde con la regeneración de los árboles después del incendio leve.

De las investigaciones de Larionova *et al.* (2001), se observa que la intensidad de producción del CO₂ en las capas superficiales de los suelos grises (Phaeozems gréyicos) de los bosques templados de

Rusia Mediaeuropea es en promedio 0.06 a 0.07 mg de CO₂ g⁻¹ de suelo seco día⁻¹. En los suelos orgánicos (Histosoles) de las zonas templadas, la producción del gas es más alta, 0.10 a 0.70 mg de CO₂ g⁻¹ de suelo seco día⁻¹, y la producción potencial puede ser hasta 5.0 mg de CO₂ g⁻¹ de suelo seco día⁻¹ (Prozorova, 1988; Hogg, 1993; Moore y Dalva, 1993, 1997). En México, la producción de CO₂ en suelos regados con aguas residuales presenta variaciones entre 0.09 y 0.19 mg de CO₂ g⁻¹ de suelo seco día⁻¹ (Galicia *et al.*, 2000), mientras que en suelos subtropicales (García-Calderón *et al.*, 2001) los valores son entre 2.0 y 6.3 mg de CO₂ g de suelo seco día⁻¹. Adams *et al.* (2002) reportaron producción de 0.07 a 0.16 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ en horizontes hísticos y mólicos y de 0.05 a 0.08 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ en Regosoles dísticos y aluviales con praderas contaminadas por petróleo del sureste del país; en general, los valores obtenidos para los sitios estudiados en el Parque Natural El Chico corresponden con los obtenidos en ecosistemas de zonas templadas y subtropicales.

La dependencia de la intensidad de producción de bióxido de carbono con la humedad del suelo se caracteriza por una función potencial, con un coeficiente de correlación de 0.43 en el rango de 40 a 100% de humedad (Figura 3). Los valores más altos de los flujos del gas se observan cuando la humedad del suelo varía entre 75 y 85%. Por lo tanto, el aumento de humedad mayor que estos valores puede resultar en la disminución de la velocidad de producción del CO₂. La diferencia en valores para la misma humedad puede ser explicada con la diferencia en la porosidad de las muestras del suelo, porque éstas tienen densidad aparente variable (0.7 a 0.9 g cm⁻²).

Las diferencias de la masa en seco de las muestras de suelo resultaron en la variación de los valores de producción del CO₂ (Figura 4). La dependencia tiene el carácter lineal en el aumento de los flujos de gas, con la consecuente disminución de la masa de la muestra; el coeficiente de correlación es 0.45.

Cuadro 1. Intensidad de la producción de CO₂ (mg de CO₂ g⁻¹ de suelo seco día⁻¹) en la capa superficial de los Andosoles.

	Sitio 1 (incendio en 1998, regeneración escasa)	Sitio 2 (incendio en 1998, regeneración muy abundante)	Sitio 3 (incendio de 30-40 años, regeneración abundante)	Sitio 4 (sin incendio)
Promedio	0.036±0.004	0.064±0.012	0.064±0.008	0.065±0.004
Max.	0.050	0.126	0.104	0.082
Min.	0.017	0.033	0.037	0.042
N	21	20	20	24

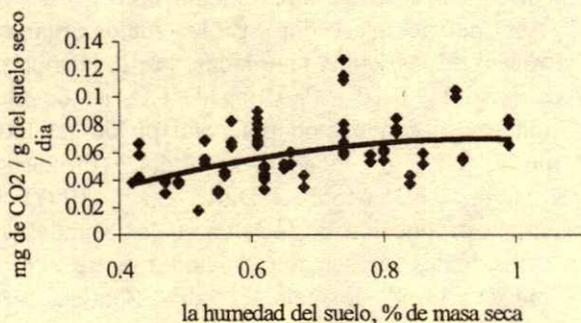


Figura 3. Producción de CO_2 de las muestras con diferentes humedades.

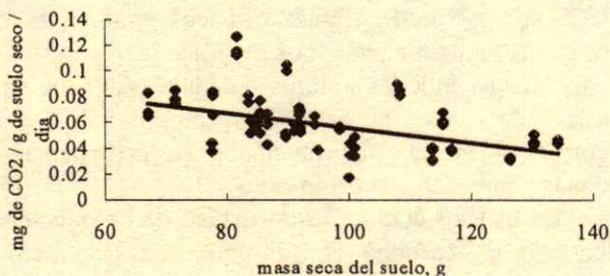


Figura 4. Producción de CO_2 de las muestras con diferente masa.

La tendencia del aumento en la intensidad de producción de CO_2 en las muestras más pequeñas resulta de la penetración del oxígeno con mayor facilidad hacia el interior de todas las superficies de los agregados del suelo. Si las muestras de diferente masa tienen volúmenes iguales, la diferencia en la intensidad de producción del CO_2 puede ser el resultado de la variación en la porosidad del suelo. Por tal motivo, los datos de la respiración del suelo en un experimento de laboratorio deben compararse con cuidado, y se debe tener en cuenta que la intensidad del flujo depende de la masa de la muestra del suelo.

CONCLUSIONES

- En la capa superficial de los Andosoles húmicos en el Parque Nacional El Chico, la intensidad de flujo de bióxido de carbono es de 0.065 ± 0.004 mg de CO_2 g^{-1} de suelo seco día^{-1} a 25°C de temperatura.
- El efecto del incendio de copa moderado sobre la respiración del suelo no es grande, ya que los valores de los flujos de CO_2 del suelo tres años después del incendio con alta regeneración son iguales a los de los

sitios afectados con incendios 35 años antes o no afectados con incendios.

- En el sitio con incendio superficial leve, la regeneración escasa corresponde con la actividad biológica baja y con la menor respiración del suelo (0.036 mg de CO_2 g^{-1} de suelo seco día^{-1}).

- La intensidad máxima del flujo se obtuvo entre 75 a 85% de humedad del suelo.

LITERATURA CITADA

- Adams-Schroeder, R.H., V.I. Dominguez-Rodríguez y L. Vinalay-Carrillo. 2002. Evaluation of microbial respiration and ecotoxicity in contaminated soils representative of the petroleum-producing region of Southeastern México. *Terra* 20: 253-265.
- García-Palacios, M.S., G. Almendros, N. García-Calderón. 2000. Mineralización del carbono en suelos cultivados del DDR 063 Mezquital, Edo. de Hidalgo. pp. 383-389. *In*: Quintero Lizaola, R., T. Reyna, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez y N. García-Calderón. La Edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Tomo I. Colegio de Postgraduados-Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Autónoma Chapingo. México, D.F.
- García-Calderón, N., E. Romero, S. Galicia, A. Ibáñez, B. Platero, R. Ramos y G. Almendros. 2001. Behavior of the soil biogeochemical cycles on control sites of coffee growing agroecosystems from Pluma Hidalgo, Oaxaca (Mexico). pp. 343-344. *In*: Weber, J., E. Jamroz, J. Drozd y A. Karczewska (eds.). Biogeochemical processes and cycling of elements in the environment. Polish Society of Humic Substances. Wrocław, Poland.
- Hagedorn, F., S. Maurer, P. Egli, P. Blaser, J. B. Bucher y R. Siegwolf. 2001. Carbon sequestration in forest soils: Effects of soil type, atmospheric CO_2 enrichment, and N deposition. *European J. Soil Sci.* 52: 619-628.
- Haslam, S.F.I., D.W. Hopkins y J.A. Chudek. 2001. Carbon dynamics in upland soils after serious fires. pp. 337-342. *In*: Rees, R.M., B.C. Ball, C.D. Campbell y C.A. Watson. Sustainable management of soil organic matter. CAB-International. Wallingford, UK.
- Hogg, E.H. 1993. Decay potential of hummock and hollow Sphagnum peats at different depths in a Swedish raised bog. *Oikos* 66: 269-278.
- Larionova, A.A., L.N. Rosanova, T.S. Demkina, I.V. Yevdokimov y S.A. Blagodatsky. 2001. Annual Emission of CO_2 from Gray Forest Soils. *Euras. Soil Sci.* 34: 61-68.
- Magnusson, T. 1993. Carbon dioxide and methane formation in forest mineral and peat soils during aerobic and anaerobic incubation. *Soil Biol. Biochem.* 25: 877-883.
- Moore, T.R. y M. Dalva 1993. The influence of temperature and water table position on methane and carbon dioxide emissions from laboratory columns of peatland soils. *J. Soil Sci.* 44: 651-669.
- Moore, T.R. y M. Dalva 1997. Methane and carbon dioxide exchange potentials of peat soils in aerobic and anaerobic laboratory incubations. *Soil. Biol. Biochem.* 29: 1157-1164.
- Pannikov, N.S., D.V. Nizovtseva, A.M. Semenov y M.V. Sizova. 1997. The dynamics of respiration activity of microorganisms in an oligotrophic mire and a coincided upland soil. *Microbiologia* 66: 160-164. (En Ruso)

- Powlson, D.S. 1980. The effect of grinding on microbial and non-microbial organic matter in soil. *J. Soil Sci.* 31: 77-85.
- Prozorova, M.I. 1988. The effect of humidity and temperature on the velocity of peat mineralization. *Ekologia* 2: 3-7. (En Ruso).
- Shvidenko, A.Z. y S. Nilsson. 2000. Extent, distribution, and ecological role of fire in Russian forest. pp. 132-150. *In: Kasischke, E. y B. Stocks (eds.) Fire, climate change and carbon cycling in the Boreal forest. Ecological Studies* 138. Springer Verlag, New York.
- Smagin, A.V. 2000. Gaseous phase of soil. Moscow State University. Publ. House. (En Ruso). Moscow, Rusia.
- Stocks, B.J. y E. Kasischke. 2000. Information requirements and fire management and policy issues. pp. 7-18. *In: Kasischke, E. y B. Stocks (eds.) Fire, climate change and carbon cycling in the Boreal forest. Ecological Studies* 138. Springer Verlag, New York.
- Wüthrich, C., D. Schaub, M. Webe, P. Marxer y M. Conedera. 2002. Soil respiration and soil microbial biomass after fire in a sweet chestnut forest in southern Switzerland. *Catena* 48: 201-215.

TOMATE INDUSTRIAL CON RIEGO POR CINTA

Industrial Tomato under Tape Irrigation

Adán Fimbres-Fontes¹

RESUMEN

La región agrícola de Caborca cuenta con una superficie de 40 000 ha, las cuales se riegan con agua proveniente de aproximadamente 700 pozos. El abatimiento del manto acuífero es, en promedio, de 0.82 m año⁻¹ y, en 25 años, ha sido de 20.50 m, medidos al nivel estático. El agua es uno de los factores más importantes en la producción de cualquier cultivo en la región. El objetivo del presente trabajo fue optimizar la cantidad de agua por aplicar al tomate industrial cultivado con riego por cinta. El presente trabajo se realizó durante el ciclo de primavera-verano, durante los años 1997 y 1998, en el Campo Experimental Caborca, Sonora, México. La variedad de tomate fue Hale y se utilizaron tres tratamientos del por ciento de la evapotranspiración (ET) estimada en tanque evaporímetro Tipo A: 50%, 60% y 100% ET. Se usó un diseño completamente al azar con seis repeticiones. Los coeficientes (K) usados durante toda la etapa de crecimiento del tomate fueron 0.52, 0.70, 0.75 y 0.70 para abril, mayo, junio y julio, respectivamente. Se evaluaron la lámina de agua aplicada, el diámetro del tomate y el rendimiento. Los resultados indicaron que el tratamiento de 50% ET fue el de mayor eficiencia en el uso del agua, pero el de menor producción (52 t ha⁻¹), por lo que, para lograr mayor rendimiento (74.75 t ha⁻¹) con riego por cinta, es necesario aplicar 100% ET, el cual equivale a una lámina de riego de 66.19 cm.

Palabras clave: Riego por goteo, evapotranspiración, hortalizas.

SUMMARY

The agricultural region of Caborca has an area of 40 000 ha, irrigated with water from approximately

¹ Campo Experimental Caborca, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 125, Caborca, Sonora, México (ifimbres@prodigy.net.mx)

Recibido: Marzo de 2002. Aceptado: Abril de 2004.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 22: 433-436.

700 wells. The average water depletion of the aquifer is 0.82 m yr⁻¹, and 20.50 m accumulated over 25 years, measured in the static level. Water is the most important factor in the production of any crop in the region. Therefore, the objective of this research was to determine the optimum amount of water for industrial tomato under tape irrigation. This research was conducted during 1997 and 1998 in the Caborca Experimental Station, Sonora, Mexico. The tomato variety used was Hale, and the three treatments were 50, 60, and 100% evapotranspiration (ET) estimated in a pan evaporation Type A. A completely randomized block design was used with six replications. The coefficients (K) used during the growing season of tomato were 0.52, 0.70, 0.75, and 0.70, for April, May, June, and July, respectively. The evaluated variables were water applied, tomato diameter, and yield. Results indicated that the 50% ET treatment was the best in the use of applied water, but was the one with the least yield (52 t ha⁻¹); furthermore, to get the highest yield (74.75 t ha⁻¹) under trickle irrigation it is necessary to apply 100% ET with an application depth of 66.19 cm.

Index words: Drip irrigation, evapotranspiration, vegetables.

INTRODUCCIÓN

La región agrícola de Caborca, Sonora, es uno de los lugares de la República Mexicana donde hay un fuerte abatimiento del manto acuífero que, en promedio, es de 0.82 m año⁻¹. El exceso de extracción ha provocado sobreexplotación del acuífero, por ello, desde 1983 la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1983) inició un programa de reducción en las extracciones y el cambio de padrón de cultivos en la zona, con el fin de obtener mejor utilidad por cada metro cúbico de agua utilizado. La Asociación de Usuarios del Distrito de Riego (ASUDIR) ha continuado con la misma política en cuanto a ahorro de agua e introducción de cultivos más redituables. El objetivo del presente trabajo fue optimizar la cantidad de agua por aplicar al tomate industrial cultivado con riego por cinta.

Locascio *et al.* (1989), en un trabajo con tomate con riego por goteo, concluyeron que, en un suelo de arena fina, el coeficiente de 0.5 de la evaporación tuvo mejor rendimiento que el de 1.0, sin embargo, en un suelo migajón arenoso, el rendimiento más alto se obtuvo con la cantidad de agua más alta (1.0).

Bogle *et al.* (1989), al comparar riego con cinta subsuperficial y riego por surcos en tomate, indicaron que los tomates seleccionados para el mercado fueron 22% más grandes con riego por cinta que con riego por surcos. Las parcelas regadas con cinta recibieron menos de 45% del total del agua evaporada en un tanque evaporímetro Tipo A, durante toda la temporada, con lo cual se logró incrementar la eficiencia del agua con riego por cinta.

Randall y Locascio (1988), en un estudio de pepino y tomate con dos experimentos de riego por goteo, señalaron que dosis altas de agua (0.5 veces la evaporación) resultaron con el mayor contenido de humedad en el suelo, alta densidad de raíces y mejor desarrollo de la planta, que con el bajo contenido de agua de 0.25 veces la evaporación.

Clark *et al.* (1991), en estudios para evaluar agua y fertilizante en tomate, el uso de plástico con goteo en primavera, así como humedad proveniente del manto freático superficial en otoño, concluyeron que la producción de primavera, con el uso de goteo en tomate fresco, requiere más agua que la producción de otoño. Sin embargo, la producción de primavera tiene más altos rendimientos y mejor respuesta al manejo del agua que la de otoño.

Hartz (1993), en estudios de calendarización del riego por goteo en tomate fresco, con riego a 20% de humedad aprovechable al inicio de la temporada y aplicaciones posteriores de 76% de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y coeficientes basados en el aumento del follaje, indicó que es una buena guía de aplicación del agua de mediados de temporada hasta cosecha logrando con esto maximizar el agua y la productividad.

Pitts y Clark (1991), en un estudio por tres años en el que compararon goteo y subirrigación del manto freático superficial en tomate, concluyeron que no hubo diferencia significativa en producción o calidad del fruto. Sin embargo, hubo una significativa reducción en agua requerida por goteo que promedió 50% de la evaporación total en el ciclo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de riego por cinta se realizó durante 1997 y 1998 en el Campo Experimental de la región de Caborca, Sonora, México, ubicado en el km 22 de la carretera Caborca-Desemboque, cuyas coordenadas son 112°21'28" O y 30°42'55" N y una altitud de 200 m. Las temperaturas máximas se presentan en los meses de junio a septiembre y se registraron frecuentemente en este período temperaturas mayores que 40 °C. La evaporación promedio registrada en la región oscila de 2400 a 2700 mm (INIFAP, 1985). El suelo fue de textura migajón arenoso, con capacidad de campo de 10.50%, humedad con base en peso de suelo seco de 12% y punto de marchitez permanente de 5.36% y 6%, para profundidades de 30 y 60 cm, respectivamente, con el cultivo de tomate variedad Hale para uso industrial (tipo saladete). La siembra se hizo el 7 de marzo de 1997, en charolas de poliestireno en media sombra. En 1998, la siembra se hizo el 20 de febrero en charolas de poliestireno pero en invernadero, con lo cual el tamaño alcanzado al trasplante fue mayor que el que se obtuvo en 1997. El trasplante (doble hilera) se realizó el 1 de abril en ambos años. Se utilizaron tres tratamientos con seis repeticiones en un diseño completamente al azar. El equipo de riego presurizado usado en el experimento constaba de la fuente de abastecimiento (pila), motor de 25 HP, presión de salida de 200 kPa y en las líneas regantes (cinta) de 60 kPa, el espaciamiento entre goteros fue de 30 cm y entre regantes de 2 m. El fertilizante que se usó fue urea (Villarreal *et al.*, 2002) aplicada a través del sistema de riego por goteo y la cantidad durante toda la temporada fue de 80 kg ha⁻¹ de N (Ramos *et al.*, 2002). Los tratamientos aplicados fueron como se muestra en el Cuadro 1.

Los riegos se aplicaron a diario, con excepción de los fines de semana; en cosecha, se aplicaron al día siguiente de la recolección del tomate. Cabe mencionar que antes del trasplante se formó el bulbo de mojado con aplicación de 30 h (5.65 cm). En 1997, se utilizó un coeficiente K para hortalizas de 0.6 basado en tablas hechas por otros investigadores (Vega, 1982) desde abril hasta agosto, pero, en 1998, se hicieron cambios de acuerdo con otra tabla (Cuenca, 1989) y a las etapas fenológicas del cultivo, por lo que los coeficientes K que se aplicaron fueron: 0.52, 0.70, 0.75, y 0.70 durante abril, mayo, junio y julio, respectivamente, basados en un tanque

evaporímetro Tipo A. Las variables medidas fueron lámina aplicada, rendimiento y diámetro del tomate.

Para medir la producción de tomate se hicieron cuatro cosechas por año en diferentes fechas (Cuadro 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los Cuadros 3 y 4, se muestra el rendimiento de tomate por corte y total en el ciclo, así como la eficiencia en el uso del agua. Se observa que, en 1997, no hubo diferencia significativa entre tratamientos en las fechas de corte. Sin embargo, en la tercera cosecha del 7 de julio de 1998 sí se encontró diferencia significativa entre tratamientos (Tukey, 0.05) y 100% ET fue estadísticamente mayor que 60% ET y 50% ET, lo cual se reflejó, al final de la temporada, con una mayor producción, ya que 100% ET obtuvo 74.75 t ha⁻¹ y esto va de acuerdo con lo que encontró Fimbres (2001) en espárrago, en el cual la mayor producción al final del ciclo fue con 100% ET. El tratamiento de 50% ET obtuvo un rendimiento de sólo 52 t ha⁻¹. Sin embargo, los tratamientos de 50% y 60% de ET fueron los de mayor eficiencia en el uso del agua con valores de 15.85 y 15.06 kg m⁻³.

Cuadro 1. Tratamientos de la evapotranspiración estimada en tanque evaporímetro y gasto de gotero. INIFAP-CECAB.

Tratamiento	Gasto/gotero
% ET	L h ⁻¹
50	0.567
60	0.680
100	1.130

Cuadro 2. Fechas de corte en tomate industrial bajo riego por cinta durante 1997 y 1998. INIFAP-CECAB.

1997	1998
Julio 30 (30/7)	Junio 24 (24/6)
Agosto 06 (6/8)	Junio 30 (30/6)
Agosto 13 (13/8)	Julio 07 (7/7)
Agosto 20 (20/8)	Julio 14 (14/7)

Cuadro 4. Rendimiento de tomate industrial en cada una de las fechas con riego por cinta. 1998. INIFAP-CECAB.

Tratamiento	24/6	30/6	7/7	14/7	Total	Eficiencia
% ET	t ha ⁻¹					kg m ⁻³
50	6.27	7.79	29.99b	7.90	52.00	15.85
60	7.07	10.02	36.35b	6.55	59.99	15.06
100	5.43	9.94	48.76a	10.62	74.75	11.29

Cifras con la misma letra en hilera son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

Cuadro 3. Rendimiento de tomate industrial en cada una de las fechas con riego por cinta. 1997. INIFAP-CECAB.

Tratamiento	30/7	6/8	13/8	20/8	Total	Eficiencia
% ET	t ha ⁻¹					kg m ⁻³
50	7.46	4.15	8.80	2.77	23.19	4.01
60	8.16	4.80	7.08	3.91	23.97	3.42
100	9.76	10.78	12.00	4.75	37.30	3.20

En los Cuadros 5 y 6, se muestra el diámetro del tomate industrial. Se observa que en los dos años se encontró diferencia significativa para esta variable (Tukey, 0.05). El tratamiento de mayor diámetro para ambos años fue 100% ET. Sin embargo, 60% ET fue estadísticamente igual a 100% ET en dos fechas de corte, tanto en 1997 como en 1998.

En el Cuadro 7, se muestra la lámina de agua aplicada total en cada uno de los tratamientos y, en la Figura 1, la cantidad de agua aplicada por mes, desde el inicio hasta la terminación del ciclo de tomate para 1998. Las láminas de agua fueron datos indirectos de la aplicación de los tratamientos, por lo que no se les analizó estadísticamente. Puede observarse que la diferencia en láminas entre el tratamiento de 50% ET y 100% ET es del doble aproximadamente para ambos años. Las láminas de agua aplicada fueron mayores en 1997 que en 1998, porque, por un lado, 1997 fue muy caliente, sobre todo en el mes de mayo, cuando la temperatura promedio máxima fue de 37.3 °C, en comparación con sólo 31.8 °C para 1998. Aunado a esto, la planta trasplantada en 1997 fue de menor tamaño (siembra tardía) que la planta que se cultivó en invernadero durante 1998, por lo que se prolongó el tiempo de cosecha. Por estas dos razones las láminas de agua fueron diferentes para ambos años.

CONCLUSIONES

- Con base en la literatura y de acuerdo con los resultados obtenidos, es posible concluir que el tomate requiere de alto contenido de humedad en todo su ciclo, principalmente en la etapa vegetativa, para

obtener buenos rendimientos. Por esto mismo, no es posible usar el tratamiento más seco (50% ET), que fue el de mejor eficiencia en el uso del agua, pero también fue el de menor rendimiento.

Cuadro 5. Diámetro del tomate industrial en cada una de las fechas con riego por cinta. 1997. INIFAP-CECAB.

Tratamiento	30/7	6/8	13/8	20/8
% ET	----- cm -----			
50	2.79 b	2.70 c	2.09 b	1.76 c
60	3.64 a	3.03 bc	2.74 a	1.98 bc
100	3.79 a	3.55 a	3.24 a	2.67 a

Cifras con la misma letra en columna son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

Cuadro 6. Diámetro del tomate industrial en cada una de las fechas con riego por cinta. 1998. INIFAP-CECAB.

Tratamiento	24/6	30/6	7/7	14/7
% ET	----- cm -----			
50	3.08 b	2.91 b	2.93 c	2.43 c
60	3.49 a	3.36 a	3.44 b	2.99 b
100	3.72 a	3.67 a	3.76 a	3.37 a

Cifras con la misma letra en columna son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

Cuadro 7. Lámina de agua total aplicada en tomate industrial con riego por cinta. 1997 y 1998. INIFAP-CECAB.

Tratamiento	Lámina aplicada	
	1997	1998
% ET	----- cm -----	
50	57.71	32.80
60	70.07	39.83
100	116.45	66.19

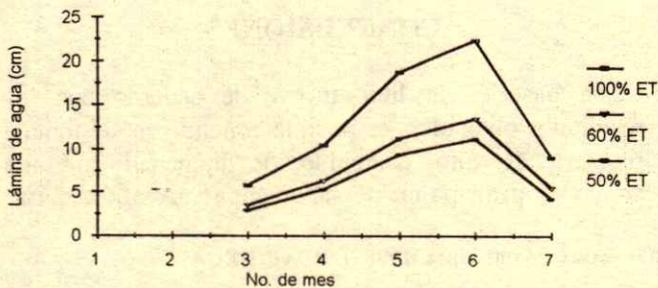


Figura 1. Lámina de agua aplicada por mes en tomate industrial con riego por cinta. 1998. INIFAP-CECAB.

- Para lograr mayor producción con el uso de riego por cinta, se recomienda aplicar los coeficientes que se usaron en 1998 y 100% de la evapotranspiración estimada en tanque evaporimetro.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al señor Juan Manuel Torres-Aceves por su valiosa ayuda en la realización de este experimento.

LITERATURA CITADA

- Bogle, C.R., T.K. Hartz y C. Núñez. 1989. Comparison of subsurface trickle and furrow irrigation on plastic mulched and bare soil for tomato production. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 114: 40-43.
- Clark, G.A., C.D. Stanley, D.N. Maynard, G.J. Hochmuth, E.A. Hanlon y D.Z. Haman. 1991. Water and fertilizer management of microirrigated fresh market tomatoes. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 34: 429-435.
- Cuenca, H.R. 1989. Irrigation system design. An engineering approach. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ.
- Fimbres-Fontes, A. 2001. Optimización del riego con cinta superficial y enterrada en espárrago. *Terra* 19: 191-195.
- Hartz, T.K. 1993. Drip irrigation scheduling for fresh market tomato production. *Am. Soc. Hort. Sci.* 28: 35-37.
- INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 1985. Guía para la asistencia técnica agrícola. Área de influencia del Campo Experimental Región de Caborca. Caborca, Sonora, México.
- Locascio, S.J., S.M. Olson y F.M. Rhoads. 1989. Water quantity and time of N and K application for trickle-irrigated tomatoes. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 114: 265-268.
- Pitts, D.J. y G.A. Clark. 1991. Comparison of drip irrigation to subirrigation for tomato production in southwest Florida. *Appl. Eng. Agric.* 7: 177-184.
- Ramos-Lara, C., G. Alcántar-González, A. Galvis-Spinola, A. Peña-Lomelí y A. Martínez-Garza. 2002. Eficiencia de uso del nitrógeno en tomate de cáscara en fertirriego. *Terra* 20: 465-469.
- Randall, H.C. y S.J. Locascio. 1988. Root growth and water status of trickle irrigated cucumber and tomato. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 113: 830-835.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1983. Propuesta de reducción de las extracciones del acuífero en un plazo de 7 años, con un intervalo de evaluación. Anexo 2. Distrito de Riego 37, Altar-Pitiquito. Caborca, Sonora.
- Vega-Gutiérrez, J.D. 1982. Uso y manejo del agua. Departamento de Suelos e Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, Nuevo León, México.
- Villarreal-Romero, M., R.S. García-Estrada, T. Osuna-Enciso y A.D. Armenta-Bojórquez. 2002. Efecto de dosis y fuente de nitrógeno en rendimiento y calidad postcosecha de tomate en fertirriego. *Terra* 20: 311-320.

CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA "EL TEJOCOTE", ATLACOMULCO, ESTADO DE MÉXICO

Calibration of the Hydrologic Model SWAT in the Watershed "El Tejocote", Atlacomulco,
State of Mexico

Elibeth Torres-Benites^{1†}, Demetrio S. Fernández-Reynoso¹, José Luis Oropeza-Mota¹ y
Enrique Mejía-Saenz¹

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue calibrar el Modelo de simulación SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para el balance hídrico en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, y evaluar su capacidad predictiva para simular la producción de agua, sedimentos, gastos medios y producción de maíz en la cuenca. Los escenarios de simulación se construyeron utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcView. Los datos utilizados para calibrar el modelo consistieron en cinco años de información climática (1980 a 1984), 62 usos de suelo y 14 unidades de suelo, lo cual resultó en 116 unidades de respuesta hidrológica. Los resultados obtenidos mostraron que el SWAT subestimó en 18% la producción mensual de agua y en 38% la producción mensual de sedimentos. Los coeficientes de determinación para los datos simulados mediante el SWAT fueron de 0.94 y 0.84 para la producción anual, tanto de agua, como de sedimentos. El rendimiento de maíz observado fue de 4302 kg ha⁻¹, el cual se compara favorablemente con 5104 kg ha⁻¹ simulado por SWAT. El modelo simuló con razonable precisión las variables analizadas.

Palabras clave: SWAT, producción de agua, producción de sedimentos, manejo de cuencas.

SUMMARY

The objective of this study was to compare the hydrological capacities of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model to simulate annual water and sediment discharge and maize biomass production in the watershed "El Tejocote", located in Atlacomulco,

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

[†] Autor responsable (hely@colpos.mx)

Recibido: Junio de 2001. Aceptado: Febrero de 2004.
Publicado en *Terra Latinoamericana* 22: 437-444.

State of Mexico. Before running the model, it was calibrated, adjusting several parameters for the recommendations given in its handbook. The scenarios of simulation were constructed using the Arc-View Geographical Information System. In this study we used data from five years of climatic information (1980-1984), 62 different land uses and 14 soil units. This produced 116 hydrologic response units. Results showed that SWAT underestimated the simulated monthly water yield by 18% and the simulated monthly sediment yield by 38%. SWAT was more precise in simulating the annual water and sediment yield as was evidenced by the determination coefficients of 0.94 and 0.84, respectively. The model simulated grain yield of maize with reasonable precision. The average grain yield observed was 4302 kg ha⁻¹ compared with 5104 kg ha⁻¹ simulated by SWAT. Results obtained by the model were, in general, acceptable since they are within the range reported in similar works. The SWAT model is recommended for sustainable watershed management planning.

Index words: Hydrologic simulation model, SWAT, water and sediment yield, watershed management.

INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de suelos y aguas en la agricultura provoca degradación de las tierras. México debería redoblar esfuerzos en la promoción de la aplicación de medidas viables para detener la erosión de los suelos y disminuir el transporte de sedimentos en las aguas superficiales (mejores prácticas de manejo agrícola, pecuario y forestal para el control de la erosión). Para tener éxito en este propósito, es preciso contar con un mayor conocimiento de las interacciones entre los principales sistemas de producción y promover su integración con los de restauración natural de las tierras.

La gestión del agua también es fundamental para la planeación y para el manejo de los recursos naturales con fines de sostenibilidad (Brooks *et al.*, 1991). El conocimiento de la hidrología es necesario para determinar reservas, demandas y suministros de agua, para predecir fenómenos de frecuencia extrema (inundaciones, desbordes, sequías) y para proteger la calidad del agua (Baker *et al.*, 1995).

La forma de abordar un estudio hidrológico de una región debe ser a través de una cuenca, debido a que esta última constituye la unidad física completa donde la entrada es la precipitación y las salidas son el escurrimiento y el sedimento, incluyendo en el proceso la influencia de vegetación, suelo y topografía. El problema de trabajar a escala de cuencas lo representa la manipulación de grandes volúmenes de información, su análisis y la posterior toma de decisiones. En México, la medición de la cantidad y calidad del agua no es realizada de manera periódica y directa a través de estaciones hidrométricas y de monitoreo, respectivamente. Ante esta circunstancia, una alternativa para evaluar la cantidad y calidad del agua en las cuencas y presas que no cuentan con infraestructura de medición, es el uso de los modelos hidrológicos de simulación, debido a su bajo costo y a la estimación razonable de sus resultados.

Los modelos de simulación son un instrumento de predicción basado en procesos de hidrología y erosión. Estos modelos son herramientas valiosas para

evaluar el efecto de prácticas de manejo sobre ambiente, escurrimiento, producción de sedimentos, erosión y productividad (Santos *et al.*, 1996). La importancia de los modelos radica, entre otros aspectos, en la predicción de fenómenos a largo plazo instantáneamente, también permiten obtener relaciones de causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales (Benavides-Solorio, 2001).

El modelo SWAT se ha probado en dos escalas espaciales de cuencas controladas por el ARS de los Estados Unidos (Riesel, Texas con una superficie de 17.7 km² y Lower Río Colorado con una superficie de 9000 km²), con el objetivo de planear, evaluar y conservar los recursos suelo y agua vinculados con los proyectos económicos nacionales para determinar el suministro y la calidad del agua en 18 cuencas, de los principales ríos de Estados Unidos. Los resultados obtenidos en estas dos cuencas se muestran en los Cuadros 1 y 2, respectivamente.

Los objetivos de este trabajo fueron calibrar el Modelo de simulación SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold *et al.*, 1991) para el balance hídrico de la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, estado de México, y comprobar su capacidad como una herramienta que agilice el procesamiento de la información con ahorro de tiempo y recursos. Los resultados de este trabajo permitieron pronosticar los efectos de sistemas de manejo actuales, sobre el escurrimiento y producción

Cuadro 1. Producción de agua y sedimentos anuales y mensuales, medidos y simulados para la estación G Riesel, Texas.

	Medido	Simulado	Desv. Est. medida	Desv. Est. simulada	r ²	Pendiente de la regresión	Índice de Nash
Anual							
Producción de agua (mm)	171.20	151.70	128.70	128.70	0.85	1.33	0.79
Producción de sedimentos (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	1.46	1.33	0.93	0.93	0.78	1.15	0.75
Mensual							
Producción de agua (mm)	14.30	12.60	26.60	21.40	0.80	1.13	0.77
Producción de sedimentos (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	0.12	0.11	0.30	0.21	0.75	1.10	0.73

Cuadro 2. Comparación de gastos medios medidos y observados en la cuenca Lower, Río Colorado.

	Observado	Predicho	Observado	Predicho
Gasto medio (m ³ s ⁻¹)	726.40	639.80	60.50	57.80
Desviación estándar (m ³ s ⁻¹)	542.00	317.90	97.60	74.30
r ²		0.72		0.60
Pendiente de la línea de regresión		1.44		1.01
Índice de Nash		0.65		0.60

de sedimentos, lo cual es útil en cuencas que no cuentan con estaciones de aforo o cuando se quiere conocer estos parámetros hidrológicos en una sección específica de un cauce.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la Cuenca

La cuenca "El Tejocote" se localiza en el estado de México, a 99° 54' 37" O y 19° 51' 22" N, dentro del municipio de Atlacomulco, con una superficie de 17 656 ha, altitud promedio de 2608 m, pendiente media de 14.0% y longitud media de la pendiente de 150.3 m.

A la salida de la cuenca, se localiza la estación hidrométrica "El Tejocote", sobre el cauce denominado río Chiquito, que es un afluente del río Lerma. La estación hidrométrica empezó a operar el 23 de julio de 1962 y las observaciones de sólidos en suspensión se efectuaron del 22 de junio de 1965 (SRH, 1973) hasta finales de 1985. En la zona de estudio se ubican 35 pozos profundos, 10 manantiales y 309 almacenamientos con una capacidad total de 7.5 millones m³ para estos últimos.

Según el sistema de Köppen, modificado por García (1973), el clima es C(W1)(W)b(i), con temperatura y precipitación media anual de 13.35 °C y 838.5 mm, respectivamente.

De acuerdo con el estudio de erosión potencial, con base en la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), para el DDR 05 Atlacomulco, realizado por Fernández-Reynoso (1999), se reporta que la erosión potencial dentro de la cuenca varía de 160 a 239 t ha⁻¹ año⁻¹.

Del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se obtuvieron los datos climáticos diarios para las ocho estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca (Temascalcingo, Muyteje, San Pedro Potla, Atlacomulco, El Tejocote, Fabela, San Andrés Timilpan y Acambay), correspondientes al periodo de 1961 a 1992.

De la Comisión Nacional del Agua (CNA) se obtuvieron los aforos diarios de producción de agua (gastos medios y máximos) y sedimentos de la estación hidrométrica para el periodo de 1961 a 1992. De esta serie de datos, únicamente se seleccionaron cinco años (1980 a 1984), debido a que las ocho estaciones meteorológicas presentaban los registros climáticos más completos.

Información Empleada

Para cumplir con los objetivos del presente estudio, la información se procesó para usar la interfase del modelo SWAT con el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView. La información usada fue la generada por Fernández-Reynoso (1999) para la cuenca en estudio, la cual comprende un periodo de cinco años (1980-1984), usando el modelo SWRRB. Asimismo, se hizo uso del Modelo de Elevación Digital y datos vectorizados (curvas a nivel, corrientes intermitentes y perennes, carreteras, y poblados) del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática correspondientes a la carta E-14-A17 (INEGI, 1982).

El modelo SWAT, es un modelo matemático para el estudio de cauces, ríos y cuencas hidrográficas, el cual se desarrolló para evaluar el impacto que tienen las prácticas de manejo de suelo, agua, vegetación y cultivos y sus insumos sobre la producción de agua, sedimentos en grandes y complejas cuencas hidrológicas, con diversas estrategias de manejo durante largos periodos de tiempo.

SWAT realiza una división de la cuenca en subcuencas, lo cual permite al modelo reflejar las diferencias en evapotranspiración de varios cultivos y suelos. El escurrimiento superficial lo predice en forma separada por unidad de respuesta hidrológica (URH) y lo concentra para obtener el escurrimiento total de la cuenca.

El modelo SWAT está conformado por un conjunto de modelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. El modelo hidrológico está basado en la ecuación general de balance hídrico:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

Donde: SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm H₂O), SW_o es el contenido de agua inicial en el día i (mm H₂O), t es el tiempo (día), R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mm H₂O), Q_{surf} es la cantidad de escurrimiento superficial en el día i (mm H₂O), E_a es la cantidad de evapotranspiración en el día i (mm H₂O), w_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en el día i (mm H₂O), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mm H₂O) (Arnold *et al.*, 1991).

El SWAT es un modelo de simulación continua, el cual analiza los impactos a largo plazo, es decir, los sedimentos en los almacenamientos en periodos de

10, 15, 50 y 100 años, así como para la programación de las prácticas agrícolas en un año, como: rotación de cultivos, siembra, cosecha, riego, fertilización y aplicación de plaguicidas.

Para cumplir con este objetivo, el modelo está basado en principios físicos, es decir, en lugar de integrar modelos de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y de salida, SWAT usa modelos semiempíricos que requieren de datos específicos acerca de clima, propiedades físicas

del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo, que ocurren en la cuenca.

Metodología de Trabajo

En la Figura 1, se muestran los pasos que se siguieron para la realización de este trabajo. La alimentación de la información al modelo se realizó de acuerdo con las claves de control de la interfase SWAT-ArcView (Arnold *et al.*, 1991).

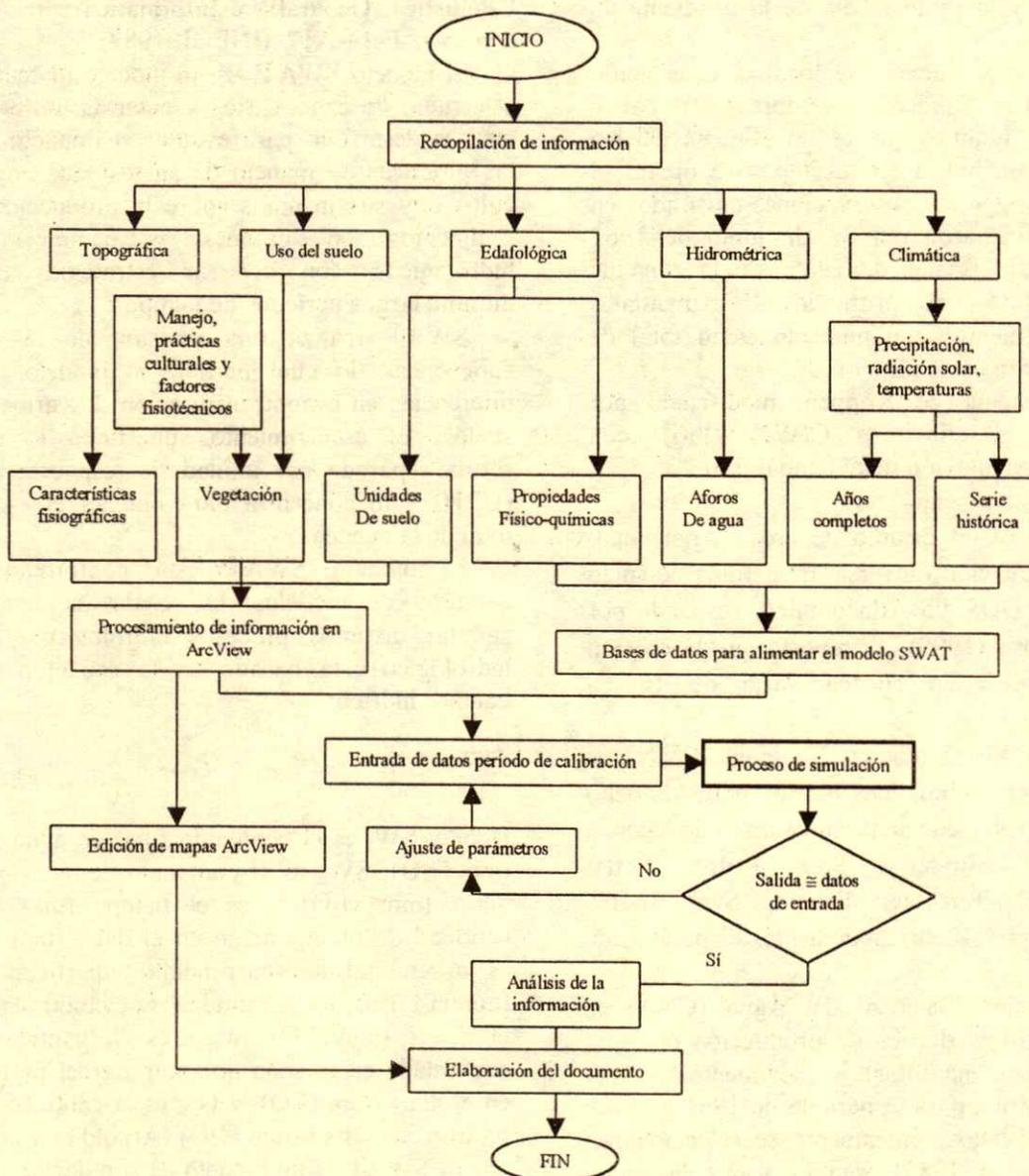


Figura 1. Diagrama de flujo metodológico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo permite la simulación del balance hidrológico a diario, mensual o anual. En el presente estudio, su calibración se basó en datos diarios, sin embargo, se optó por reportar los resultados mensuales y anuales, debido a la facilidad de manipulación de los datos.

Ajuste de Parámetros

El ajuste de parámetros se realizó de acuerdo con el manual del SWAT, el cual indica los parámetros de entrada que más afectan las salidas del modelo y su orden de importancia. Tomando como base los trabajos de Fernández-Reynoso (1999), Benavides-Solorio (2001) y Maldonado-de León (2001), se realizaron corridas con variaciones pequeñas no mayores que 10% en la mayoría de los parámetros. En el Cuadro 3, se reportan los parámetros a los cuales el modelo es más sensible, así como su grado de sensibilidad.

Producción de Agua

La producción de agua que reportan las salidas del SWAT es la suma de los escurrimientos superficiales (SURQ) y subsuperficiales (LATQ y GWQ), menos las pérdidas por transmisión (TLOSS) y las abstracciones de los almacenamientos (WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - IRR - SA_IRR - DA_IRR).

La Figura 2 exhibe la dinámica y magnitud de la producción de agua en forma mensual de los valores medidos y simulados por el SWAT; en la gráfica, se aprecia que los valores mensuales simulados se asemejan a los aforados, excepto en octubre y noviembre cuando ocurren las últimas lluvias y el suelo se encuentra húmedo, en los cuales el modelo realiza sobrestimaciones.

Algunos autores consideran que los modelos hidrológicos están sujetos a errores, los cuales pueden ser aleatorios o sistemáticos, y que los análisis de la media, desviación estándar y coeficiente de determinación no son suficientes para poder detectarlos (Aitken, 1973). Los aleatorios ocurren cuando el modelo no muestra tendencias a sobrestimar o subestimar para un número sucesivo de intervalos de tiempo y los sistemáticos se presentan cuando un error tiende a persistir sobre una serie de intervalos de tiempo. Los dos tipos de error pueden ser causados por imperfecciones en la estructura del modelo, pero también pueden tener como causa la toma de datos, por lo cual deben ser reconocidos y tomados en cuenta.

Una manera de determinar si el modelo o los datos presentan errores sistemáticos es a través del coeficiente de eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe (1970). Este coeficiente es semejante al de determinación y su cálculo es parecido, pero no son iguales; en éste, se utilizan los valores estimados del escurrimiento generados por el modelo y, en el coeficiente de determinación, los valores estimados

Cuadro 3. Parámetros más sensibles que afectan los valores del modelo SWAT.

Parámetro modificado	Significado	Grado de sensibilidad	Parámetro de salida que modifica
CN ₂	Curva numérica en la subcuenca	Alto	Esc. superficial, Esc. Subsuperficial, flujo temporal
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible	Alto	Escurrimiento superficial
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	Alto	Escurrimiento superficial
GW_REVAP GWQMN	Coefficiente del "revap" del agua subterránea Profundidad umbral del agua en el acuífero somero	Medio	Flujo base
USLE_P SLSUBBSN SLOPE	Factor prácticas de labranza Longitud de la pendiente Pendiente de las URH	Medio	Producción de sedimentos
USLE_C	Factor de manejo del cultivo	Alto	Producción de sedimentos
CH_EROD CH_COV	Erosionabilidad del cauce Factor cobertura del cauce	Medio	Degradación y deposición en el cauce

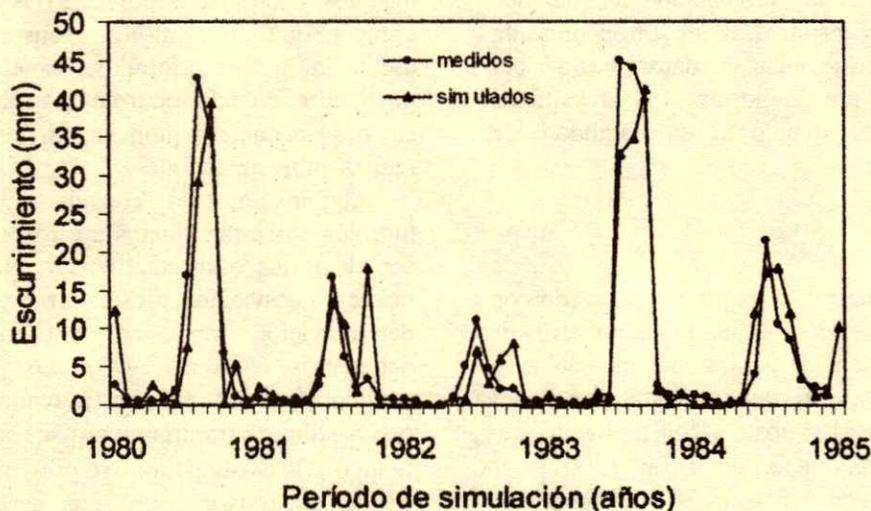


Figura 2. Producción de agua medida y simulada con el SWAT para un periodo de cinco años.

del escurrimiento obtenidos de la curva de regresión de los valores observados (Aitken, 1973).

En el coeficiente de eficiencia, se presentan la varianza inicial y la varianza residual o no explicada por el modelo, el valor de este estadístico siempre será menor que la unidad. Si los resultados de un modelo son altamente correlacionados pero sesgados, los puntos de dispersión de valores observados y estimados no se ubicarán aleatoriamente en una línea de 45°; como resultado, el valor del coeficiente de eficiencia será mucho menor que el coeficiente de determinación.

En el Cuadro 4, se comparan los valores del coeficiente de eficiencia obtenidos para la cuenca

El Tejocote y otros valores de otras cuencas y modelos similares al SWAT.

Producción de Sedimentos

El modelo predice los sedimentos a diario, de igual forma se aforaron en la estación hidrométrica durante el periodo de simulación; dichos datos se integraron cada mes para hacer las comparaciones correspondientes. En la Figura 3, se presenta la dinámica de la producción mensual de sedimentos medidos y simulados; en la gráfica, se observa que el sedimento simulado, en general, se ajusta favorablemente a los datos observados; sin embargo,

Cuadro 4. Comparación de estadísticos de salida para escurrimientos en diferentes cuencas y modelos, incluyendo el coeficiente de eficiencia.

Cuenca	Área	Modelo	Media		Desv. estándar		Coef. Det.	Coef. Efic.
			Obs.	Est.	Obs.	Est.		
	km ²							
Russina River (USA)	3458	Stanford IV	59.1	58.1	94.1	91.6	0.99	0.99
Dandenong River (Aust.)	270	Porter-MacMahon	17.2	18.1	21.5	19.8	0.76	0.76
Ramu River (Nva Guinea)	881	Ribeny-Drown	91.6	94.1	57.4	56.9	0.78	0.76
Wagga Research C. (Aust.)	0.081	Boughton	2.0	1.7	5.1	4.5	0.41	0.35
River Ray (G.B.)	19	SM 2D (b)	15.9	17.3	20.2	20.3	0.90	0.89
Little Mill Creek (USA)	18.5	USDAHL	24.3	24.4	31.2	29.9	0.81	0.80
El Carrizal (Méx.)	7.89	SWRRB	81.5	93.0	9.7	11.6	0.92	0.90
El Tejocote (Méx.)	176.6	SWRRB	6.1	6.0	11.6	13.1	0.97	0.82
El Tejocote (Méx.)	176.6	SWAT	6.1	6.0	11.6	10.3	0.93	0.85

Obs. = observados, Est. = estimados, Coef. = coeficiente, Det. = determinación, Efic. = eficiencia, Desv. = desviación.

al final de cada año se observan sobrestimaciones, consideradas como no relevantes comparado con el ajuste observado para todo el período de simulación. Esta sobrestimación puede atribuirse a: a) degradación del cauce (depositación), lo cual es significativo en cuencas que sufren cambios en los patrones del uso del suelo de forestal a agrícola y/o a urbano como sucedió en este caso, b) debido a la dinámica y al magnitud de la cobertura del suelo por el dosel de la vegetación, influenciada por el efecto de las distintas fechas de siembra de los diferentes cultivos, lo cual afecta a la curva numérica que es parámetro muy sensitivo del modelo, c) generación y distribución de las URH jerarquizadas por el modelo en función de la interacción entre la cobertura y las unidades de suelo, y d) posibles errores cometidos en el momento de cuantificar los sedimentos en la estación hidrométrica. Asimismo, la regresión lineal de la producción de sedimentos observados sobre los simulados señala que éstos se comparan favorablemente, aunque en menor grado que en el caso de la producción de agua,

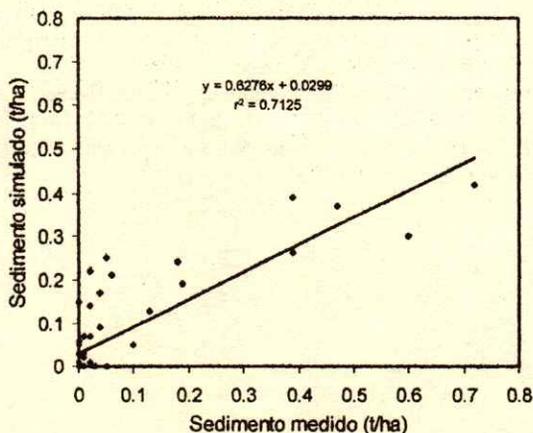
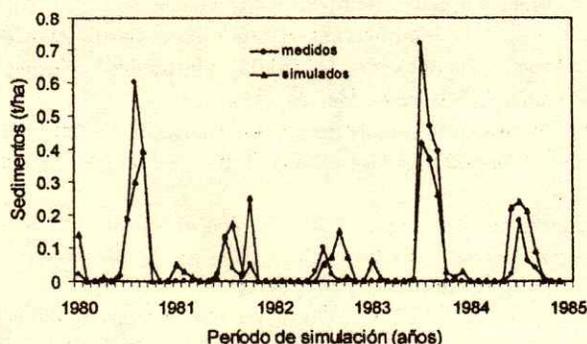


Figura 3. Producción de sedimentos medidos y simulados con el modelo SWAT para 60 observaciones de un período de cinco años.

sin embargo, se consideran satisfactorios, ya que se ubican dentro de límites permisibles según lo reportado en la literatura (Cuadro 1). Los valores de r^2 y pendiente de la recta fueron 0.71 y 0.62, respectivamente.

En el Cuadro 5, se reporta el análisis de regresión realizado a la producción de agua y sedimento anual medido y simulado. Se observa que, en general, el SWAT tiene mayor capacidad predictiva para la producción de agua que para sedimentos. En este trabajo también se encontraron superiores correlaciones mensuales, mayores que las anuales o diarias.

SWAT estima el gasto medio mensual de cada subcuenca, lo cual permite al usuario definir la magnitud de una avenida con un período de retorno de dos años; dicha variable fue subestimada por el modelo en 12%, ya que el gasto medio aforado es de $3.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y el simulado por SWAT fue de $3.22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Rendimiento de Cultivos

La comparación de la producción de materia seca y grano medida y simulada de maíz por el modelo SWAT se presenta en el Cuadro 6. Se aprecia que los rendimientos estimados por el modelo son similares a las producciones registradas en la cuenca. Este antecedente evidencia que el modelo puede simular con razonable precisión la producción de materia seca y grano de otros cultivos en esta cuenca.

CONCLUSIONES

- Las predicciones de la producción de agua, tanto mensual, como anual, se modelaron con mayor precisión, que la correspondiente a la producción de sedimentos por el modelo SWAT.

Cuadro 5. Parámetros estadísticos anuales de las producciones de agua y sedimento.

	Media	Desv. Est. [†]	R ²	%
Producción de agua (mm)				
Medido	73.03	47.51	0.94	1.21
Simulado	72.14	36.03		
Producción de sedimentos (t ha ⁻¹)				
Medido	0.70	0.67	0.84	- 15.14
Simulado	0.81	0.34		

[†] Desv. Est. = desviación estándar.

Cuadro 6. Rendimiento simulado y observado de maíz en la cuenca El Tejocote

Condición de siembra	Índice de cosecha	Rendimiento observado en 1984	Biomasa predicha	Rendimiento predicho
			----- kg ha ⁻¹ -----	
Temporal en pendiente	0.25	2613	12 914.10	3228.50
Temporal en valle	0.27	5146	24 050.80	6012.70
Riego	0.27	5143	24 284.30	6071.10

- El modelo mostró un ajuste del coeficiente de eficiencia satisfactorio para la cuenca El Tejocote, graficando los datos, se refleja una buena distribución aleatoria de los puntos, concluyéndose así que no se presentaron errores sistemáticos y que se presentó un buen ajuste.

- De igual manera, el modelo predijo satisfactoriamente los valores de gastos máximos y biomasa de maíz, por lo que se recomienda su uso en otras cuencas para la predicción de estas variables.

- El modelo muestra una alta sensibilidad a la modificación de los valores de la curva numérica CN₂.

- La ventaja de operación del modelo SWAT radica en su interacción con los Sistemas de Información Geográfica y, con ello, el uso de mapas digitales y bases de datos, lo cual hace más fácil el despliegue y análisis de los datos de salida para las posteriores tomas de decisiones.

- La calibración del modelo no representa un aporte científico, pero sí una herramienta de trabajo para la generación del plan de manejo integral de la cuenca El Tejocote, el cual garantizará la sostenibilidad de los recursos de la misma.

LITERATURA CITADA

- Aitken, A.P. 1973. Assessing systematic errors in rainfall-runoff models. *J. Hydrology* 20: 121-136.
- Arnold, J.G., S.L. Neitsch y J.R. Williams. 1991. Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 99.2. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experimental Station. Temple, TX.
- Baker Jr., M.B., J. de D. Benavides-Solorio y E. Talavera-Zuñiga. 1995. Relationship between precipitation and streamflow on El Carrizal watershed, Tapalpa, Jalisco. Partnerships for sustainable forest ecosystem management. General Technical Report RM-GTR-266. Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station. Fort Collins, CO.
- Benavides-Solorio, J. de D. 2001. Post-fire runoff and erosion from simulation rainfall on small plots, Colorado Front Range. *Hydrological Processes* 15: 2931-2952.
- Brooks, K.N., P.F. Folliot, H.M. Gregersen y K.W. Easter. 1991. Watershed management and upland conservation: Policy framework for sustainable development. Daft policy brief. EPAT/MUCIA. College of Natural Resources, University of Minnesota. St. Paul, MN.
- Fernández-Reynoso, D.S. 1999. Aplicación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, estado de México. *Agrociencia* 33: 1-9.
- García, E. 1973. Modificación al sistema de clasificación de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1982. Carta topográfica E-14-A17. Escala 1.50 000. México D.F.
- Maldonado-de León, O.A. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35: 335-345.
- Nash, J.E. y J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10: 282-290.
- Santos, D.V., P.L. Sousa y R.E. Smith. 1996. Model simulation of water and nitrate movement in a level-basin under fertigation treatments. *Agric. Water Manage.* 32: 293-306.
- SRH. Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1973. Orígenes y Alto Lerma. Tomo II. pp. 11-280.1.01 a la 11-280.5.01. *In: Boletín Hidrológico* 50. Región Hidrológica 12 (parcial). Dirección de Hidrología. México, D.F.

NORMAS DRIS PRELIMINARES PARA NOGAL PECANERO

Preliminary DRIS Norms for Pecan Tree

Ma. del Consuelo Medina-Morales¹

RESUMEN

Una de las técnicas más importantes en el diagnóstico nutrimental es el análisis vegetal y como una alternativa para interpretación de estos resultados se ha establecido el Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS). Se desarrollaron normas para nogal pecanero (*Carya illinoensis*) cv. Western con 68 observaciones de análisis foliar de árboles de alto rendimiento. El banco de datos fue de 670 árboles de 66 huertas de tres regiones del norte de México: Comarca Lagunera (Coahuila y Durango), sur de Chihuahua y norte de Coahuila. Las normas DRIS se probaron en dos experimentos en los que se evaluaron la respuesta en rendimiento y la concentración foliar al aplicar fertilizantes. Las normas DRIS constituyen la concentración foliar media y el coeficiente de variación de 45 relaciones entre 10 nutrimentos (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B), que se obtuvieron de una población de alto rendimiento mayor que 60 kg árbol⁻¹. Además, con estas normas se logró predecir el comportamiento de dos experimentos, por lo tanto, éstas pueden utilizarse para realizar diagnósticos nutrimentales en las huertas de nogal pecanero del norte de México.

Palabras clave: *Carya illinoensis*, nutrición foliar, Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación.

SUMMARY

One of the most important techniques in nutritional diagnosis is plant tissue analysis, and DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System) is presented as an alternative for its interpretation. DRIS norms were developed for pecan tree (*Carya illinoensis*) cv. Western with 68 observations from leaf analyses and yield per tree. The databank

¹Campo Experimental La Laguna, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 247, 27000 Torreón, Coahuila, México. (medina.consuelo@inifap.gob.mx)

Recibido: Julio de 2003. Aceptado: Agosto de 2004.
Publicado en Terra Latinoamericana 22: 445-450.

information was taken from 670 trees from 66 orchards in three regions of northern Mexico, Comarca Lagunera (Coahuila and Durango), southern Chihuahua and northern Coahuila. The DRIS norms were tested in two experiments in which yield and foliar nutrient concentration were evaluated when fertilizers were applied. These norms are the mean foliar concentrations and the coefficient of variation of 45 relationships among 10 nutrients (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, and B) of a high yield population (more than 60 kg tree⁻¹). The DRIS norms predicted the results obtained in the field in the two experiments. It is therefore possible to use these norms to diagnose nutrition of pecan tree orchards in the north of Mexico.

Index words: *Carya illinoensis*, foliar nutrition, Diagnosis and Recommendation Integrated System.

INTRODUCCIÓN

El método tradicional para establecer estándares de nutrimentos es el valor crítico, que es la concentración de un nutrimento en el follaje asociado a 90-95% del rendimiento máximo (Ulrich y Hills, 1973). Aunque Dow y Roberts (1982) opinaron que más bien es un intervalo de suficiencia relacionado con el crecimiento del cultivo. Este método tiene las siguientes desventajas: a) no considera la interacción entre nutrimentos ni el balance nutrimental (Sumner y Boswell, 1981); b) los valores críticos se definen para una etapa de muestreo y tejido específicos (Beaufils, 1973); y c) los valores críticos pueden variar con el contenido de humedad en el suelo (Mengel y Kirkby, 1982).

El sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS), desarrollado por Beaufils (1973), clasifica, en orden de importancia, los nutrimentos que requiere la planta, toma en cuenta su interacción, el balance nutrimental y detecta excesos relativos, además puede realizar diagnósticos en cualquier etapa de desarrollo y diferente ubicación de la hoja (Sumner, 1986).

Las normas DRIS son relaciones de nutrimentos que constituyen la media de una población de altos

rendimientos, con los cuales se estiman los índices DRIS, el orden de requerimientos de nutrimentos (ORN) y el índice de desbalance nutrimental (IDN) de una muestra foliar (Walworth y Sumner, 1987). En cerezo dulce, se encontró que árboles con un IDN alto tienen un rendimiento bajo, aunque también puede haber bajo rendimiento con un IDN bajo, situación que, en general, es atribuible a que el problema que reduce el rendimiento no es nutrimental (Davee *et al.*, 1986).

Para desarrollar normas DRIS de un cultivo en una región, se utiliza una muestra representativa de un gran número de sitios elegidos al azar, que pueden ser campos en producción comerciales y/o parcelas experimentales con diferentes condiciones ambientales y de manejo. Se colectan muestras para su análisis y se registra el rendimiento del cultivo (Sumner, 1986). Las normas basadas en un gran banco de datos son probablemente más representativas y mejores, porque abarcan una amplia variabilidad de población (Letzsch, 1984). Las observaciones de análisis foliar y rendimiento obtenidas al azar se dividen en dos subpoblaciones, de bajo y alto rendimiento y que la población de alto rendimiento sea al menos 10% de toda la población (Letzsch y Sumner, 1984).

En algunos frutales, se han desarrollado normas DRIS con el siguiente número de observaciones: naranjo, 3161 (Beverly *et al.*, 1984); piña, 1185 (Angeles *et al.*, 1990); avellano, 624 (Alkoshab *et al.*, 1988); mango, 625 (Schaffer *et al.*, 1988); cerezo dulce, 475 (Davee *et al.*, 1986); manzano, 281 (Parent y Granger, 1989); y nogal pecanero en E.U.A., 3000 (Beverly y Worley, 1992).

El valor límite real usado para dividir los grupos de bajo y alto rendimiento, no es tan crítico, mientras que los datos de alto rendimiento permanezcan distribuidos normalmente (Walworth y Sumner, 1987), ya que el valor de la media o norma DRIS es el mismo. Letzsch y Sumner (1984) indicaron que este valor límite puede elegirse arbitrariamente, pero en la práctica representa, en general, el rendimiento que obtienen rutinariamente los mejores productores. En nogal pecanero con 484 observaciones de análisis foliar y rendimiento, se dividió la población seis veces en dos subpoblaciones, tomando como límite en cada caso los rendimientos: 25, 35, 40, 50, 60 y 70 kg árbol⁻¹ y los resultados indicaron que estos límites no fueron críticos, ya que, aunque los valores de las normas variaron, se logró predecir el comportamiento de dos experimentos (Medina y Medina, 1992a).

El rendimiento medio regional y nacional del nogal pecanero es 1000 kg ha⁻¹ de nuez. El potencial de este cultivo en la Comarca Lagunera indica que las mejores huertas producen 43 kg árbol⁻¹ ó hasta 3000 kg ha⁻¹ (con 70 árboles ha⁻¹) en un año; sin embargo, debido a la alternancia o producción irregular de este frutal, el rendimiento promedio de tres años es de 29 kg árbol⁻¹ ó de 2000 kg ha⁻¹ (Medina *et al.*, 2000).

Walworth *et al.* (1986) compararon las normas DRIS de alfalfa del sureste con 3915 observaciones y del medio oeste de EUA. con 1400 observaciones y encontraron que los valores eran similares, excepto para Mg y B. Escano *et al.* (1981) también compararon dos conjuntos de normas en maíz con 161 y más de 7500 observaciones, los diagnósticos DRIS basados en un conjunto de datos "limitado" (161) fueron bastante comparables a los hechos con las normas basadas en un banco de datos grande. En nogal pecanero, con varios conjuntos de datos para normas DRIS (100, 200, 297, 361 y 484 observaciones), fue posible predecir el comportamiento de dos experimentos y el ORN fue similar (Medina y Medina 1992b). Por lo tanto, si en un experimento se obtiene una respuesta suficiente a un tratamiento nutrimental con respecto a rendimiento y composición de tejido asociada, sería posible usar bancos de datos más pequeños para generar un conjunto de normas de diagnóstico preliminares (Grover y Sumner, 1982).

El objetivo de este trabajo fue desarrollar normas DRIS para nogal pecanero en el norte de México y probar su capacidad predictiva con dos experimentos.

MATERIALES Y MÉTODOS

De 1987 a 1991, se logró acumular, de muestreos y experimentos, un banco de datos de 670 observaciones de análisis foliar y rendimiento de nuez por árbol. Las regiones, el número de observaciones y las huertas fueron: 1) Comarca Lagunera (Coahuila y Durango), 423 en 38 huertas; 2) sur de Chihuahua (Jiménez, Aldama y Delicias), 156 en 18 huertas y 3) norte de Coahuila (Zaragoza y Allende), 91 en 10 huertas. El número de árboles por huerta fue de 9 a 11 en una hectárea y la ubicación fue de 1 a 2 árboles hilera⁻¹. Los árboles fueron del cv. Western, que es el cultivar productor que se planta en la mayoría de las huertas de México, con edades de 10 a 20 años y la mayoría estaban plantados a 12 x 12 m, con una densidad de 70 árboles ha⁻¹.

El muestreo foliar se realizó por un año, colectando 80 folíolos por árbol, seleccionando los dos centrales de una hoja compuesta ubicada en la parte media del brote. La fecha fue del 15 de junio al 31 de julio. Se analizó la concentración de 10 nutrimentos: N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn y B. Los métodos fueron: N con el destilador microkjeldahl, P por el método colorimétrico con molibdato de amonio, B por colorimetría con curcumina, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn por absorción atómica. También se determinó el rendimiento de los árboles.

Las normas DRIS se desarrollaron con las 68 observaciones de análisis foliar y alto rendimiento de nuez por árbol, según la metodología propuesta por Beaufils (1973) y Sumner (1986). El rendimiento límite para separar la población de altos y bajos rendimientos fue de 60 kg árbol⁻¹, porque, al juntar los datos de 670 árboles de tres regiones (Comarca Lagunera, sur de Chihuahua y norte de Coahuila) de 66 huertas, se encontraron árboles con una producción de nuez mayor que 60 kg árbol⁻¹, aunque en la Comarca Lagunera, en un estudio posterior realizado por Medina *et al.* (2000), se encontró un máximo de 43 kg árbol⁻¹ en 17 huertas diferentes a las del presente estudio. Además, en nogal pecanero se generaron normas DRIS con diferente límite de rendimiento (25, 35, 40, 50, 60 y 70 kg árbol⁻¹) para separar las dos subpoblaciones y, aunque las normas variaron un poco, se confirmó la validez de los seis conjuntos de normas, ya que predijeron el comportamiento de dos experimentos (Medina y Medina, 1992a). Esto confirma que este valor límite de rendimiento no es tan crítico, como también lo indicaron Walworth y Sumner (1987). En este estudio, resultaron 68 árboles con alto rendimiento que son 10.14%, como lo sugirieron Letzsch y Sumner (1984). En cada población, se calcularon la media, desviación estándar (DS), la varianza (S^2) y el coeficiente de variación (CV) de: P (%), N(%), N/P, P/N, etc. Se obtuvo la relación de varianza entre la población de bajos y altos rendimientos de cada expresión nutrimental (N/P, P/N, N.P, etc.).

Para la selección de las normas DRIS, se consideró la variación en concentración nutrimental con la edad de la hoja, como lo sugirió Sumner (1986). En nogal pecanero, N, P, K, Zn y Cu disminuyen y Ca, Mg, Fe y Mn aumentan con la edad de la hoja, como lo describió Medina (1991). Si ambas concentraciones de nutrimentos disminuyen o aumentan con la edad, se usaron cocientes (ejemplo:

N/P, Ca/Mg); pero si divergen, se usaron productos (ejemplo: N·Ca). Los 21 cocientes se seleccionaron así, ejemplo: de N/P y P/N, se escogió la expresión que tenía la relación de varianza mayor (Letzsch, 1985). En ambos casos (productos y cocientes), la media y el coeficiente de variación de la población de altos rendimientos fueron usados como norma de referencia. Para el cálculo de las normas, se utilizó un programa de computadora en lenguaje Fortran, elaborado por Letzsch (1985) y generalizado como se describió en Medina (1991).

Con las normas DRIS, se calcularon los índices DRIS y el orden de requerimiento nutrimental (ORN). Un índice DRIS es la media de las funciones de todas las relaciones que contienen el nutrimento, el cual está balanceado cuando su valor es cero (Walworth y Sumner, 1987). En el cálculo de las funciones, si el nutrimento que se calcula está en el numerador, se le da el signo positivo, pero si está en el denominador, se le da el signo negativo. En una muestra foliar, la suma de los índices positivos y negativos debe ser cero, cuando se usan sólo cocientes como normas. Ordenando los índices del menor al mayor, se obtiene el ORN. El IDN se obtuvo sumando los valores absolutos de los índices de todos los nutrimentos de la muestra.

Cuando se usaron productos como normas en lugar de cocientes, Sumner (1986) indicó que se debe hacer el siguiente cálculo, por ejemplo: N·Ca es igual a N(1/Ca) y 1/Ca es redefinido como un nuevo nutrimento (X) que es el recíproco de Ca; por lo tanto, se procede a calcular los índices usando N/X como el cociente, tanto para la muestra, como para la norma. Una vez que se calcula el índice de X, se cambia el signo y entonces se tiene el índice de Ca, por ejemplo: si X = -6, el índice de Ca será 6. De esta manera, los índices positivos y negativos ya no suman cero, pero aún así reflejan un balance relativo. El cálculo de los índices DRIS se realizó con un programa de computadora en lenguaje Basic, como se describió en Medina (1991), y que simplifica los cálculos cuando se utilizan productos.

Para evaluar la capacidad predictiva de las normas DRIS para realizar diagnósticos nutrimentales, Sumner (1986) indicó que deben probarse con experimentos donde hubo respuesta en rendimiento al aplicar nutrimentos y estas normas deben predecir su comportamiento. Para cumplir con este requisito, las normas DRIS se probaron con dos experimentos. El primero fue aplicación de N-P-K al suelo, realizado por Worley (1974) en Georgia, EUA. Se utilizó este

experimento porque, en México, no había estudios de fertilización con respuesta a rendimiento de nuez con la aplicación de N-P-K, éste se realizó durante 10 años (1962 a 1971) y hubo respuesta hasta el octavo año, que es el que se analizó, y el décimo año con el Tratamiento 45-20-37. El segundo experimento fue con aplicación foliar de manganeso, realizada por Medina *et al.* (1999), en Zaragoza, Coahuila, México.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las normas DRIS con 68 observaciones de alto rendimiento de tres regiones de México se muestran en el Cuadro 1. Estos son los valores de referencia que servirán para calcular los índices DRIS, el ORN y el IDN de una muestra foliar. Resultaron 45 relaciones de nutrimentos: 24 productos y 21 cocientes.

La concentración foliar media y el coeficiente de variación de los 10 nutrimentos con los que se desarrollaron las normas DRIS, se muestran en el Cuadro 2, con excepción de N, P y Mg, los demás nutrimentos tuvieron coeficientes de variación altos (> 20%), esto se debe a la variabilidad en la concentración nutrimental entre las 66 huertas y las tres regiones evaluadas.

Con las normas DRIS del norte de México, se calcularon los índices DRIS y el IDN de la concentración foliar del experimento realizado en Georgia, EUA con N-P-K (Cuadro 3). El testigo sin aplicación de fertilizantes indica que los más requeridos en el ORN son el Mg y el Ca y esto es lógico porque los suelos son ácidos en Georgia, EUA y le siguen el N y el K, y los que están en suficiencia o exceso relativo son P y Mn. Al aplicar el

Cuadro 2. Concentración foliar media y coeficiente de variación de los nutrimentos utilizados para las normas DRIS en nogal pecanero cv. Western.

Nutrimento	Concentración media	Coefficiente de variación
		%
N (%)	2.30	12.00
P	0.13	15.15
K	1.11	176.58
Ca	1.93	33.32
Mg	0.40	18.50
Fe (mg kg ⁻¹)	125	34.78
Mn	108	53.11
Zn	65	52.62
Cu	8	30.00
B	94	38.94

Tratamiento 2 (22-10-19), el índice de K cambia de -4 a -2 y el de N de -8 a -6; el rendimiento de nuez se mantiene igual y el IDN cambia de 102 a 90. Con el Tratamiento 3 (45-20-37), el índice de K cambia a 3 y

Cuadro 1. Valores de referencia o normas usadas para el cálculo de los índices DRIS, en nogal pecanero cv. Western.

Expresión nutrimentos [†]	Norma [‡] media	CV [§]
		%
K/P	8.58	31.16
P.Ca	0.25	40.08
P.Mg	0.05	23.34
P.Fe	16.66	38.34
P.Mn	14.85	62.74
Zn/P	512.45	55.45
Cu/P	62.71	31.26
B/P	707.35	34.82
N/P	17.77	16.38
K.Ca	2.03	31.93
K.Mg	0.45	38.88
K.Fe	147.17	58.00
K.Mn	120.50	59.42
K/Zn	0.02	52.35
Cu/K	7.86	42.22
B/K	96.86	63.76
K/N	0.48	31.72
Mg/Ca	0.22	31.55
Fe/Ca	71.12	43.03
Mn/Ca	58.84	46.82
Ca.Zn	123.08	53.61
Ca.Cu	15.24	36.51
Ca.B	182.44	53.86
Ca.N	4.41	32.36
Fe/Mg	321.57	36.37
Mn/Mg	284.09	60.89
Mg.Zn	26.99	62.93
Mg.Cu	3.30	38.09
Mg.B	38.23	49.54
Mg.N	0.92	21.52
Mn/Fe	0.90	58.13
Fe.Zn	8765.57	90.02
Fe.Cu	1049.08	56.26
Fe.B	12124.08	66.40
Fe.N	291.54	38.98
Mn.Zn	6851.10	70.27
Mn.Cu	887.42	59.57
Mn.B	10712.38	71.63
Mn.N	252.97	55.65
Cu/Zn	0.14	43.10
B/Zn	1.78	67.25
N/Zn	0.04	45.58
B/Cu	12.69	54.27
N/Cu	0.31	38.11
B/N	40.75	37.52

[†] Macronutrimentos expresados en % y micronutrimentos en mg kg⁻¹, con base en peso seco. [‡] Basadas en la población de altos rendimientos: > 60 kg árbol⁻¹. [§] CV = coeficiente de variación.

Cuadro 3. Índices DRIS, índice de desbalance nutrimental (IDN) y orden de requerimiento nutrimental (ORN), en un experimento con aplicación de N-P-K en nogal pecanero cv. Stuart .

Nº	Tratamiento			Nutrimentos						Rendimiento	IDN	Orden de requerimiento nutrimental
	N	P	K	N	P	K	Ca	Mg	Mn			
-- kg ha ⁻¹ --			g kg ⁻¹ --						kg árbol ⁻¹			
1	0	0	0	2.09 [†] -8 [‡]	0.17 16	0.99 -4	1.47 -15	0.28 -20	312 40	55 a	102	Mg>Ca>N>K>P>Mn
2	22	10	19	2.11 -6	0.17 16	1.01 -2	1.48 -15	0.31 -14	300 37	54 a	90	Ca>Mg>N>K>P>Mn
3	45	20	37	2.12 -4	0.18 21	1.11 3	1.62 -12	0.36 -8	318 38	79 b	86	Ca>Mg>N>K>P>Mn
4	90	39	74	2.26 -2	0.17 16	1.21 6	1.43 -19	0.28 -21	397 59	65 b	123	Mg>Ca>N>K>P>Mn
5	134	59	112	2.18 -4	0.18 22	1.20 9	1.62 -16	0.22 -43	511 85	66 ab	178	Mg>Ca>N>K>P>Mn

[†] Concentración foliar. [‡] Índice DRIS. Los tratamientos con la misma letra en columna son estadísticamente iguales. Duncan, P < 0.05.

el de N a -4, lo que indica respuesta a estos dos nutrimentos, el rendimiento aumenta a 79 kg árbol⁻¹, es el mayor de los cinco tratamientos y diferente en forma significativa al testigo con 50 kg árbol⁻¹ y al Tratamiento 2 con 54 kg árbol⁻¹. El IDN cambia a 86 y es el menor de los cinco tratamientos. El Tratamiento 3 fue el mejor, porque se incrementaron la concentración foliar de K y el rendimiento y se redujo el IDN; esto coincide con Sumner (1986), quien indicó que al probar las normas DRIS deben detectar los mejores tratamientos de fertilización para lograr una respuesta significativa en rendimiento.

Con el Tratamiento 3 también cambian los índices de Mg de -20 a -8; sin embargo, con los Tratamientos 4 (90-39-74) y 5 (139-59-112), se hace más negativo o deficiente (-43) y el K ya está en suficiencia, lo que coincide con Emmert (1961), quien señaló que, en algunos frutales, al aumentar el K, se disminuye el Mg. Los Tratamientos 4 y 5 no son los adecuados, ya que incrementan el IDN y disminuyen el rendimiento.

El IDN aumenta porque el Mn está disponible en grandes cantidades y aumenta con los Tratamientos 4 y 5 y, como también se está aumentando la fertilización con P, es probable que ocurra lo que indicaron Bingham y Garber (1960), que la disponibilidad de Mn (suficiencia o exceso) se incrementa con la fertilización con P.

Al probar las normas DRIS con el experimento de Mn aplicado foliarmente (cuatro veces), se observa que el testigo indicó al Mn como el más requerido en el ORN (Cuadro 4). Al aplicar el Tratamiento 2 (1000 mg kg⁻¹), la concentración subió de 33 a 148 mg kg⁻¹ y el índice DRIS cambió de -43 a 4, lo que indica suficiencia; el rendimiento fue el mayor en forma significativa y el IDN el menor, el Mn cambió del primer al último lugar en el ORN. Este fue el mejor tratamiento, porque se incrementaron la concentración de Mn y el rendimiento de nuez por árbol, además el IDN fue el menor de los tres tratamientos, como lo señaló Sumner (1986). Con el Tratamiento 3 (2000 mg kg⁻¹), aunque se incrementó la concentración de

Cuadro 4. Índices DRIS, Índice de Desbalance Nutrimental (IDN) y Orden de Requerimiento Nutrimental en un experimento con aplicaciones de Manganese, en nogal pecanero cv. Western.

Mn	Nutrimentos										Rendimiento	IDN	Orden de requerimiento nutrimental
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B			
mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹										kg árbol ⁻¹		
0	2.2 [†] -5 [‡]	0.10 -15	1.2 1	2.3 12	0.43 5	97 -6	33 b -43	57 -4	7 -8	103 -1	20.3 c	99	Mn>P>Cu>Fe>N>Zn>B>K>Mg>Ca
1000	2.2 2	0.09 -12	1.1 3	1.9 -3	0.43 -1	98 -11	148 a 4	52 -1	6 -6	101 4	28.5 a	47	P>Fe>Cu>Ca>Mg>Zn>N>K>B>Mn
2000	2.3 3	0.10 -9	1.1 2	1.6 -8	0.43 -1	90 -13	165 a 8	48 -3	6 -7	91 1	22.5 b	53	Fe>P>Ca>Cu>Zn>Mg>B>K>N>Mn

[†] Concentración foliar. [‡] Índice DRIS. Los tratamientos con la misma letra en columna son estadísticamente iguales. Duncan, P < 0.05.

Mn, el rendimiento disminuyó porque aumentó el IDN.

Los resultados de los dos experimentos anteriores indicaron que, al aplicarles las normas DRIS del norte de México, se logró identificar el mejor tratamiento para un alto rendimiento de nuez y un bajo IDN.

CONCLUSIONES

- Las normas DRIS para nogal pecanero constituyen la concentración foliar media y el coeficiente de variación de 45 relaciones entre 10 nutrimentos (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B), obtenidas de 68 observaciones de alto rendimiento mayor que 60 kg árbol⁻¹.

- Con las normas DRIS para nogal pecanero generadas en México, se logró predecir el comportamiento de dos experimentos en los que hubo respuesta en la concentración foliar y el rendimiento de nuez.

- Por lo tanto, estas normas se pueden utilizar para realizar diagnósticos nutrimentales en las huertas de nogal pecanero del norte de México.

LITERATURA CITADA

- Alkoshab, O., T.L. Righetti y A.R. Dixon. 1988. Evaluation of DRIS for judging the nutritional status of hazelnuts. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 113: 643-647.
- Angeles, D.S., M.E. Sumner y N.W. Barbour. 1990. Preliminary nitrogen, phosphorus and potassium DRIS norms for pineapple. *HortScience* 25: 652-655.
- Beaufils, E.R. 1973. Diagnosis and Recommendation Integrated System. (DRIS). A general scheme for experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. *Soil Science Bulletin* 1. University of Natal. Pietermaritzburg, South Africa.
- Beverly, R.B. y R.E. Worley. 1992. Preliminary DRIS diagnostic norms for pecan. *HortScience* 27: 271.
- Beverly, R.B., J.C. Stark, J.C. Ojala y T.W. Embleton. 1984. Nutrient diagnosis of 'Valencia' oranges by Dris. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 109: 649-654.
- Bingham, F.T. y M.J. Garber. 1960. Solubility and availability of micronutrients in relation to phosphorus fertilization. *Soil Sci. Proc.* 24: 209-213.
- Davee, D.E., T.L. Righetti, E. Fallahi y S. Robbins. 1986. An evaluation of the Dris approach for identifying mineral limitations on yield in 'Napolean' sweet cherry. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 11: 988-993.
- Dow, A.I. y S. Roberts. 1982. Proposal: Critical nutrients ranges for crops diagnosis. *Agron. J.* 74: 401-403.
- Emmert, F.H. 1961. The bearing of ion interactions on tissue analysis results. pp. 231-243. *In: Reuther, W. (ed.). Plant analysis and fertilizer problems.* Publication 8. American Institute of Biological Sciences. Washington, DC.
- Escano, C.R., C.A. Jones y G. Vehara. 1981. Nutrient diagnosis II. Comparison of two systems of tissue diagnosis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 1140-1144.
- Grover, J.H. y M.E. Sumner. 1982. Yield and leaf composition of sunflower in relation to N, P, K and lime treatments. *Fert. Res.* 3: 367-378.
- Letzsch, W.S. 1984. Standardized Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) data banks. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15: 841-848.
- Letzsch, W.S. 1985. Compute program for selection of norms for use in the diagnosis and recommendation integrated system. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 16: 339-347.
- Letzsch, W.S. y M.E. Sumner. 1984. Effect of population size and yield level in selection of diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) norms. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15: 997-1006.
- Medina-Morales, M.D.C. 1991. Desarrollo de normas DRIS para nogal pecanero en la Comarca Lagunera. *Terra* 9: 69-78.
- Medina-Morales, M.D.C. y E.D.J. Medina-Moreno. 1992a. Límite de rendimiento para dividir las dos subpoblaciones de las normas DRIS, para nogal pecanero. *Terra* 10: 193-200.
- Medina-Morales, M.D.C. y E.D.J. Medina-Moreno. 1992b. Evaluación de ocho conjuntos de normas DRIS para nogal pecanero. *Terra* 10: 23-32.
- Medina-Morales, M.D.C., E.D.J. Medina-Moreno, J.H. Aguilar-Pérez y S.J. García-Garza. 1999. Aspersiones foliares de manganeso y cobre en nogal pecanero. *Terra* 17: 317-323.
- Medina-Morales, M.D.C., J.A. Samaniego-Gaxiola, J. Santamaria-César, R. Faz-Contreras, T. Herrera-Pérez, M. Ramírez-Delgado y G. González-Cervantes. 2000. Alternancia en la producción del nogal pecanero, en la Comarca Lagunera de México. *Información Técnica Económica Agraria (ITEA)*. 96V: 132-138. Zaragoza, España.
- Mengel, K. y E.A. Kirkby. 1982. Principles of plant nutrition. 3rd ed. International Potash Institute. Bern, Switzerland.
- Parent, L.E. y L. Granger. 1989. Derivation of DRIS norms from a high-density apple orchard established in the Quebec Appalachian mountains. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 114: 915-919.
- Schaffer, B., K.D. Larson, G.H. Snyder y Ch.A. Sánchez. 1988. Identification of mineral deficiencies associated with mango decline by DRIS. *HortScience* 23: 617-619.
- Sumner, M.E. 1986. The Diagnosis and recommendations integrated system (DRIS) as a guide to orchard fertilization. Extension bulletin 231. Food and Fertilizer Technology Center. Taipei City, Taiwan, Republic of China.
- Sumner, M.E. y F.C. Boswell. 1981. Alleviating nutrient stress. pp. 99-137. *In: Arkin, G.F. y H.M. Taylor (eds.). Modifying the root environment to reduce crop stress.* Monograph 4. American Society of Agricultural Engineers. Madison, WI.
- Ulrich, A. y F.J. Hills. 1973. Plant analysis as an aid in fertilizing sugar crops. Part 1. Sugarbeets. pp. 271-288. *In: Walsh, L.M. y J.D. Beaton (eds.). Soil testing and plant analysis.* Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Walworth, J.L. y M.E. Sumner. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Adv. Soil Sci.* 6: 149-188.
- Walworth, J.L., M.E. Sumner, R.A. Issac y C.O. Plank. 1986. Preliminary DRIS norms for alfalfa in the southeastern united states and a comparison with Midwestern norms. *Agron. J.* 78: 1046-1052.
- Worley, R.E. 1974. Effect of N, P, K, and lime on yield, nut quality, tree growth and leaf analysis of pecan (*Carya illinoensis* W.). *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 99: 49-57.

USO DE TECNOLOGÍA PARA EL MEJORAMIENTO DEL SUELO: ESTUDIO PSICOSOCIAL

Use of Technology for Soil Improvement: Psychosocial Study

Luis Alipio Guillén-Pérez¹, Concepción Sánchez-Quintanar^{2†} y Serafín Mercado-Doménech³

RESUMEN

En este trabajo, se emplea un enfoque psicosocial para identificar las atribuciones causales que los agricultores, asesores técnicos e investigadores agrícolas dan al hecho de que los primeros que siembran maíz (*Zea mays* L.) no empleen las recomendaciones técnicas para el mejoramiento del suelo. La investigación se realizó durante 1999 en el valle de Toluca, México; los entrevistados corresponden a una muestra de 45 agricultores, 21 asesores técnicos y siete investigadores especialistas en el cultivo. La entrevista se realizó a través de preguntas abiertas. Para el análisis de la información, se empleó una combinación de métodos cualitativos y cuantitativos. En los primeros, se identificaron y clasificaron las categorías de respuestas por grupo de individuos. En el análisis cuantitativo, se utilizó la estadística de identificación de cúmulos por escalamiento multidimensional porque permite jerarquizar y relacionar las categorías detectadas en cada grupo de participantes. Resultados: 1) Seis son las causas por las cuales los agricultores no usan la tecnología recomendada para el mejoramiento del suelo: factor económico, desconocimiento, falta de apoyo del Gobierno, poco acceso a la tecnología recomendada, desinterés del agricultor y consideraciones técnicas. 2) De éstas, dos son centrales, dos importantes y dos se eliminaron. 3) Se obtuvo una jerarquía de respuestas de acuerdo con su importancia, por cada actor social (agricultores, asesores técnicos e investigadores). 4) Comprensión de la Interacción entre las causas. La aplicación de esta investigación está en función

de la coordinación de recursos entre actores sociales involucrados en el proceso de transferencia de tecnología y retroalimentación de información para orientar programas de investigación y asistencia técnica.

Palabras clave: Análisis cualitativo, escalonamiento multidimensional, transferencia de tecnología, atribuciones causales, actores sociales, *Zea mays* L.

SUMMARY

In this work a psychosocial focus is used to identify the reasons that farmers, agricultural extension agents, and agricultural researchers attribute to the fact that farmers who cultivate maize (*Zea mays* L.) do not use the technical recommendations for soil improvement. The study was conducted during 1999 in the Valley of Toluca, Mexico. A sample of 45 farmers, 21 extension agents, and seven researchers specialized in maize production were interviewed. The interview was carried out through open questions. For the analysis of the information, a combination of qualitative and quantitative methods was used. For the qualitative analysis, the categories of answers per group were identified and classified. In the quantitative analysis the statistical method of identification of heaps by multidimensional scaling was used, because it allows the categories detected in each group of participants to be hierarchized and related. It was found that there are six causes for which the farmers do not use the technology recommended for soil improvement: economic factor, ignorance, lack of government support, little access to the recommended technology, farmer's indifference and technical considerations. Of these, two are central, two important, and two were eliminated. A hierarchy of the answers in order of importance was obtained for each social actor (farmers, agricultural extension agents, and agricultural researchers). Comprehension of the interaction among causes was also achieved. The application of this investigation are in function of 1) coordination of resources among social actors

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas-Venezuela. CIAE-Lara. El Cují, km 7 carretera Barquisimeto-Duaca. Apartado 592, Barquisimeto, Estado Lara, Venezuela.

² Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

[†] Autor responsable (csq@colpos.colpos.mx)

³ Facultad de Psicología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

involved in the process of the transfer of technology and 2) feedback of information to guide investigation programs and technical attendance.

Index words: Qualitative analysis, multidimensional scaling, technology transference, causal attributions, social actors, Zea mays L.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de tecnología para el mejoramiento del suelo en el Distrito de Desarrollo Rural Toluca del estado de México se justifica porque: 1) de acuerdo con la información del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 1998), la mayoría de los suelos presentan pH de fuerte a moderadamente ácido; 2) para atender el problema, la Secretaría de Desarrollo Agropecuario (SEDAGRO) sostiene un Programa de Mejoramiento de Suelo; 3) en la exploración de campo, realizada para esta investigación, se detectó que los agricultores no aplican la tecnología recomendada. Por ello, la intención de este trabajo es comprender las causas del problema anterior, desde un enfoque diferente a la visión técnico-económica de la transferencia de tecnología agrícola que ha predominado en América Latina, sin causar el impacto esperado (Castillo, 1991). El enfoque que se propone es una perspectiva centrada en los actores que, aunada a los enfoques tradicionales, permitiría una visión más completa del problema. Su base teórica es la corriente cognoscitiva de la Psicología Social, que explica el comportamiento humano a partir de los procesos del conocimiento individual, implicados y articulados a los procesos de interacción e influencia social (Lindgren, 1972; Hollander, 1976; Martín-Baró, 1985; Morales y Moya, 1996). En especial se empleó la teoría de la Atribución Causal.

La atribución causal (AC) es un tipo de razonamiento que permite a las personas explicarse las circunstancias de los hechos que ocurren en su entorno inmediato o mediato y que repercuten en sus comportamientos e interacciones. Las principales contribuciones teóricas en este campo corresponden a Heider (1958), para quien la AC es el proceso a través del cual una persona encuentra sentido a las acciones de otra persona; Jones y Davis (1965) proporcionaron explicaciones sistemáticas de las inferencias que hace un observador sobre lo que un actor intenta lograr con una acción determinada; las teorías de la "Covarianza" de Kelley (1967) atribuyen un efecto a

una condición que está presente cuando el efecto también lo está, y que está ausente cuando también lo está el efecto; Weiner *et al.* (1972) consideraron a las atribuciones en un contexto relacionado con una tarea y las explicaciones que las personas dan al éxito o al fracaso de la misma. Este autor consideró en las atribuciones causales tres dimensiones, de acuerdo con su función: 1) por su naturaleza temporal, pueden ser estables o inestables; 2) de acuerdo con el lugar de control, internas o externas; y 3) por su capacidad de influir en un acontecimiento, controlables o incontrolables (Weiner, 1985).

Hasta finales de la década de los ochentas, el enfoque de la atribución causal tuvo un contexto individual, pero el avance e interés por la comprensión de los contenidos sociales producidos y prevalentes en las sociedades, permitió un avance más social, examinando el origen cultural de las explicaciones, su naturaleza colectiva y las funciones sociales que cumplen (Jaspars y Hewstone, 1993). Esta posición permite entender que una persona atribuye el comportamiento de otra, no sólo con base en sus características individuales, sino que en la explicación también influyen las características asociadas al grupo al que pertenece.

Por todo lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo identificar y analizar las atribuciones causales que consideran los agricultores, asesores técnicos e investigadores agrícolas, con respecto al hecho de que los agricultores no usan la tecnología recomendada para el mejoramiento del suelo. La hipótesis establece que agricultores, asesores técnicos e investigadores tienen distintas atribuciones causales, con relación a las acciones tecnológicas recomendadas para el mejoramiento del suelo en la siembra del maíz, situación que lleva a que cada uno de ellos tome decisiones diferentes con respecto al uso de la tecnología en cuestión. La comprobación de la hipótesis se basó en las siguientes posiciones técnicas y conceptuales:

1) Las recomendaciones del Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal del Estado de México (ICAMEX) para el mejoramiento del suelo, cuyo pH es menor que 5.4 en la zona de estudio, son: aplicar caliza molida, calcita, cal viva o cal hidratada en dosis de 2 t ha⁻¹, 30 días antes de la siembra. 2) La conducta social, de acuerdo con Morales y Moya (1996), es un flujo continuado de interacciones que, aplicado al proceso de la transferencia y adopción de tecnología, permite identificar los componentes psicológicos y sociales de

las interacciones entre los tipos de actores sociales, conducta social que se manifiesta como un conjunto de decisiones respecto de usar o no la tecnología en cuestión. 3) La AC es un proceso cognoscitivo, es decir, un tipo de razonamiento que permite a las personas explicarse las causas o circunstancias de los hechos que ocurren en su entorno inmediato o mediato (Hewstone, 1992).

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar y Sujetos de Estudio

Esta investigación se realizó en el municipio Almoloya de Juárez del valle de Toluca, estado de México. Se eligieron dos módulos de los 14 que asiste el Programa Elemental de Asistencia Técnica (PEAT). Los criterios para la selección de los módulos fueron: 1) mayor potencial productivo; 2) residencia de los agricultores en las áreas de producción; y 3) áreas de influencia prioritaria de las instituciones de investigación. En total, se trabajó con 73 sujetos: 45 agricultores, que corresponden a 35% del universo estudiado; 21 asesores técnicos (ingenieros agrónomos) adscritos al PEAT y siete investigadores especialistas en el cultivo del maíz: tres del INIFAP y cuatro del ICAMEX, que corresponden a 100% de los asesores técnicos e investigadores adscritos a la zona de estudio.

Procedimiento

Seguimiento técnico económico. Se realizaron visitas sistemáticas a las unidades de producción, por un periodo de cinco meses, para registrar las actividades tecnológicas, como las realizan los agricultores, a lo largo del ciclo de maíz primera-verano 1999.

Entrevista individual. Se entrevistó a cada uno de los sujetos elegidos, con la modalidad de entrevista de preguntas abiertas relacionadas con las causas o razones por las cuales los agricultores no usan la tecnología recomendada para el mejoramiento del suelo. Las entrevistas se realizaron en las unidades de producción, en las oficinas de la Delegación I de SEDAGRO y en la sede de las instituciones que realizan investigación en la región.

Análisis cualitativo. 1) Las entrevistas se transcribieron textualmente y la información de cada grupo se conservó por separado para analizar sus explicaciones. 2) Se empleó la técnica análisis de contenido que implica definir operativamente los tipos

de respuestas que los sujetos proporcionaron en la entrevista, con ello se identificaron las categorías naturales de las causas que cada grupo expresó. 3) En cada categoría, se identificaron las dimensiones de las atribuciones de acuerdo con la clasificación de Weiner (1985).

Análisis cuantitativo. 1) Se obtuvieron las frecuencias de respuestas por cada categoría; 2) éstas permitieron organizar las categorías por rango, de mayor a menor, para obtener una escala de respuestas por grupo; 3) el grado de influencia de cada una de las categorías de explicaciones causales identificadas y la forma en que se relacionan entre sí, las proporcionó la técnica estadística de Identificación de Cúmulos por Escalonamiento Multidimensional (Arce, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Seguimiento Técnico

De acuerdo con la información recabada en el seguimiento técnico, ninguno de los agricultores utilizaba la tecnología recomendada para el mejoramiento del suelo.

Análisis Cualitativo de Causas

Se identificaron seis categorías de explicaciones por las que los agricultores no usan la tecnología recomendada. En el Cuadro 1, se presentan las seis, su definición operativa y las dimensiones (estabilidad, lugar de control y posibilidad de control) de las causas que las integran.

Análisis Cuantitativo de Causas

El análisis cuantitativo se inició al obtener las frecuencias de las causas que constituyeron cada categoría, las cuales, al ordenarse de mayor a menor, proporcionaron una escala de respuestas por cada grupo entrevistado (Figura 1).

Escala de respuestas de los agricultores. Este grupo señaló como causas principales las contenidas en la categoría Factor económico (FE), ejemplo: "*Cuesta dinero que en realidad no lo tenemos... el flete nos sale muy caro y la verdad que el maíz no es redituable para gastar en esas cosas... la situación está muy difícil para gastar más de la cuenta.*" En segundo lugar ubicaron a la categoría Desconocimiento (DTO): "*No es necesario y no sabemos para qué sirve todo eso... por desconocimiento, uno no sabe a ciencia*

Cuadro 1. Definición operativa de categorías de atribuciones causales.

Categoría	Código	Definición
Factor económico	FE	Se refiere a todas las consideraciones relacionadas con el precio y costo del flete de los productos recomendados (caliza molida, calcita, cal viva o cal hidratada), así como a la descapitalización del agricultor y al bajo precio de venta del maíz. <i>Dimensiones: inestable, externa e incontrolable.</i>
Desconocimiento	DTO	Manifestación de no saber para qué sirven los productos recomendados y qué efectos tienen, así como a la falta de información, asesoramiento o capacitación al respecto. <i>Dimensiones: inestable, interna y controlable.</i>
Falta de apoyo del Gobierno	FAG	Se refiere a la falta de créditos y a que los programas del Gobierno llegan al campo fuera de tiempo. <i>Dimensiones: inestable, externa e incontrolable.</i>
Poco acceso a la tecnología recomendada	PATR	Se entiende como la dificultad que tienen los agricultores para obtener o aplicar los productos recomendados. <i>Dimensiones: inestable, externa e incontrolable.</i>
Desinterés del agricultor	DA	Manifestación de desinterés del agricultor por adquirir o aplicar los productos recomendados; es decir, no siente la necesidad ni la importancia de aplicarlos. <i>Dimensiones: inestable, interna y controlable.</i>
Consideraciones técnicas	CT	Se entiende como la poca respuesta del suelo al encalado. (Categoría dada sólo por los investigadores. No se asignaron dimensiones.)

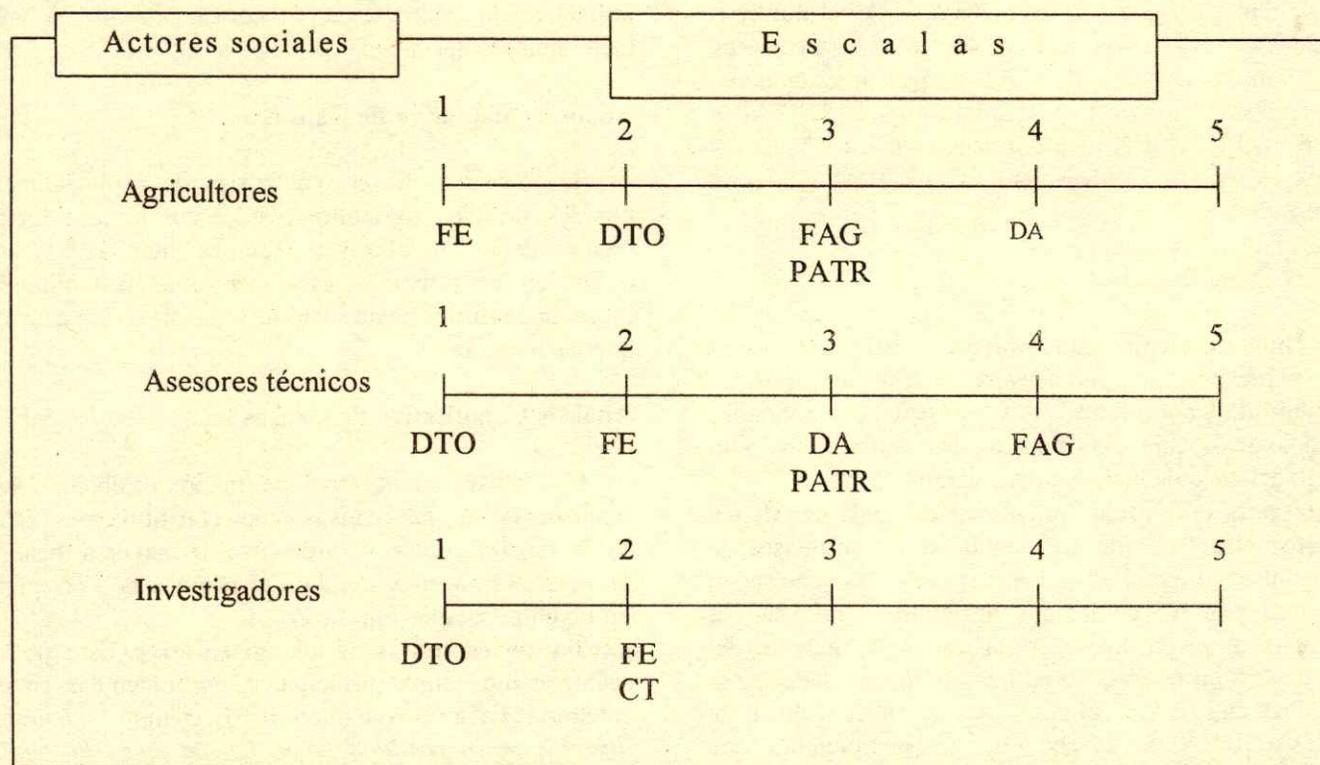


Figura 1. Escalas de categorías causales encontradas con relación a las causas por las cuales los agricultores no usan la tecnología recomendada para el mejoramiento del suelo. Ellas son: Factor económico (FE), Desconocimiento (DTO), Falta de apoyo del Gobierno (FAG), Poco acceso a la tecnología recomendada (PATR), Desinterés del agricultor (DA), Consideraciones técnicas (CT).

para qué sirve la tecnología, la cal, ni en qué tiempo se aplica... la cal se usa para el gusano, para matar toda clase de insectos, y la verdad no aplicamos porque no hay muchos insectos... lo que pasa es que supuestamente quema los nutrientes que tiene la tierra... por falta de información y asesoramiento."

Hay dos categorías en el tercer lugar, Falta de apoyo del Gobierno (FAG): *"El Gobierno no da crédito para eso... necesitamos del apoyo del Gobierno, porque la cal no la sacamos de nuestra producción como el estiércol... el Gobierno nos promete darnos esas toneladas de cal y nunca lo hace... porque los programas de Gobierno nos llegan fuera de tiempo,"* y Poco acceso a la tecnología recomendada (PATR): *"A mi se me hace muy difícil porque no tenemos con qué aplicarla y la verdad como que a mano se me hace muy dificultoso... es un trabajo muy fuerte... es incómodo... porque a veces no la tenemos al alcance, por eso usamos mejor el estiércol."* En cuarto lugar está Desinterés del agricultor (DA): *"Por la dejadez de uno... el Gobierno nos ha apoyado con el subsidio de la cal, lo que pasa es que no hemos hecho caso de ir por ella... porque aquí aplicamos el estiércol y creo que no es necesario la cal"*.

Escala de respuestas de los asesores técnicos. La categoría más importante para este grupo es DTO: *"... la mayor parte de la gente desconoce los beneficios de la cal... algunos no saben ni qué es el pH..., ellos piensan que con la cal van a quemar la semilla o van a dañar el suelo... la mayoría piensan que es para controlar insectos... hace falta más promoción y en ese tipo de programas de mejoramiento de suelo hace falta mucha información... falta de capacitación."* En segundo lugar FE: *"Los productores quieren reducir costos en lo que más puedan... piensan que elevaría más el costo-beneficio... por el costo de transporte hasta sus parcelas... principalmente por el factor económico y el costo de aplicación es alto."* En tercer lugar DA: *"A la gente no le gusta el cambio, no ven la necesidad de aplicar cal a la tierra y no le dan la importancia debida... al agricultor no se le hace indispensable para su cultivo",* y PATR: *"Porque no tienen el equipo adecuado... en la zona no existe el producto suficiente."* La categoría menos importante FAG: *"Se requiere de un apoyo de parte del Gobierno para que a la gente le interese... porque el Gobierno ofrece este programa fuera de tiempo, mucho después de la siembra."*

Escala de respuestas de los investigadores. Las principales causas para este grupo son DTO: *"Por desconocimiento básicamente... no saben qué tipo de*

pH tienen los suelos, no se hace análisis de suelos en las parcelas... falta de conocimientos de qué es el pH y qué ayuda puede traer la cal en los cultivos... falta de información, por no haber difusión que haga conciencia en el agricultor... tal vez le falte la asistencia técnica que les oriente a corregir la acidez del suelo para mejorar rendimientos." En segundo lugar FE y CT: *"Podría ser lo económico, les cuesta más y si ellos no ven un ingreso extra no lo hacen."* En CT: *"Porque el pH del suelo no es tan ácido como para tener una respuesta al encalado"*.

Análisis de las escalas de respuestas. En conjunto, las tres escalas (Figura 1) expresan coincidencias y diferencias entre los tres grupos entrevistados:

1) Los tres actores sociales coincidieron en que el DTO y FE son las dos principales causas por las cuales los agricultores no aplican la tecnología recomendada. Hablando estrictamente, la ubicación de esas dos categorías en la escala de los asesores y la de los investigadores es la misma (primer y segundo lugar), en escala de los agricultores fue a la inversa (FE y DTO). Para los investigadores hay dos categorías en segundo lugar (FE y CT) y fueron los únicos que consideraron la categoría de conocimientos técnicos.

2) Los procesos de explicaciones de los agricultores y los asesores técnicos contienen las mismas categorías, pero el orden de importancia fue diferente, a excepción de la atribución PATR que ocupa el tercer lugar en ambas escalas. Para los agricultores, las causas menos importantes son las contenidas en DA y, para los asesores técnicos, FAG.

Análisis Cuantitativo y Cualitativo

Los tres grupos coincidieron en las dimensiones de las explicaciones que forman las categorías FE y FAG, son causas cambiantes (inestables), externas a los agricultores y, por lo tanto, incontrolables. Las de DTO también son inestables, pero internas y, por lo mismo, controlables. La categoría CT, expresada sólo por los investigadores, se orienta a explicar la respuesta del suelo, aspecto técnico que se ve ausente en las escalas de los agricultores y asesores. En la categoría DA no hubo coincidencia entre los tres grupos, en la escala de los agricultores concentra las causas menos importantes, con dimensiones inestables, internas pero controlables. Por parte de los asesores técnicos la categoría menos importante es FAG cuyas dimensiones son inestables, externas e incontrolables.

Identificación de Cúmulos por Escalonamiento Multidimensional.

En este procedimiento se incluyeron todas las categorías de los tres grupos, para entender sus relaciones en la explicación que se desea. En la Figura 2, se observa, por un lado, que el cúmulo más cercano al centroide está formado por las cuatro categorías de explicaciones causales (A, B, C, D), que su estructura no puede verse con claridad debido a la proximidad que existe entre ellas. Por otro lado, aparecen las categorías desinterés del agricultor (E) y las consideraciones técnicas de los investigadores (F), ambas lejanas del único cúmulo y del centroide. La interpretación de lo anterior fue que tales categorías no eran importantes para el análisis del diagrama y se procedió a realizar un nuevo escalamiento eliminando a ambas.

La Figura 3 representa un mapa psicométrico en el cual las distancias mayores, con respecto al centroide, reflejan menor importancia e interacción entre categorías; también muestra la relación entre las cuatro categorías atribucionales más importantes: En primer lugar, el Factor económico (A) es el que está más cerca del centroide, por lo que se interpreta como la categoría más importante en la opinión de los tres grupos estudiados. Las causas de esta categoría

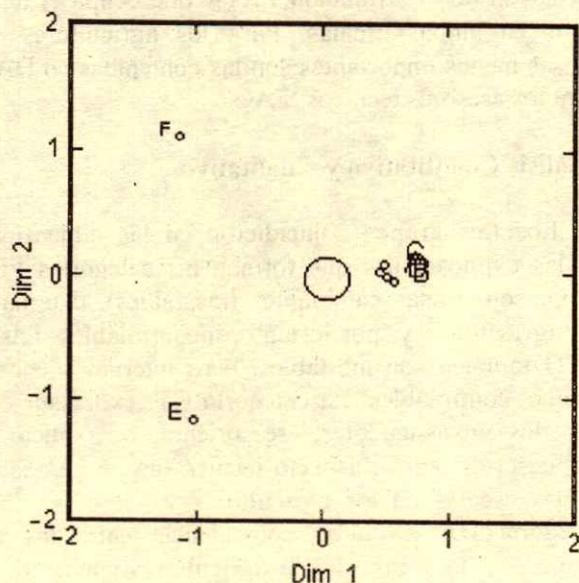


Figura 2. Mapa psicométrico de relación entre las categorías de explicaciones encontradas. Categorías de explicaciones: A = Factor económico, B = Desconocimiento, C = Falta de apoyo del Gobierno, D = Poco acceso a la tecnología recomendada, E = Desinterés del agricultor, F = Consideraciones técnicas.

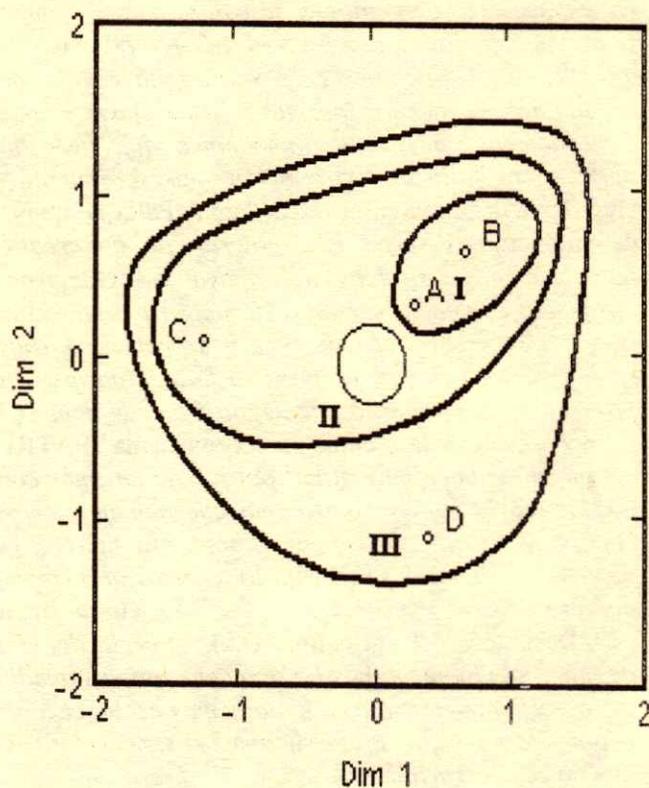


Figura 3. Mapa psicométrico de relaciones entre las cuatro principales categorías de explicaciones encontradas. A = Factor económico, B = Desconocimiento, C = Falta de apoyo del Gobierno, D = Poco acceso a la tecnología recomendada.

son las que más influyen en que los agricultores no usen la tecnología recomendada para el mejoramiento del suelo. A su vez, el factor económico está muy relacionado con la categoría Desconocimiento (B), con la cual se forma el Cúmulo I. El Cúmulo II describe la relación de las dos categorías anteriores, con la Falta de apoyo del Gobierno. Por último, el Cúmulo III incluye las relaciones del Cúmulo II más el Poco acceso a la tecnología recomendada.

Los resultados conducen a aceptar, de manera parcial, la hipótesis de esta investigación, debido a que: 1) Los tres grupos coincidieron en identificar a las categorías FE y DTO por parte del agricultor, como las explicaciones más importantes, de la no-adopción, de la tecnología recomendada, pero no coincidieron en la importancia que les asignan en sus escalas de respuestas. 2) Las escalas de los agricultores y de los asesores técnicos coinciden en el contenido de sus cinco categorías, pero en la escala sola comparten la ubicación de la categoría PATR, de una importancia media. 3) La escala de los investigadores sólo contó con tres grados de

importancia: el primer lugar correspondió a la categoría FE, el segundo lugar correspondió a la categoría DTO y la de CT, que sólo ellos mencionaron y que se refiere a la respuesta del suelo ante la tecnología recomendada.

Los resultados del análisis multidimensional revelan una estrecha relación entre las categorías señaladas como las más importantes y la relación de ellas con las categorías FAG y PATR, lo cual las convierte también en causas importantes de considerar. Las categorías DA y las CT quedaron eliminadas en este análisis.

CONCLUSIONES

- Las categorías centrales en la explicación buscada son Factor económico (FE) y Desconocimiento (DTO), cuyas dimensiones indican que los agricultores sólo sienten tener control sobre las segundas, porque se sienten capaces de aprender y, en este sentido, los asesores técnicos podrían tener también control, si llevaran un registro de lo que los productores saben o desconocen de las recomendaciones técnicas. Lo anterior, unido a un seguimiento técnico del ciclo agrícola por parte de los asesores, es recomendable para mejorar la capacitación y facilitar al agricultor superar su desconocimiento respecto al manejo de la tecnología recomendada. Situación derivada de la baja eficiencia del modelo de transferencia de tecnología, a pesar de la infraestructura institucional existente en el estado de México y de los programas desarrollados por estas instituciones.

- Las categorías centrales descritas en el párrafo anterior tienen relación con las categorías Falta de apoyo del Gobierno (FAG) y Poco acceso a la tecnología recomendada (PATR), lo que convierte a éstas dos también en importantes en las explicaciones que nos interesan, pero no centrales, dadas sus dimensiones que revelan que los agricultores y los asesores técnicos las consideran causas inestables, externas a ellos y, por lo mismo, incontrolables.

- Los resultados revelan un problema central: Los investigadores, quienes tienen información básica sobre la respuesta del suelo, están alejados de los agricultores y también de la función de los asesores técnicos, a los cuales podrían capacitar en la información técnica. Esto podría indicar también que la investigación agrícola se sigue realizando bajo criterios unilaterales de los investigadores, sin considerar la participación y las necesidades sentidas

por los agricultores, así como los recursos de que dispone para adoptar las recomendaciones técnicas; o bien, desarrollando investigación que no se difunde. Por ello, es imprescindible superar el aislamiento y la incoordinación institucional que ha caracterizado el modelo tradicional de transferencia de tecnología agrícola.

- También se observa que el apoyo por parte del Gobierno no es tan importante como se esperaría lo fuera en el problema estudiado, lo que conduce a sugerir que se intente resolver el problema desde las siguientes perspectivas: 1) mediante la participación de los investigadores en diagnósticos de suelos en las parcelas de los agricultores; 2) con la capacitación para éstos sobre las recomendaciones técnicas requeridas y comprobación de que fueron comprendidas; 3) con el examen de los costos que conllevaría la aplicación de las recomendaciones, el efecto de éstas sobre el rendimiento y las ganancias o pérdidas, para solicitar o no solicitar el apoyo del Gobierno.

- La perspectiva psicosocial que se propone en este trabajo tiene posibilidades de ser una opción importante en todo proceso de transferencia de tecnología, porque permite la comprensión de la posición de los individuos por separado, por sector social y por las interrelaciones entre ellos, así como una comprensión de lo que, en conjunto, está sucediendo en la transferencia de tecnología. De lo anterior, se desprenderían estrategias locales y específicas encaminadas a resolver los problemas que se presentan en una región determinada.

LITERATURA CITADA

- Arce, C. 1994. Técnicas de construcción de escalas psicológicas. Segunda parte: Escalamiento multidimensional pp. 71-150. Síntesis Psicología. Madrid, España.
- Castillo, M.J. 1991. El enfoque de sistemas y el marco metodológico de la investigación desarrollo en la reestructuración institucional. Bases conceptuales y metodológicas de la investigación desarrollo. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Maracay, estado Aragua. Venezuela.
- Heider, F. 1958. The psychology of interpersonal relations. Wiley. New York.
- Hewstone, M. 1992. La atribución causal del proceso cognitivo a las creencias colectivas. Paidós. Buenos Aires, Argentina.
- Hollander, E. 1976. Principios y métodos de psicología social. Amorrortu Editores. Buenos Aires, Argentina.
- INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. 1998. Informe Anual. Toluca, estado de México, México.
- Jaspars, J. y M. Hewstone. 1993. La teoría de la atribución. pp. 415-438. In: Moscovici, Serge. Psicología Social II.

- Pensamiento y vida social, psicología social y problemas sociales. *Cognición y Desarrollo Humano*. Paidós. Buenos Aires, Argentina.
- Jones, E. y K. Davis. 1965. From acts to dispositions: The attribution process in person perception. pp. 144-150. *In*: Brekowitz, I. *Advances in Experimental Social Psychology*. Vol. 2. Academic Press. New York.
- Kelley, H. 1967. Attribution theory in social psychology. pp. 192-240. *In*: Levine, D. *Nebraska symposium on motivation*. Vol. 15. Lincoln, University of Nebraska Press.
- Lindgren, H.C. 1972. *Introducción a la psicología social*. Trillas. México, D.F.
- Martín-Baró, I. 1985. *Acción e ideología. Psicología social desde Centro América*. 2a ed. UCA Editores. San Salvador, El Salvador.
- Morales, J.F. y M.C. Moya. 1996. *Tratado de psicología social*. Vol. I. *Síntesis Psicología*. Madrid, España.
- Weiner, B. 1985. An attributional theory of achievement motivation and emotion. *Psychological Rev.* 92: 548-573.
- Weiner, B., I.H. Freize, A. Kukla, I. Reed, S. Rest y R.M. Rosenbaum. 1972. Perceiving the causes of success and failure. pp. 11-56. *In*: Jones, E.E., D.E. Kamouse, H.H. Kelley, R.E. Nisbett, S. Valins y B. Weiner. *Attribution: Perceiving the causes of behavior*. General Learning. Morris Town, NJ.

EFFECTS OF MULCHING, IRRIGATION AND FOLIAR FERTILIZATION UPON GROWTH, PRODUCTION AND NUTRIENT CONCENTRATION OF 'AGUA NUEVA II' APPLE

Efectos de Cubierta, Riego y Fertilización Foliar en Crecimiento, Producción y Concentración Nutricional de Manzana 'Agua Nueva II'

A. Enrique Becerril-Román^{1‡}, Armando Ibáñez-Martínez¹, and Rafael A. Parra-Quezada²

SUMMARY

Bearing in mind that more than 50% of the land used for agriculture in Mexico is under semiarid and arid conditions, water availability and nutrition are among the main handicaps for crops to produce, particularly if they are fruit species. From the total area cultivated with apple, 36% is grown under rainfed conditions with a 4.2 t ha⁻¹ yield. Therefore, technology for improving nutrition with a more efficient use of available water is now being considered, in order to increase fruit yield and quality. This could lead to obtaining higher profits, and to being able to access more specialized systems in addition to ensuring a sustainable development. Growth, production, N, P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Fe, and Zn foliar concentration were determined in 'Agua Nueva II' apple trees, a low chilling mutant of 'Golden Delicious', grown in semiarid condition. Mulching (manure, grass residues, and bare soil as control), irrigation (flood irrigation and rainfall as control), and foliar fertilization (2.0 kg free biuret urea + 2.0 L Bayfolan + 200 mL surfactant ha⁻¹ sprayed twice a month, and control) treatments were studied. A split plot design with three randomized blocks was used for statistical analysis. Before applying the treatments in August 1997, the nutritional condition of the apple plants was established; Cu and Zn foliar concentration were deficient. Results in 1998 showed a general plant growth, production and nutritional condition improvement with some of the treatments. Flood irrigation significantly affected plant growth, as N, P, K, and Mn concentrations in leaves. Manure

mulching also affected significantly plant growth and K concentration and caused the highest yields per tree. Zn concentration reached sufficiency levels, while Cu remained deficient.

Index words: Orchard management, leaf nutrient concentration, *Malus domestica*, soil moisture.

RESUMEN

Considerando que más de 50% de la superficie ocupada para agricultura en México son zonas áridas o semiáridas, la disponibilidad del agua y la nutrición están entre las principales causas que limitan la producción de cultivos, en particular en el caso de especies frutales. De la superficie total cultivada con manzano, 36% es de temporal con un rendimiento de 4.2 t ha⁻¹. Por lo tanto, tecnología para mejorar la nutrición, a la par de un uso eficiente del agua disponible, se considera en pro de incrementar el rendimiento y la calidad de frutas. Esto podría conducir a obtener mayores ganancias y, con ello, tener acceso a sistemas especializados, en adición a asegurar un desarrollo sostenible. Crecimiento, producción y concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Fe y Zn se determinaron en manzana 'Agua Nueva II', mutante de 'Golden Delicious' de bajo requerimiento de frío, desarrollando en una condición semiárida. Los tratamientos en estudio fueron: Cubierta de suelo (estiércol, pasto y suelo desnudo como testigo), riego (rodado y temporal como testigo) y fertilización foliar (2.0 kg urea sin biuret + 2.0 L Bayfolan + 200 mL ha⁻¹ surfactante aplicados dos veces por mes y el testigo sin aplicación). Se utilizó un diseño experimental y de tratamientos en parcelas divididas con tres repeticiones en bloques al azar. Antes de aplicar los tratamientos en agosto de 1997, se determinó la condición nutricional de las plantas, detectándose que los valores foliares de Zn y Cu fueron deficientes. El riego afectó significativamente el crecimiento de la planta y la concentración foliar de N, P, K y Mn. La

¹Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Texcoco, México.

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

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Sierra de Chihuahua. Apartado Postal 554, Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

Recibido: Noviembre de 2002. Aceptado: Junio de 2004.

Publicado como nota de investigación en

Terra Latinoamericana 22: 459-465.

cubierta con estiércol también afectó significativamente el crecimiento de la planta y la concentración foliar de K, además de causar el más alto rendimiento por árbol. Las concentraciones de Zn alcanzaron niveles de suficiencia, en tanto que las de Cu permanecieron deficientes.

Palabras clave: Manejo de huertos, concentración foliar nutrimental, *Malus domestica*, humedad del suelo.

INTRODUCTION

Apple is one of the most important fruit crops in Mexico, with a total cultivated area of 62 507 ha and a production of 629 277 t. From the total cultivated area, 40 654 ha are under irrigation which produces 538 251 t, while 21 853 ha are under rainfed conditions with only 91 026 t, giving an average yield of 13.2 t ha⁻¹ and 4.2 t ha⁻¹, respectively (Becerril and Flores, 1994; SAGAR, 1997). Apple, being an introduced crop, was established mainly under arid and semiarid conditions, located in the North and Central parts of Mexico, where most of the area has mild temperatures during winter, and therefore lacks chilling conditions. Water availability and nutrition are thought to be the main constraints of apple development and production (Becerril and Flores, 1994; Mills, *et al.*, 1994). The result is low average yields and poor fruit quality, compared with those obtained by the main producers in the world (Becerril, 2000).

The problem of lack of chilling has been solved by spraying rest breaking chemicals (Couvillon and Erez, 1985; Angulo, *et al.*, 1992; Miranda, *et al.*, 1997) or increasing the efficiency of chilling accumulation, lowering temperatures during late winter or early spring with irrigation by micro-sprinklers (Nir, *et al.*, 1988; Young, 1992; Cross, 1994). As an alternative to this, low chilling cultivars obtained through a breeding process, or selection of mutants have been used (Westwood, 1978; Ryugo, 1988; Ramírez and Saavedra, 1990).

However, low water availability and nutrition remain as problems to be solved. There is a low efficiency water use, because most orchard irrigation is done by gravity flow, or due to a low total precipitation in orchards under rainfed conditions. Here, as in many semiarid and arid regions of the world, sodium salts from runoff water from surrounding hills and mountains can accumulate

(Nye and Tinker, 1977; Richards, 1977; Mengel and Kirkby, 1978; Cross, 1994). Soil tilth and water penetration are generally poor, this is especially true where light, frequent irrigation has been applied year after year (Ryugo, 1988). Finally, there is a decreasing level of groundwater aquifers, one of the main water sources for irrigation, due to a variable and low total precipitation under semiarid and arid conditions, which hinders the system's sustainability (Palacios *et al.*, 1994; Cross, 1994; Hepp, 1994).

Therefore, the aim of this study was to evaluate the effects of irrigation, mulching and foliar fertilization on the growth, production and foliar nutrient concentration of 'Agua Nueva II' apple grown under semiarid conditions.

MATERIALS AND METHODS

The study was carried out in Texcoco, Mexico, located in the Valley of Mexico at 19° 29' N, 98° 54' W, and 2250 m of altitude, with 8-year apple trees cv. Agua Nueva II, a low chilling mutant of 'Golden Delicious' (400 to 500 chilling units requirement) (Ramírez and Saavedra, 1990), which is also self-fruitful. Trees are grafted upon MM-106 rootstock, spaced 2 x 2.5 m, trained on a central leader, with a 1.5 m grass cover between tree rows, grown with flood irrigation and soil fertilization with a rate of 145 N-72 P-102 K-12 Mg kg ha⁻¹ yr⁻¹ equivalent to 29.0 g N, 14.4 g P, 20.4 g K, and 2.4 g Mg tree⁻¹ yr⁻¹ (Ibáñez, *et al.*, 2000). The plants showed Zn and Cu deficiency symptoms, low rates of growth and poor fruit production.

During the period of study (Autumn 1997 to Autumn 1998), the highest average maximum temperature was 29.9 °C in May 1998. The lowest average minimum temperature was 1.5 °C in January 1998, and mean temperatures ranged from 11 to 19.5 °C. Total precipitation from August to December in 1997 was 136.4 mm (Aug-53.3 mm; Sept-36.0 mm; Oct-32.0 mm; Nov-5.1 mm; Dec-10.0 mm) and 453.4 mm from January to September in 1998, with most rainfall occurring during summer months (Jun-89.8 mm; Jul-104.1 mm; Aug-85.3 mm; Sep-174.2 mm), being evaporation rates always higher than total precipitation, except in September of 1998. Only 279 chilling units were accumulated in winter 1997-1998, therefore, apple trees were sprayed with 40 mL L⁻¹ of winter oil mixed with 2 mL L⁻¹ Thidiazuron to stimulate budbreak on March the 4th and 5th (Ibáñez, *et al.*, 2000).

The orchard is established in a sandy loam textured soil; with a pH of 6.8; 0.28 dS m⁻¹ electrical conductivity; 1.18% organic matter; 10.1 cmol(+) kg⁻¹ exchange capacity; 0.06% N; 31 mg kg⁻¹ P; 0.81 cmol(+) kg⁻¹ K; 5.6 cmol(+) kg⁻¹ Ca; 3.8 cmol(+) kg⁻¹ Mg; 26 mg kg⁻¹ Fe; 0.51 mg kg⁻¹ Cu; 0.76 mg kg⁻¹ Zn; and 13.1 mg kg⁻¹ Mn. Water quality for irrigation is good with a pH of 6.7 and an electrical conductivity of 0.34 dS m⁻¹.

Trees for trial were selected by trunk diameter, defining three levels of plant vigor: low 5.75-6.9 cm; medium 6.95-7.5 cm; and high 7.6-8.5 cm. Three factors were studied: a) Irrigation (flood irrigation once a week to maintain a condition near to field capacity determined with tensiometers installed at 20 cm depth and rainfall as control); b) Mulching applied along the tree rows, 1 m to the north and 1 m to the south of the trees and 1 m wide (2 m²) with a thickness of 15 cm (manure, grass residues, and bare soil as control); and c) Foliar fertilization (2.0 kg free biuret urea + 2.0 L Bayfolan + 200 mL surfactant ha⁻¹ equivalent to 420.96 mg N, 32.9 µg P, 47.63 µg K, 0.17 µg Ca, 0.14 µg Mg, 2.20 µg S, 0.77 µg Zn, 0.48 µg Fe, 0.34 µg Mn, 0.38 µg Cu, 0.34 µg B, and 0.05 µg Mo per tree, sprayed twice a month, and control). Treatments started in autumn 1997; a split plot design with three randomized blocks (plant vigor) and one plant as experimental unit were utilized for statistical analysis, where irrigation was considered as the whole-plot treatment, mulching as the split-plot treatment and foliar fertilization the split-split-plot treatment.

Plant growth was measured from May until growth ceased in August 1998 in four new sprouts per tree, selecting one each orientation (North, South, East, and West); average growth per sprout was used for analysis. Production per tree was evaluated in August 1998 as yield efficiency in grams of fruit per unit of trunk cross sectional area. Nutrient foliar

concentrations per tree were determined in leaf samples obtained from each tree, which were washed in distilled water and oven dried at 70 °C for two days and then ground to powder using a mill. Nitrogen was analyzed by microkjeldahl methodology; P by colorimetry; K by flame emission spectroscopy, and Ca, Mg, Mn, Cu, Fe, and Zn by atomic absorption spectroscopy (Chapman and Pratt, 1961; Bradfield and Spencer, 1965). Nutrient determinations were done once in 1997 previous to trial establishment, while in 1998, they were done monthly from May 15th to August 15th, prior to fruit harvest. Data was analyzed by the Statistical Analysis System (SAS Institute, 1988).

RESULTS AND DISCUSSION

Growth was significantly affected by irrigation and mulching (Table 1), foliar fertilization and plant vigor effects were not significant, although plants with high vigor and foliar fertilization grew more than less vigorous plants, which were not fertilized. Trees with irrigation showed higher growth than rainfed ones throughout the period of study. Rainfed plants practically did not grow, due to the low level of water availability in the soil (Richards and Cockroft, 1975; Atkinson, 1980), which in this case of study, most of the time was near to the permanent wilting point (6.6% of soil moisture) (Ibáñez, *et al.*, 2000). Similarly, plant growth with mulching treatments was statistically superior to plants in bare soil, particularly at the beginning of May and at the end of July and August (Table 1). Treatments with covers and flood irrigation maintained field capacity all the time (13.1% of soil moisture) (Ibáñez, *et al.*, 2000), while treatments with covers but under rainfed conditions showed a decreasing moisture percentage, which was always higher than bare soil conditions. Organic covers did not allow weeds to grow; they also

Table 1. Growth of sprouts of 'Agua Nueva II' apple trees affected by irrigation and mulching.

Treatment	Level	Date						
		15/5	23/5	1/6	23/6	1/7	24/7	15/8
		----- cm -----						
Irrigation	Flood	25.0 a [†]	30.2 a	32.5 a	33.4 a	34.8 a	36.7 a	37.8 a
	Rainfed	14.5 b	14.5 b	15.2 b	15.2 b	16.0 b	16.1 b	16.2 b
Mulching	Manure	21.3 a	24.7 a	26.2 a	27.7 a	28.9 a	30.7 a	31.3 a
	Grass	20.9 ab	24.0 ab	24.5 a	25.1 a	27.0 a	27.8 ab	28.1 ab
	Bare Soil	16.2 b	18.0 b	19.2 b	20.1 a	20.9 a	21.5 b	21.5 b

[†] Means with the same letter in each column and treatment are statistically similar (Tukey, P ≤ 0.05).

Table 2. Production of 'Agua Nueva II' apple trees affected by plant vigor and mulching.

Treatment	Level	Number of fruits	Yield	Yield efficiency [†]
			g tree ⁻¹	g cm ⁻²
Plant Vigor	V1 [†]	5.9 a [§]	148.7 a	4.3 a
	V2	8.3 a	192.2 a	4.9 a
	V3	20.0 a	544.2 a	10.2 a
Mulching	Manure	14.2 a	359.2 a	7.5 a
	Grass	11.3 a	321.1 a	6.9 a
	Bare soil	8.6 a	204.6 a	5.0 a

[†] Yield per unit of trunk cross sectional area; [†] V1 = low; V2 = medium; V3 = high.

[§] Means with the same letter in each column and treatment are statistically similar (Tukey, $P \leq 0.05$).

reduced the average soil temperature oscillation (0 to 30 cm depth), the diurnal range was between 17 to 22 °C, while bare soil was 10 to 30 °C (Ibáñez, *et al.*, 2000).

There was no statistical difference in fruit production among treatments. The plants with high vigor showed more yield efficiency than less vigorous plants (Table 2). This is associated to the fact that the most vigorous plants had the highest amount of flower buds and also the highest fruit set. Organic covers also increased yield efficiency (Table 2).

N, P, K, Ca, and Mg foliar concentrations in 1997 (Table 3) were in the sufficiency range for apple (Westwood, 1978; Tukey and Dow, 1979). Evaluation in 1998 showed that N concentrations increased, flood irrigation treatment caused the highest N concentration compared with rainfed conditions in all of the samples evaluated (Table 4). Furthermore, in May 15th's evaluation, flood irrigation was statistically superior to rainfed treatment. Mulching also caused the increase of N concentration (Table 4), manure cover caused the highest values among mulching treatments, but only on June 15th, was manure statistically superior to bare soil condition.

P foliar concentration showed a similar pattern to the one observed in the case of N concentration, flood

Table 3. Nitrogen, phosphorous, potassium, calcium, and magnesium concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by plant vigor (August 1997).

Treatment	Level	Nutrient				
		Nitrogen	Phosphorous	Potassium	Calcium	Magnesium
----- mg g ⁻¹ -----						
Plant vigor	V1 [†]	18.0 a [†]	1.3 a	16.6 a	13.0 a	6.0 a
	V2	18.8 a	1.4 a	17.5 a	9.3 b	5.8 a
	V3	18.1 a	1.3 a	18.7 a	14.2 a	6.6 a

[†] V1 = low; V2 = medium; V3 = high. [†] Means with the same letter in each column are statistically similar (Tukey, $P \leq 0.05$).

Table 4. Nitrogen concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by irrigation and mulching (1998).

Treatment	Level	Sampling date			
		15/05	15/06	15/07	15/08
----- mg g ⁻¹ -----					
Irrigation	Flood	28.0 a [†]	21.6 a	23.2 a	25.8 a
	Rainfed	22.4 b	19.9 a	20.1 a	20.0 a
Mulching	Manure	26.3 a	21.5 a	23.1 a	24.7 a
	Grass	25.6 a	21.1 ab	19.9 a	20.3 a
	Bare soil	23.8 a	19.6 b	21.8 a	24.3 a

[†] Means with the same letter in each column and treatment are statistically similar (Tukey, $P \leq 0.05$).

irrigation caused the highest concentrations, statistically superior to rainfed conditions in May, June, and August (Table 5). With regard to K foliar concentration, the effect of flood irrigation was more notorious, which was significantly superior to rainfed during all the period of study. Trees with manure covers also had the highest K concentration, statistically superior in May, July, and August compared to bare soil and grass in July and August (Table 6). Calcium and magnesium foliar concentrations did not show statistical difference among treatments (Tables 7 and 8). Comparing August 1997 and August 1998 evaluations, N, K, and Ca concentrations increased, while P concentration remained similar and Mg concentration decreased

Table 5. Phosphorous concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by irrigation and mulching (1998).

Treatment	Level	Sampling date			
		15/05	15/06	15/07	15/08
----- mg g ⁻¹ -----					
Irrigation	Flood	2.3 a [†]	1.6 a	1.4 a	1.5 a
	Rainfed	1.6 b	1.1 b	1.2 a	1.2 b
Mulching	Manure	1.9 a	1.4 a	1.5 a	1.4 a
	Grass	2.0 a	1.4 a	1.2 b	1.3 a
	Bare soil	1.8 a	1.3 a	1.3 ab	1.3 a

[†] Means with the same letter in each column and treatment are statistically similar (Tukey, $P \leq 0.05$).

Table 6. Potassium concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by irrigation and mulching (1998).

Treatment	Level	Sampling date			
		15/05	15/06	15/07	15/08
----- mg g ⁻¹ -----					
Irrigation	Flood	35.9 a [†]	28.2 a	24.3 a	22.1 a
	Rainfed	27.3 b	19.6 b	18.3 b	15.8 b
Mulching	Manure	35.1 a	25.8 a	24.1 a	22.9 a
	Grass	30.6 ab	23.5 a	20.3 b	17.2 b
	Bare soil	29.0 b	22.4 a	19.5 b	16.7 b

[†] Means with the same letter in each column and treatment are statistically similar (Tukey, P ≤ 0.05).

Table 7. Calcium concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by irrigation and mulching (1998).

Treatment	Level	Sampling date			
		15/05	15/06	15/07	15/08
----- mg g ⁻¹ -----					
Irrigation	Flood	5.6 a [†]	9.5 a	12.4 a	14.8 a
	Rainfed	6.2 a	10.9 a	13.3 a	15.4 a
Mulching	Manure	5.3 a	9.8 ab	11.9 a	13.6 a
	Grass	6.1 a	9.2 b	13.3 a	14.9 a
	Bare soil	6.3 a	11.6 a	13.4 a	16.8 a

[†] Means with the same letter in each column and treatment are statistically similar (Tukey, P ≤ 0.05).

Table 8. Magnesium concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by irrigation and mulching (1998).

Treatment	Level	Sampling date			
		15/05	15/06	15/07	15/08
----- mg g ⁻¹ -----					
Irrigation	Flood	3.1 a [†]	3.9 a	3.9 a	4.2 a
	Rainfed	3.5 a	4.4 a	4.6 a	3.9 a
Mulching	Manure	3.0 a	3.9 a	3.8 a	3.9 a
	Grass	3.4 a	4.3 a	4.8 a	3.9 a
	Bare soil	3.4 a	4.2 a	4.1 a	4.3 a

[†] Means with the same letter in each column and treatment are statistically similar (Tukey, P ≤ 0.05).

(Tables 3 to 7), perhaps due to nutrient antagonism caused by the increase in K uptake (Mulder, 1950). Plant vigor and foliar fertilization did not affect N, P, K, Ca, and Mg foliar concentrations, because of soil fertilization applied to all of the experimental units.

In the case of micronutrients, the evaluation in 1997 (Table 9) showed that Fe and Mn foliar concentrations were in the sufficiency range, while Cu and Zn foliar concentrations were deficient (Westwood, 1978; Tukey and Dow, 1979). In 1998, there was no statistical difference among treatments for Fe, Mn, Cu, and Zn foliar concentrations, although

Table 9. Iron, Copper, Zinc, and Manganese concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by plant vigor (August 1997).

Treatment	Level	Nutrient			
		Iron	Copper	Zinc	Manganese
----- μg g ⁻¹ -----					
Plant vigor	V1 [†]	146.3 a [†]	6.6 a	6.6 a	97.1 a
	V2	131.0 a	4.9 a	6.4 a	96.5 a
	V3	109.6 a	5.1 a	6.1 a	105.5 a

[†] V1 = low; V2 = medium; V3 = high. [†] Means with the same letter in each column are statistically similar (Tukey, P ≤ 0.05).

Table 10. Iron concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by irrigation and mulching (1998).

Treatment	Level	Sampling date			
		15/05	15/06	15/07	15/08
----- μg g ⁻¹ -----					
Irrigation	Flood	102.5 a [†]	131.3 a	190.6 a	163.7 a
	Rainfed	88.7 a	140.9 a	209.6 a	208.6 a
Mulching	Manure	85.5 a	127.4 a	189.4 a	193.7 a
	Grass	110.3 a	135.7 a	183.3 a	187.3 a
	Bare soil	91.0 a	145.2 a	229.3 a	175.6 a

[†] Means with the same letter in each column and treatment are statistically similar (Tukey, P ≤ 0.05).

Table 11. Copper concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by irrigation and mulching (1998).

Treatment	Level	Sampling date			
		15/05	15/06	15/07	15/08
----- μg g ⁻¹ -----					
Irrigation	Flood	4.2 b [†]	5.5 a	5.5 a	5.3 a
	Rainfed	6.1 a	6.8 a	6.1 a	5.3 a
Mulching	Manure	6.0 a	5.6 a	5.7 a	5.3 a
	Grass	4.2 b	6.1 a	5.8 a	5.2 a
	Bare soil	5.4 ab	6.8 a	6.0 a	5.3 a

[†] Means with the same letter in each column and treatment are statistically similar (Tukey, P ≤ 0.05).

Fe and Mn concentrations were improved compared with 1997 values (Tables 9 to 13). Zn concentration also increased, and in the last determination in August 1998, it is clear that all the values are in the sufficiency range (Table 12). Opposite to this, Cu foliar concentration remained deficient, showing the same values as those obtained in 1997 (Table 11), meaning that it is required to increase the amount of Cu added.

The increase of plant growth, nutrition, and production under irrigation and mulching treatments is due to the improvement of soil moisture, to the effects

Table 12. Zinc concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by irrigation and mulching (1998).

Treatment	Level	Sampling date			
		15/05	15/06	15/07	15/08
----- $\mu\text{g g}^{-1}$ -----					
Irrigation	Flood	7.3 a [†]	11.6 a	39.1 a	36.4 a
	Rainfed	6.5 a	14.7 a	34.9 a	25.0 a
Mulching	Manure	6.5 a	11.2 a	32.8 a	31.8 a
	Grass	7.1 a	13.7 a	39.2 a	25.2 a
	Bare soil	7.3 a	14.7 a	39.4 a	33.3 a

[†] Means with the same letter in each column and treatment are statistically similar (Tukey, $P \leq 0.05$).

Table 13. Manganese concentration in 'Agua Nueva II' apple leaves affected by irrigation and mulching (1998).

Treatment	Level	Sampling date			
		15/05	15/06	15/07	15/08
----- $\mu\text{g g}^{-1}$ -----					
Irrigation	Flood	46.3 b [†]	59.1 b	113.2 a	134.7 a
	Rainfed	62.1 a	122.0 a	154.7 a	196.0 a
Mulching	Manure	49.3 a	76.4 a	125.9 a	162.2 a
	Grass	52.7 a	81.7 a	145.6 a	181.5 a
	Bare soil	60.7 a	113.5 a	130.3 a	147.9 a

[†] Means with the same letter each nutrient and treatment are statistically similar (Tukey, $P \leq 0.05$).

of organic covers in water conservation, evaporation reduction, organic matter increase, and nutrient additions from organic matter decomposition (Hogue and Nielsen, 1987; Parra, *et al.*, 2002). This is mainly because of an improved root development under such conditions (White and Holloway, 1967; Ibañez, *et al.*, 2000). Plant vigor, mulching, and irrigation treatments affected significantly the root length and root density of apple trees under trial (Reckruhm, 1974; Ibañez, *et al.*, 2000). Nutrition is also increased by the improvement of soil structure and nutrient availability caused by treatments. It is known that water stress can decrease nutrient availability and therefore nutrient uptake (Teskey and Shoemaker, 1978), except in the case of Ca concentration that could increase due to a possible higher transpiration rate under water stress (Tisdale, *et al.*, 1985). Water stress affects metabolic processes like cell growth, cell wall and protein synthesis, enzyme levels, abscisic acid level, stomatal opening, CO₂ assimilation, and sugar accumulation (Hsiao, 1973). Although it is necessary to recognize that results from a one-year evaluation can not be definitive, it is clear that mulching and irrigation improve water and nutrient supply to fulfill plant requirements, and explain to a certain extent why

foliar fertilization has no significant effects upon the variables measured.

There were no significant interactions among the studied factors. However, mulching and irrigation can interact with plant vigor and foliar fertilization, to improve plant metabolism, as long as light reception is efficient enough to get high photosynthesis rates, ensuring to a certain extent plant development and sustainability.

CONCLUSIONS

Results in 1998 showed a general plant growth, production and nutritional condition improvement with mulching and irrigation treatments. Flood irrigation significantly affected plant growth, as well as N, P, K, and Mn concentration in leaves. Manure mulching also significantly affected plant growth and foliar K concentration and caused the highest yield per tree. Foliar fertilization had no significant effects upon the variables evaluated.

REFERENCES

- Angulo-Martínez, M., A.E. Becerril-Román, and D.H. Díaz-Montenegro. 1992. Efecto de frío y de las aplicaciones de cianamida de hidrógeno en la brotación de yemas de vid (*Vitis vinifera* L.). *Agrociencia Serie Fitociencia* 3: 75-86.
- Atkinson, D. 1980. The distribution and effectiveness of the roots of tree crops. *Hort. Rev.* 2: 424-490.
- Becerril-Román, E. 2000. *Fruticultura en México después del 2000. Ciencia y Desarrollo XXVI* (152): 71-79.
- Becerril-Román, A.E. and R. Flores-Almaraz. 1994. *Análisis de la Situación Frutícola en México. VII Censo Agropecuario, 1991. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-Colegio de Postgraduados. Aguascalientes, Aguascalientes, México.*
- Bradfield, E.G. and D. Spencer. 1965. Leaf analysis as a guide to the nutrition of fruit crops: Determination of magnesium, zinc, and copper by atomic absorption spectroscopy. *J. Sci. Food Agr.* 16: 33-38.
- Chapman, H.D. and P.F. Pratt. 1961. *Method of analysis for soils, plants, and waters.* University of California, Division of Agricultural Sciences. Berkeley, CA.
- Couvillon, G.A. and A. Erez. 1985. Influence of prolonged exposure to chilling temperatures on budbreak and heat requirements for bloom of several fruit species. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 110: 47-50.
- Cross, P.R. 1994. Assuring future water supply and delivery. pp. 87-90. *In: Williams, K.M. and T.W. Ley (eds.). Tree fruit irrigation.* Good Fruit Grower. Yakima, Washington, DC.
- Hepp, M.A. 1994. Water quality concerns in irrigated agriculture. pp. 91-98. *In: Williams, K.M. and T.W. Ley (eds.). Tree fruit irrigation.* Good Fruit Grower. Yakima, Washington, DC.
- Hogue, E.J. and G.H. Nielsen. 1987. Orchard floor vegetation management. *Hort. Rev.* 9: 377-430.

- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 24: 519-570.
- Ibáñez-Martínez, A., A.E. Becerril-Román, A. Castillo-Morales, R.A. Parra-Quezada, and C. López-Castañeda. 2000. Efecto de cubiertas, riego y fertilización foliar en el desarrollo radical de manzano. *Terra* 18: 225-237.
- Mengel, K. and E.A. Kirkby. 1978. Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Bern, Switzerland.
- Mills, T.M., M.H. Behboudian, P.Y. Tan, and B.E. Clothier. 1994. Plant water status and fruit quality in 'Braeburn' apple. *HortScience* 29: 963-970.
- Miranda-Blanco, J.L., A.E. Becerril-Román, A. Castillo-Morales, and R. Vega-Nevarez. 1997. Requerimientos de frío y calor y estimulación de la brotación del manzano 'Agua Nueva II'. *Agrociencia* 31: 45-49.
- Mulder, D. 1950. Mg-deficiency in fruit trees on sandy and clay soils in Holland. *Plant Soil* 2: 145-157.
- Nir, G., I. Klein, S. Lavee, G. Spieler, and U. Barak. 1988. Improving grapevine budbreak and yields by evaporative cooling. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 113: 512-517.
- Nye, P.H. and P.B. Tinker. 1977. Solute movement in the soil-root system. Blackwell Scientific Publications. Oxford, UK.
- Palacios-Vélez, E., E. Mejía-Sáenz, and A. Exebio-García. 1994. Análisis e Implicaciones del Subsector Riego en México. VII Censo Agropecuario, 1991. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-Colegio de Postgraduados. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Parra-Quezada, R.A., A.E. Becerril-Román, C. López-Castañeda, and A. Castillo-Morales. 2002. Crecimiento del manzano cv. Golden Delicious sobre cuatro portainjertos en diferentes condiciones de humedad y nutrición. *Rev. Fitot. Mex.* 25: 193-200.
- Ramírez-Rodríguez, H. and L.L. Saavedra-Camacho. 1990. A low chilling requirement Golden Delicious apple mutant from northeast of Mexico. *Acta Horticulturae* 279: 67-73.
- Reckruhm, I. 1974. Direct root analysis in orchards with different soil management systems (in German). *Archiv für Gartenbau* 22: 17-26.
- Richards, L.A. 1977. Suelos salinos y sódicos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Limusa. México, D.F.
- Richards, D. and B. Cockroft. 1975. The effect of soil water on root production of peach trees in summer. *Austr. J. Agric. Res.* 26: 173-180.
- Ryugo, K. 1988. Fruit culture: Its science and art. John Wiley. New York.
- SAGAR. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 1997. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. Tomo II. Centro de Estadística Agropecuaria. México, D.F.
- SAS Institute, Inc. 1988. SAS/STAT User's Guide. Release 6.03. Cary, NC.
- Teskey, B.J.E. and J.S. Shoemaker. 1978. Tree fruit production. Avi Publishing Company, Inc. Westport, CT.
- Tisdale, S.L., L.W. Nelson, and J.D. Beaton. 1985. Soil fertility and fertilizers. 4th ed. Macmillan. New York.
- Tukey, R.B. and A.I. Dow. 1979. Fertilizer guide: Nutrient content of fruit trees in Washington. Bulletin FG-28f. Washington State University. Pullman, WA.
- Westwood, M.N. 1978. Temperate-zone pomology. W.H. Freeman. San Francisco, CA.
- White, G.C. and R.I.C. Holloway. 1967. The influence of simazine on a straw mulch on the establishment of apple trees in grassed down on cultivated soil. *J. Hort. Sci.* 42: 377-389.
- Young, E. 1992. Timing of high temperature influences chilling negation in dormant apple trees. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 117: 271-272.

SILICIO Y POTENCIAL OSMÓTICO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN EL CRECIMIENTO DE PEPINO

Silicon and Osmotic Potential of Nutrient Solution in the Growth of Cucumber

S. Parra-Terraza^{1‡}, G.A. Baca-Castillo², R. Carrillo-González², J. Kohashi-Shibata²,
A. Martínez-Garza³ y C. Trejo-López²

RESUMEN

Investigaciones realizadas en solución nutritiva sugieren que el silicio puede ser un elemento esencial o benéfico para el crecimiento de las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.), sin embargo, en la mayoría de estos estudios, no se ha considerado la influencia del silicio y su ión acompañante en el potencial osmótico (Ψ_s) de la solución nutritiva; tampoco los cambios en las relaciones mutuas entre los cationes y la existente entre los aniones, generados por las cantidades de ácido utilizadas para neutralizar el efecto alcalino de la sal silícica. Con base en lo anterior, en el presente trabajo se evaluaron los efectos del SiO_3^{2-} (0, 0.75 y 1.5 mol m^{-3}) y el potencial osmótico (-0.036, -0.072 y -0.108 MPa) de la solución nutritiva, en el crecimiento de las plantas de pepino, modificando la solución universal de Steiner para incluir SiO_3^{2-} y Na^+ , ajustando el pH de las soluciones con una mezcla de ácidos ($\text{HNO}_3:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{SO}_4$) y realizando las correcciones necesarias para no alterar los Ψ_s teóricos. Los efectos del silicio sobre las variables del crecimiento no fueron significativos. Sin embargo, el aportar 0.75 mol SiO_3^{2-} m^{-3} provocó un efecto benéfico sobre el crecimiento de las plantas. Por el contrario, la aplicación de 1.50 mol SiO_3^{2-} m^{-3} redujo el valor de todas las variables del crecimiento, comparado con 0.75 mol SiO_3^{2-} m^{-3} . El Ψ_s de la solución nutritiva afectó estadísticamente el valor de algunas variables. Los menores valores se obtuvieron con un Ψ_s de -0.036 MPa y los valores más altos con -0.072 MPa, mientras que el Ψ_s de -0.108 MPa, comparado con -0.072 MPa, provocó reducciones en los valores de la

mayoría de las variables. Las adiciones de 0.75 y 1.50 mol SiO_3^{2-} m^{-3} a la solución aumentaron significativamente las concentraciones de silicio en las hojas.

Palabras clave: *Cucumis sativus* L., cultivo en solución, invernadero.

SUMMARY

Several studies on solution culture suggest that silicon may be essential or beneficial to the growth of cucumber (*Cucumis sativus* L.). However, the majority of these have not considered the influence of silicon and the accompanying ion on the osmotic potential (Ψ_s) of the nutrient solution, nor have they considered the change of mutual ratios of cations and anions generated by the amount of acid employed to neutralize the alkaline effect of the silicic salt. In the present work we studied the effects of 0, 0.75, and 1.5 mol SiO_3^{2-} m^{-3} , as well as the effect of -0.036, -0.072, and -0.108 MPa of osmotic potential of the nutrient solution on the growth of cucumber plants. This was achieved by modifying Steiner's universal solution, so as to include SiO_3^{2-} and Na^+ , adjusting pH solutions with a mixture of acids ($\text{HNO}_3:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{SO}_4$) and making the necessary corrections so that the theoretical Ψ_s remained unaltered. The effect of silicon on the growth variables was not significant. However, the contribution of 0.75 mol SiO_3^{2-} m^{-3} was beneficial to plant growth. In contrast, the application of 1.50 mol SiO_3^{2-} m^{-3} decreased all the values of the growth variables, compared with 0.75 mol SiO_3^{2-} m^{-3} . The Ψ_s of the nutrient solution showed significant statistical differences for some variables. The smallest values of some variables were obtained with the nutrient solution of Ψ_s -0.036 MPa and the highest with -0.072 MPa. The solution of -0.108 MPa Ψ_s , compared with -0.072 MPa, caused a decrease in the values of most variables. The application of 0.75 and 1.5 mol SiO_3^{2-} m^{-3} to the solution resulted in significant concentrations of silicon in leaves.

¹Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México.

[‡] Autor responsable (psaul@uasnet.mx)

²Instituto de Recursos Naturales, ³Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, estado de México.

Recibido: Julio de 2003. Aceptado: Junio de 2004.

Publicado como nota de investigación en

Terra Latinoamericana 22: 467-473.

Index words: Cucumis sativus L., culture solution, glasshouse.

INTRODUCCIÓN

En la solución del suelo, el silicio está en forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4) con una concentración promedio de 15 a 20 mg Si L^{-1} (Jones y Handreck, 1965). Las plantas absorben el H_4SiO_4 en cantidades de acuerdo con su especie y con el tipo de absorción (Miyake y Takahashi, 1983). Para cultivos en suelo, la aplicación de silicio ha favorecido el crecimiento y desarrollo de plantas en condiciones de estrés abiótico (salinidad, acidez, toxicidad por Fe, Mn y Al) o biótico (plagas y enfermedades) (Epstein, 1999). Aunque el pepino (*Cucumis sativus* L.) se cultiva principalmente en suelo, su producción en hidroponía se consolida. En estas condiciones, la aplicación de silicio puede ser necesaria (FAO, 1990). En la mayoría de las investigaciones realizadas en hidroponía para evaluar el efecto del silicio en el crecimiento de las plantas, se aplica a una solución nutritiva base cantidades crecientes de una sal que contenga silicio, sin considerar las variaciones en el potencial osmótico (Ψ_s) de la solución generadas por dicha sal, ni el efecto del ión acompañante, tampoco los cambios en las proporciones de los nutrimentos en la solución. Ya que la fuente usual de silicio es el metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), una sal cuya hidrólisis provoca una solución muy alcalina (Levy *et al.*, 1995), es de esperarse que la alteración en la actividad de OH^- en la solución sea fuerte, lo que obliga a neutralizarlo para evitar precipitados de silicatos metálicos polivalentes (Iler, 1955), afectándose la disponibilidad de Ca, Mg y Fe para las plantas. En muchas ocasiones, esta neutralización de OH^- se realiza con la aplicación de un ácido (HNO_3 ó H_2SO_4), lo que provoca un cambio en las proporciones relativas de los aniones en la solución nutritiva. En consecuencia, la aplicación de silicio en estos estudios probablemente ocasionó variaciones en la composición química y el Ψ_s de la solución nutritiva. Por esta razón, los efectos observados en este tipo de experimentos pueden ser fuertemente influenciados por estas variaciones no controladas y el efecto del silicio puede estar enmascarado. Con base en lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto del silicio y el Ψ_s de la solución nutritiva sobre el crecimiento de plantas de pepino, utilizando la solución nutritiva universal de Steiner (1984), la cual se modificó para la inclusión de SiO_3^{2-}

y Na^+ , ajustando el pH de la solución con una mezcla de ácidos (HNO_3 : H_3PO_4 : H_2SO_4) formulada con la misma proporción (60:5:35) que tienen los aniones NO_3^- , H_2PO_4^- y SO_4^{2-} en la solución universal y realizando las correcciones necesarias para no alterar los Ψ_s teóricos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este experimento se estableció en invernadero; semillas de pepino del tipo europeo cultivar Kalunga se germinaron en mallas de acero de 1 mm de abertura sobre agua destilada, cubiertas con plástico negro y colocadas en una incubadora a 25 °C. Las plántulas germinadas se transfirieron a vasos de poliestireno de 300 mL pintados de negro, utilizando como sustrato la solución nutritiva universal de Steiner (1984) a 0.36 atm y colocadas en una cámara de crecimiento (temperatura 20 °C, fotoperiodo 12 h con luz fluorescente). Después de 25 días, las plántulas se trasplantaron a recipientes de 5 L de capacidad, conteniendo la solución nutritiva respectiva, abastecida en forma permanente con aire proveniente de una bomba y transferidas al invernadero. Los tratamientos consistieron en nueve soluciones nutritivas (Cuadro 1) resultantes de la combinación de dos factores: SiO_3^{2-} (0, 0.75 y 1.5 mol m^{-3}) y Ψ_s de la solución (-0.036, -0.072 y -0.108 MPa), más tres tratamientos adicionales: 10 [$\Psi_s = -0.036$ MPa, $\text{Na}^+ = 15\%$ del total de cationes (TC)]; 11 ($\Psi_s = -0.072$ MPa, $\text{Na}^+ = 15\%$ del TC); y 12 ($\Psi_s = -0.108$ MPa, $\text{Na}^+ = 15\%$ del TC) que se incluyeron para evaluar los efectos del sodio sobre las variables del crecimiento, ya que los aportes de silicio se realizaron con $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$.

Las soluciones nutritivas se formularon en la forma siguiente: 1) la adición de una determinada concentración de SiO_3^{2-} a la solución implicó una disminución en las concentraciones relativas de los aniones NO_3^- , H_2PO_4^- y SO_4^{2-} , sin embargo, dichos aniones deben conservar la relación mutua propia de la solución nutritiva universal de Steiner; 2) debido a que el suministro de SiO_3^{2-} se realizó con la sal $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, también hubo aporte de Na^+ a la solución, por lo que fue necesario hacer una reducción de las concentraciones de los cationes K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} sin alterar su relación mutua propia; 3) los cambios anteriores ocasionaron un cambio en el Ψ_s teórico de la solución nutritiva, por lo que se ajustaron las concentraciones de todos los iones mediante un factor de corrección; 4) el aporte de SiO_3^{2-} a la solución

Cuadro 1. Composición química y potencial osmótico (Ψ_s) de las soluciones nutritivas.

Tratamiento	NO_3^- [†]		H_2PO_4^-		SO_4^{2-}		SiO_3^{2-}		K^+		Ca^{2+}		Mg^{2+}		Na^+		Ψ_s
								mol m ⁻³									MPa [‡]
1	6.00	6.00	0.50	0.50	1.75	1.75	0.00	0.00	3.50	3.50	2.25	2.25	1.00	1.00	0.00	0.00	-0.036
2	5.55	5.80	0.46	0.48	1.62	1.69	0.37	0.36	3.25	3.09	2.08	1.98	0.92	0.88	0.75	0.71	-0.036
3	5.10	5.57	0.42	0.46	1.49	1.62	0.75	0.69	2.97	2.73	1.91	1.76	0.85	0.78	1.50	1.38	-0.036
4	12.00	12.00	1.00	1.00	3.50	3.50	0.00	0.00	7.00	7.00	4.50	4.50	2.00	2.00	0.00	0.00	-0.072
5	11.10	11.54	0.92	0.96	3.24	3.37	0.75	0.72	6.47	6.21	4.16	3.99	1.85	1.77	1.50	1.44	-0.072
6	10.20	11.13	0.85	0.93	2.97	3.24	1.50	1.38	5.95	5.47	3.82	3.52	1.70	1.56	3.00	2.76	-0.072
7	18.00	18.00	1.50	1.50	5.25	5.25	0.00	0.00	10.50	10.50	6.75	6.75	3.00	3.00	0.00	0.00	-0.108
8	16.65	17.29	1.39	1.44	4.86	5.04	1.12	1.08	9.71	9.33	6.24	5.99	2.77	2.66	2.25	2.16	-0.108
9	15.30	16.72	1.27	1.39	4.46	4.88	2.25	2.07	8.92	8.20	5.74	5.27	2.55	2.34	4.50	4.13	-0.108
10	5.81	5.81	0.48	0.48	1.69	1.69	0.00	0.00	2.88	2.88	1.85	1.85	0.82	0.82	1.45	1.45	-0.036
11	11.62	11.62	0.97	0.97	3.39	3.39	0.00	0.00	5.76	5.76	3.70	3.70	1.65	1.65	2.90	2.90	-0.072
12	17.43	17.43	1.45	1.45	5.08	5.08	0.00	0.00	8.64	8.64	5.56	5.56	2.47	2.47	4.36	4.36	-0.108

[†]La primera columna corresponde a las concentraciones propuestas y la segunda a las concentraciones definitivas al realizar los ajustes por pH y Ψ_s .

[‡]MPa = megapascuales.

de Steiner provocó que el pH se alcalinizara, por lo que fue necesario acidificarlo añadiendo un cierto volumen de la mezcla de HNO_3 : H_3PO_4 : H_2SO_4 (Ver más adelante: el pH de las soluciones) hasta alcanzar el pH propuesto; 5) el paso anterior provocó que el Ψ_s se alterara, por lo que se procedió como en el punto 3; 6) con los pasos descritos anteriormente, se logró la formulación de las soluciones nutritivas estableciendo las relaciones mutuas de aniones y de cationes propuestas, así como también el Ψ_s y pH.

La estructura de los tratamientos corresponde a un factorial completo 3^2 con tres repeticiones y el diseño de distribución de los tratamientos en el invernadero fue de bloques al azar. El pH de las soluciones nutritivas que incluían silicio se ajustó a 5.3 ± 0.3 con una mezcla tri-ácida (HNO_3 : H_3PO_4 : H_2SO_4), valorada con Na_2CO_3 , preparada en la proporción de 60:5:35 considerando los aportes de NO_3^- , H_2PO_4^- y SO_4^{2-} (en meq L^{-1}) y realizando las correcciones necesarias para no exceder los Ψ_s teóricos propuestos. La solución de metasilicato de sodio se valoró con ftalato ácido de potasio. El silicio en el material vegetal se cuantificó por el método de fusión con NaOH (Kilmer, 1965), modificado por Elliott y Snyder (1991). Las soluciones nutritivas se prepararon con sales grado reactivo y agua destilada. Las concentraciones de los micronutrientes (en mg L^{-1}) utilizadas fueron: Fe: 5; Mn: 1.6; Zn: 0.023; Cu: 0.011; y B: 0.865; el Fe se proporcionó como Fe-EDTA (Steiner y Van Winden, 1970). Las soluciones nutritivas se reemplazaron cada siete días y a diario se repuso el agua evapotranspirada aforando con agua destilada y el pH se ajustaba a 5.3 ± 0.3 con la mezcla tri-ácida. La duración del experimento en el invernadero fue de 30 días (inicio de fructificación). Se analizaron las

variables del crecimiento: altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT), número de hojas (NH), peso fresco de vástago (PFV), peso seco de vástago (PSV), peso fresco de raíz (PFR), peso seco de raíz (PSR), número de frutos (NF) y peso fresco de frutos (PFF). El análisis de varianza de las variables del crecimiento se hizo evaluando los factores principales del diseño factorial: 1) concentración de SiO_3^{2-} en las soluciones nutritivas y 2) Ψ_s de las soluciones nutritivas y se determinó la interacción entre estos dos factores. Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Con la finalidad de comparar y determinar posibles diferencias estadísticas entre los tratamientos testigos adicionales y los tratamientos pertenecientes al factorial, se realizó una prueba de contrastes. Estos análisis estadísticos se realizaron con el programa Statistical Analysis System, Versión 8 (SAS Institute, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2, se indica el análisis de varianza de las variables de crecimiento. La concentración de silicio no tuvo efecto significativo en estas variables; los valores menores se tuvieron con la solución nutritiva (SN) sin silicio, con excepción de altura de planta; sin embargo, al suministrar $0.75 \text{ mol SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$ a la SN, los valores de la mayoría de las variables aumentaron. Estos incrementos, en conjunto, podrían indicar un efecto benéfico del silicio sobre el crecimiento de las plantas de pepino. Por el contrario, con la aplicación de $1.50 \text{ mol SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$ hubo una disminución en los valores de todas las variables, comparado con $0.75 \text{ mol SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$, lo cual podría indicar que esta concentración excedió a la demanda

Cuadro 2. Efecto de la concentración de SiO_3^{2-} (CS) y el potencial osmótico (Ψ_s) de la solución nutritiva sobre altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT), número de hojas (NH), peso fresco de vástago (PFV), peso fresco raíz (PFR), peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR), número de frutos (NF) y peso fresco de frutos (PFF).

Factor	CS	AP	DT	NH	PFV	PFR	PSV	PSR	NF	PFF
	mol m ⁻³	cm	cm			g	g	g		g
SiO_3^{2-}	0.00	81.44 a [†]	1.50 a	15.22 a	88.14 a	17.89 a	7.17 a	0.87 a	7.11 a	2.71 a
	0.75	74.11 a	1.57 a	16.56 a	116.54 a	29.95 a	8.72 a	1.11 a	8.22 a	2.90 a
	1.50	71.44 a	1.54 a	15.11 a	92.11 a	22.09 a	7.34 a	0.95 a	6.44 a	1.92 a
Ψ_s	-0.036 [‡]	58.67 b	1.46 b	14.56 a	71.50 b	15.69 a	5.54 b	0.74 a	6.22 a	1.27 a
	-0.072	86.00 a	1.54 a	15.89 a	115.16 a	26.26 a	9.34 a	1.05 a	8.44 a	3.52 a
	-0.108	82.33 a	1.61 a	16.44 a	110.14 ab	27.93 a	8.36 ab	1.15 a	7.11 a	2.75 a
$\text{SiO}_3^{2-} * \Psi_s$		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

[†] Medias con letras iguales dentro de cada columna y cada factor son iguales, según Tukey ($P \leq 0.05$). [‡] MPa = megapascales. ns = no significativa según Tukey ($P \leq 0.05$).

de silicio por las plantas. Estos resultados (Cuadro 2) difieren de los encontrados por Miyake y Takahashi (1983) quienes reportaron que aplicaciones de silicio en la SN (0, 0.08, 0.33 y 1.67 mol m⁻³) provocaron aumentos significativos en el número y peso de frutos, número de hojas, altura y peso seco de plantas de pepino, en proporción directa con el incremento de las concentraciones de silicio en la SN. Probablemente, estas diferencias de los resultados del presente estudio con las de ellos, pueden ser atribuidas a variaciones en los genotipos; o a diferentes condiciones ambientales prevalecientes en ambos trabajos; o al efecto conjunto de la concentración de silicio y el Ψ_s de la SN. Adatia y Besford (1986) reportaron que aplicaciones de silicio (0 y 1.67 mol m⁻³) a la SN incrementaron en forma significativa el peso fresco y seco de la raíz de plantas de pepino, sin diferencias estadísticas en el rendimiento de frutos. En la presente investigación, la aplicación de 0.75 y 1.50 mol SiO_3^{2-} m⁻³ también incrementó, aunque no significativamente, el valor de estas variables (Cuadro 2). Los efectos del Ψ_s de la SN fueron estadísticamente significativos para algunas variables del crecimiento. Los menores valores se obtuvieron con -0.036 MPa, debido a que la cantidad de nutrimentos para generar este potencial en la SN, no cubrió los requerimientos nutrimentales de las plantas. Al aumentar la cantidad de nutrimentos para establecer un Ψ_s de -0.072 MPa, los valores de las variables analizadas se incrementaron en relación con -0.036 MPa. Estos incrementos fueron significativos en altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT), peso fresco y seco de vástago (PFV y PSV), mientras que la SN con Ψ_s de -0.108 MPa, al compararla con la solución de -0.072 MPa, provocó una disminución no significativa en AP, PFV, PSV, número de frutos (NF) y en el peso fresco de frutos (PFF) y aumentos no significativos en DT, número de

hojas (NH), peso fresco y seco de raíz (PFR y PSR) (Cuadro 2). La reducción de los valores de estas variables podría atribuirse a un ligero grado de estrés hídrico, producto de una menor disponibilidad de agua en la solución con Ψ_s de -0.108 MPa, lo cual favoreció una sequía fisiológica, alterándose también el acceso y la absorción adecuada de algunos nutrimentos para las plantas (Schwarz, 1985).

Por lo que respecta al aumento en el peso fresco y seco de la raíz de las plantas obtenido con la solución con un Ψ_s de -0.108 MPa, éste puede ser explicado, considerando que el pepino es un cultivo sensible a la salinidad (Jones *et al.*, 1989) y en estas condiciones la planta distribuyó una mayor cantidad de fotosintatos hacia la raíz que hacia la biomasa aérea. Esto ocasionó un aumento en el peso de la raíz (Van de Sanden y Veen, 1992). En relación con el aumento en el diámetro de tallo, en términos generales, se obtuvo un mayor diámetro cuando el Ψ_s de la SN fue de -0.108 MPa, independientemente de la dosis de silicio en la solución. Al analizar en forma individual el efecto parcial de cada una de las tres dosis de SiO_3^{2-} sobre el diámetro de tallo, se encontró que aplicaciones de 0.75 y 1.50 mol SiO_3^{2-} m⁻³ a la solución con Ψ_s de -0.108 MPa, incrementaron respectivamente el diámetro en 9 y 7% comparado con la solución sin SiO_3^{2-} . En algunos reportes de investigación, se ha mencionado que el silicio minimiza o previene el acame o caída de las plantas por acción del viento, en especial en gramíneas, como arroz y trigo (Epstein, 1999). Este efecto benéfico del silicio podría ser a consecuencia de un mayor diámetro de tallo. Schwarz (1985) reportó que, al aumentar la concentración de sales, la relación hoja:tallo de las plantas se incrementa. En la presente investigación, esta relación fue de 2.60 y de 2.81 para las plantas desarrolladas en las SN con Ψ_s de -0.072 y -0.108 MPa,

respectivamente, lo cual concuerda con lo expuesto por Schwarz. La interacción entre SiO_3^{2-} y Ψ_s no fue significativa en ninguna de las variables analizadas; ya que, en este estudio, uno de los niveles del factor Ψ_s provocó reducciones en los valores de algunas variables del crecimiento y considerando que los niveles del factor son cuantitativos (bajo, intermedio y alto), lo cual permite que la relación entre la respuesta de las variables analizadas pueda ser descrita mediante un modelo cuadrático (Montgomery, 2002). Por ello, se realizaron gráficas de las respuestas de las variables con respecto al Ψ_s , ya que el análisis de varianza (Cuadro 2) indicó significancia para este factor y en función de la forma de la respuesta y con el análisis de regresión, determinar si las respuestas podrían ser representadas mediante un modelo cuadrático. A manera de ejemplo, se muestran dos de las gráficas realizadas (Figuras 1 y 2). De acuerdo con lo anterior, se observó una tendencia cuadrática significativa en la altura de planta y en el peso seco del vástago (Figura 1), lo cual significó que el valor de estas variables del crecimiento se redujo cuando el Ψ_s de la SN fue de -0.108 MPa, mientras que las variables número de frutos, peso fresco de frutos y peso fresco del vástago, aunque mostraron un efecto cuadrático, éste no fue significativo. Por su parte, el DT (Figura 2), el PFR y el PSR presentaron una tendencia lineal significativa, la cual sugiere que una SN con un Ψ_s menor que -0.108 MPa podría incrementar el valor de estas variables (Cuadro 3). En relación con los tratamientos adicionales, al comparar mediante una prueba de contrastes las medias de las variables de crecimiento, del conjunto de los tratamientos que integran el factorial, contra las medias correspondientes de cada uno de los tratamientos testigo (Cuadro 4), no se encontraron

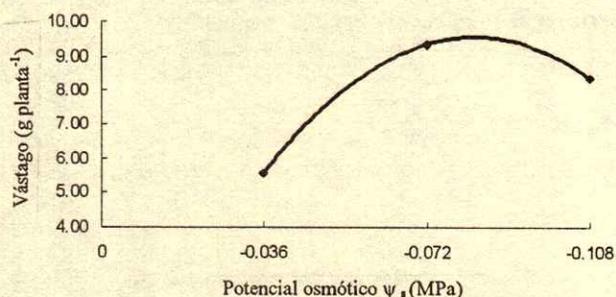


Figura 1. Relación entre el peso seco del vástago (hojas + tallos) y el potencial osmótico (Ψ_s) de la solución nutritiva.

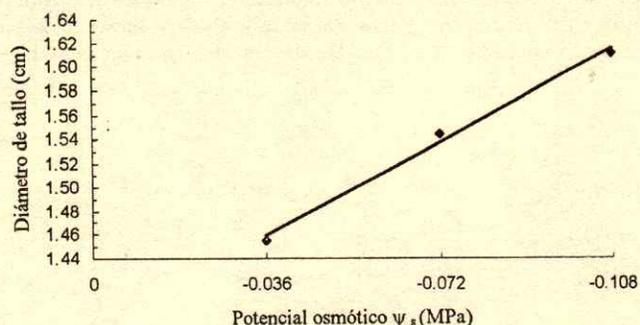


Figura 2. Relación entre el diámetro del tallo y el potencial osmótico (Ψ_s) de la solución nutritiva.

diferencias significativas en la mayoría de las variables analizadas, excepto en DT, NH y PSV, correspondientes al Tratamiento 10, el cual presentó la menor cantidad de nutrientes. Esto indica que el sodio no interfirió en la respuesta mostrada por dichas variables, excepto cuando los nutrientes proporcionados fueron insuficientes.

Extracción de Silicio

El contenido de silicio en las hojas de pepino se incrementó en forma creciente con relación al aumento progresivo de silicio en la solución nutritiva (SN) (Cuadro 5). Los tratamientos sin aportes de silicio a la SN presentaron una concentración promedio de 0.0631% en las hojas y una extracción de 2.70 mg planta⁻¹ de Si. Debido a que este elemento está presente como impureza en: 1) los reactivos utilizados para preparar la SN; 2) el agua, aun cuando sea destilada o desmineralizada; 3) materiales de

Cuadro 3. Relación de las variables de crecimiento de plantas de pepino en función del potencial osmótico de la solución nutritiva.

Variable ¹	Modelos teóricos ajustados ²	Pr>F
AP	$Y = 0.33 + 205.10(\text{PO}) - 119.60(\text{PO})^2$	0.0016
PFV	$Y = -20.83 + 324.10(\text{PO}) - 187.79(\text{PO})^2$	0.0291
PSV	$Y = -3.03 + 30.44(\text{PO}) - 18.41(\text{PO})^2$	0.0086
NF	$Y = 0.44 + 20.98(\text{PO})^2 - 13.71(\text{PO})^2$	0.2442
PFF	$Y = -3.99 + 18.80(\text{PO}) - 11.63(\text{PO})^2$	0.1200
D	$Y = 1.38 + 0.22(\text{PO})$	0.0001
PFR	$Y = 11.05 + 16.99(\text{PO})$	0.0353
PSR	$Y = 0.57 + 0.56(\text{PO})$	0.0255
NH	$Y = 13.74 + 2.62(\text{PO})$	0.2024

¹ AP = altura de planta; PFV = peso fresco de vástago; PSV = peso seco de vástago; NF = número de frutos; PFF = peso fresco de frutos; D = diámetro de tallo; PFR = peso fresco de raíz; PSR = peso seco de raíz y NH = número de hojas. ² Ecuaciones matemáticas del tipo $Y = \beta_0 + \beta_1X - \beta_{11}X^2$ y $Y = \beta_0 + \beta_1X$; Donde: Y = variable dependiente; β_0 = ordenada en el origen; β_1 = pendiente debida al factor X; β_{11} = curvatura cuadrática debida al factor X; y X = variable independiente.

Cuadro 4. Prueba de contrastes entre los tratamientos que integran el diseño factorial y los tratamientos testigo adicionales en altura de planta (AP), diámetro de tallo (DT), número de hojas (NH), peso fresco de vástago (PFV), peso fresco de raíz (PFR), peso seco de vástago (PSV), peso seco de raíz (PSR), número de frutos (NF) y peso fresco de frutos (PFF).

Treatmento	AP	DT	NH	PFV	PSV	PFR	PSR	NF	PFF
	----- cm -----			----- g -----					
Factorial	75.67 a [†]	1.54 a	15.63 a	98.93 a	7.74 a	23.39 a	0.98 a	7.26 a	2.51 a
10	79.00 a	1.43 b	12.33 b	66.45 a	4.73 b	13.39 a	0.60 a	6.67 a	1.33 a
Factorial	75.67 a	1.54 a	15.63 a	98.93 a	7.74 a	23.39 a	0.98 a	7.26 a	2.51 a
11	84.00 a	1.47 a	14.00 a	102.64 a	7.34 a	23.93 a	0.95 a	5.00 a	2.14 a
Factorial	75.67 a	1.54 a	15.63 a	98.93 a	7.74 a	23.39 a	0.98 a	7.26 a	2.51 a
12	79.67 a	1.57 a	13.33 a	98.69 a	7.27 a	22.69 a	1.00 a	5.33 a	4.71 a

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

vidrio; y 4) el polvo, es muy difícil crear y mantener un ambiente libre de contaminación por silicio (Werner y Roth, 1983), por lo que aparentemente esa fue la causa de sus contenidos observados en los tratamientos sin aplicación. Las adiciones de 0.75 y 1.50 mol $\text{SiO}_3^{2-} \text{ m}^{-3}$ incrementaron significativamente, con respecto al testigo, las concentraciones de silicio en las hojas (CSH) en 0.4331 y 0.5217%, respectivamente. El peso seco de las hojas (PSH) y las extracciones de silicio correspondientes, que se obtuvieron con la aplicación de 0.75 y 1.50 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} fueron de 5.70 y 4.44 g planta⁻¹, con extracciones de 24.69 y 23.16 mg planta⁻¹ de Si. Los valores de PSH no fueron significativos, mientras que las extracciones sí mostraron significancia. Con respecto al Ψ_s , a medida que disminuyó este potencial, la concentración de silicio en las hojas (CSH) se incrementó gradualmente en forma significativa. Las SN con Ψ_s de -0.036, -0.072 y -0.108 MPa presentaron CSH de 0.2725, 0.3494 y 0.3960% Si, mientras que los PSH y las extracciones de silicio correspondientes, valores ordenados de mayor a menor Ψ_s , fueron de 3.51, 5.76 y 5.16 g planta⁻¹ con extracciones de 9.56, 20.12 y 20.43 mg planta⁻¹. Los valores de PSH mostraron significancia y entre las extracciones no hubo diferencias estadísticas (Cuadro 5). Miyake y Takahashi (1983) mencionaron que las plantas de pepino absorben cantidades altas de silicio, cuando las concentraciones de este elemento en la SN son elevadas, no obstante, en la presente investigación la absorción de silicio por las plantas se afectó cuando el Ψ_s de la SN fue de -0.108 MPa. Es de notar que el suministro de 1.50 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} a la solución redujo el PSH comparado con 0.75 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} (Cuadro 5). Debido a ello, se analizó, en forma individual, el efecto parcial de los valores de SiO_3^{2-} sobre el PSH, realizando las comparaciones con

respecto a la solución sin SiO_3^{2-} y considerando el nivel de Ψ_s , se encontró que aplicaciones de 0.75 y 1.50 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} a la SN con un Ψ_s de -0.036 MPa, incrementaron en 43.6 y 70% el PSH. Para esta solución, la más diluida en cuanto a nutrientes, el silicio funcionó como un elemento benéfico que favoreció el PSH. La aplicación de 0.75 y 1.50 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} a la SN con Ψ_s de -0.072 MPa provocó, respectivamente, un aumento de 48.8% y una reducción de 3.22% en el PSH. Cuando se aplicaron 0.75 y 1.50 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} a la SN con un Ψ_s de -0.108 MPa, se encontró un aumento de 13% y una reducción de 21.44% en el PSH en forma respectiva, comparado con la SN sin SiO_3^{2-} . De acuerdo con estos resultados, la aplicación de 1.50 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} a las SN con Ψ_s de -0.072 y -0.108 MPa provocó una reducción en el PSH, probablemente debido a que la demanda de silicio por la planta se excedió o a efectos de antagonismo del silicio con algún nutriente. La interacción entre los factores SiO_3^{2-} y Ψ_s de la SN, originó una respuesta significativa en la CSH (Cuadro 5). Las mejores combinaciones entre los

Cuadro 5. Efectos de la concentración de SiO_3^{2-} (CS) y el potencial osmótico (Ψ_s) de la solución nutritiva en el peso seco de la hoja (PSH), concentración de silicio en la hoja (CSH) y extracción de silicio por hojas de pepino.

Factor	CS	PSH	CSH	Extracción de Si
	mol m^{-3}	g planta ⁻¹	%	mg planta ⁻¹
SiO_3^{2-}	0.00	4.29 a [†]	0.0631 b	2.70 b
	0.75	5.70 a	0.4331 a	24.69 a
	1.50	4.44 a	0.5217 a	23.16 a
Ψ_s	-0.036 [†]	3.51 b	0.2725 b	9.56 a
	-0.072	5.76 a	0.3494 ab	20.12 a
	-0.108	5.16 ab	0.3960 a	20.43 a
$\text{SiO}_3^{2-} * \Psi_s$		ns	*	ns

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

* = significativo; ns = no significativo, según Tukey ($P \leq 0.05$).

niveles de los factores fueron 1.50 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} y un Ψ_s de -0.108 MPa ; 0.75 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} con -0.072 MPa . Con estos tratamientos se obtuvieron CSH de 0.6284 y 0.5617%.

CONCLUSIONES

La adición de 0.75 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} a la solución nutritiva (SN) ocasionó un efecto benéfico sobre el conjunto de las variables de crecimiento (VC). Por el contrario, la aplicación de 1.50 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} provocó una reducción, con respecto a 0.75 mol m^{-3} de SiO_3^{2-} , de todas las VC. La concentración de silicio en las hojas de pepino se incrementó en forma directamente proporcional al contenido de silicio en la solución nutritiva afectando el peso seco de la hoja. El potencial osmótico de la SN afectó el valor de algunas variables del crecimiento. Los valores menores de las VC analizadas se obtuvieron con la solución de -0.036 MPa y los valores más altos se obtuvieron con un potencial de -0.072 MPa . Se observó una tendencia cuadrática significativa en altura de planta y en el peso seco de vástago y un efecto lineal significativo para las variables diámetro de tallo, peso fresco y seco de raíz cuando el potencial osmótico de la SN fue de -0.108 MPa .

LITERATURA CITADA

Adatia, M.H. y R.T. Besford. 1986. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. *Ann. Bot. (London)* 58: 343-351.
Elliott, C.L. y G.H. Snyder. 1991. Autoclave induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *J. Agric. Food Chem.* 39: 118-119.

Epstein, E. 1999. Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50: 641-664.
FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1990. *Soilless culture for horticultural crop production*. Rome, Italy.
Iler, R.K. 1955. *The colloid chemistry of silica and silicates*. Cornell University Press. Ithaca, NY.
Jones, L.H. y K.A. Handreck 1965. Studies of silica in the oat plant. III. Uptake of silica from soils by the plant. *Plant Soil* 23: 79-96.
Jones, R.W., L.M. Pike y L.F. Yourman. 1989. Salinity influences cucumber growth and yield. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 114: 547-551.
Kilmer, V.J. 1965. Silicon. pp. 959-962. *In: Black, C.A. et al. (eds.). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy. Madison, WI.
Levy, D.B., C. Amrhein, M.A. Anderson y A.M. Daoud. 1995. Coprecipitation of sodium, magnesium and silicon with calcium carbonate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1258-1267.
Miyake, Y. y E. Takahashi. 1983. Effect of silicon on the growth of solution-cultured cucumber plant. *Soil Sci. Plant Nutr.* 29: 71-83.
Montgomery, D.C. 2002. *Diseño y análisis de experimentos*. 2ª ed. Trad. al español por R. Piña-García. Limusa. México, D.F.
SAS Institute, Inc. 1999. *User's guide*. Version 8. Cary, NC.
Schwarz, M. 1985. The use of saline water in hydroponics. *Soilless Culture* 1: 25-34.
Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. pp. 633-649. *In: Proc. 6th Int. Congr. on Soilless Culture*. International Society for Soilless Culture. Lunteren, The Netherlands.
Steiner, A.A. y H. van Winderen. 1970. Recipe for ferric salt of ethylenediaminetetra acetic acid. *Plant Physiol.* 46: 862-863.
Van de Sanden, P.A.C.M. y B.W. Veen. 1992. Effects of air humidity and nutrient solution concentration on growth, water potential and stomatal conductance of cucumber seedlings. *Scientia Horticulturae* 50: 173-186.
Werner, D. y R. Roth. 1983. Silicon metabolism. pp. 682-694. *In: Lauchi, A. y R.L. Bielecki (eds.). Inorganic plant nutrition. Vol. 15B. Encyclopedia of Plant Physiology*. New Series. Springer-Verlag. Berlin, Germany.

INFLUENCIA DE LA HARINA DE SANGRE Y FERTILIZANTES EN CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y RENDIMIENTO DE JÍCAMA

Influence of Bloodmeal and Fertilizers on Physical Characteristics and Yield of Yam Bean

José Héctor Abraham-Gutiérrez¹, Abel Gil-Muñoz^{1‡}, Engelberto Sandoval-Castro¹, Benjamín V. Peña-Olvera¹ y F.H. Eduardo Almeida-Acosta¹

RESUMEN

Los desechos del rastro, como la sangre y el contenido ruminal, provocan graves problemas de contaminación ambiental. Tales desechos, procesados adecuadamente, podrían tener potencial como fertilizantes orgánicos. En La Soledad Morelos, municipio de Huaquechula, Puebla, se llevó a cabo un experimento para evaluar el potencial de la harina de sangre y de la vermicomposta del contenido ruminal de los bovinos, como fertilizantes en el cultivo de jícama (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) en condiciones de temporal. Se establecieron 12 tratamientos de fertilización que incluyeron las combinaciones de tres niveles de fertilización química (0%, 50% y 100% de la dosis recomendada) con tres de harina de sangre (0%, 100% y 200% de la recomendación), dos tratamientos con vermicomposta y uno con ceniza de madera. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones. Las variables de respuesta fueron características de la raíz y rendimiento agronómico. De los 12 tratamientos que se evaluaron, el que dio los mejores resultados, tanto en apariencia física, como en rendimiento agronómico de la jícama fue la combinación de 50% fertilización química + 100% harina de sangre. La vermicomposta del contenido ruminal no produjo rendimientos favorables para este cultivo. Se observó que, en condiciones de temporal, el uso de la harina de sangre como único fertilizante tuvo efectos negativos sobre el desarrollo del cultivo, pues se obtuvieron rendimientos inferiores a los del testigo absoluto; sin embargo, al combinar la dosis recomendada de harina de sangre con fertilizante químico (50 ó 100%), los rendimientos superaron al del testigo absoluto. Así, se concluye que el uso de algunos desechos del rastro (como la sangre), procesados y combinados

adecuadamente, puede ser útil como complemento fertilizante para la especie estudiada.

Palabras clave: *Pachyrhizus erosus* (L.) Urban, desechos de rastro, fertilizantes orgánicos, vermicomposta.

SUMMARY

Slaughterhouse wastes, such as blood and cattle ruminal contents, can produce severe environmental pollution problems. However, these wastes, adequately processed, can have potential uses as organic fertilizers. At La Soledad Morelos, municipality of Huaquechula, Puebla, an experiment was conducted to evaluate the potential of bloodmeal and vermicompost of cattle ruminal contents as fertilizers to produce yam bean (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) under rainfed conditions. Twelve treatments were evaluated; these included the combinations of three levels of chemical fertilizer (0%, 50%, and 100% of the recommended rate) with three levels of bloodmeal (0%, 100%, and 200% of the recommendation), two treatments with vermicompost and one with wood ashes. The experimental design was a randomized complete block with three replications. Variables evaluated were physical characteristics of the root and agronomic yield. Out of the 12 treatments evaluated, the one that produced the best results, both in terms of physical appearance and agronomic yield, was the combination 50% chemical fertilizer + 100% bloodmeal. Vermicompost of ruminal contents did not have a favorable influence on crop yield. It was observed that, under rainfed conditions, the use of bloodmeal as the only source of fertilizer had negative effects on the crop, because yields were inferior to those of the absolute control. Despite this, when combining the recommended rate of bloodmeal with chemical fertilizers (50 or 100%), yield surpassed that of the absolute control. Thus, it is concluded that the use of some processed slaughterhouse wastes (such as blood), can be useful as a fertilizer complement in the yam bean crop.

¹ Campus Puebla, Colegio de Postgraduados. Carretera Federal México-Puebla km 125.5, 72760 Cholula, Puebla.

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

Index words: *Pachyrhizus erosus* (L.) Urban, slaughterhouse wastes, organic fertilizers, vermicompost.

INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años, los desechos generados en los rastros se han considerado como un grave problema de salud pública. Por no contar con la infraestructura adecuada para su tratamiento, los desechos se han vertido en los ríos o se han depositado en las zonas posteriores de las instalaciones. Esta situación ha creado focos de infección y contaminación ambiental, provocando enfermedades, presencia de fauna nociva y malos olores desprendidos por la materia orgánica en descomposición (Sánchez *et al.*, 1999).

Para resolver el problema de contaminación producida por la disposición inadecuada de la sangre y el contenido ruminal, se han desarrollado diversos sistemas de manejo que permiten procesar tales desechos, convirtiéndolos en subproductos aprovechables, derivados del procesamiento final del ganado. En este contexto, la sangre y el contenido ruminal pueden ser utilizados como fertilizantes orgánicos o en composta (Jeavons, 1991).

Existe poca literatura que consigne el uso agrícola de la harina de sangre; Sipes *et al.* (1999), al usarla para controlar plagas de nemátodos que atacaban las raíces de jitomate, concluyeron que altas dosis (12 t ha^{-1}) pueden resultar tóxicas para el jitomate. En relación con el aporte de macronutrientes de la harina de sangre, Ames *et al.* (2000) indicaron que es de 12-1.3-0.7.

En Atlixco, Puebla, la sangre proveniente del rastro municipal se vierte directamente al río Cuexcomate, contaminando así este afluente del río Nexapa. Por otro lado, el contenido ruminal se acumula en la parte posterior del rastro, hasta que las autoridades municipales envían un vehículo para llevarlo al tiradero municipal. Procesados adecuadamente, estos desechos tendrían potencial para ser empleados como complementos y/o sustitutos de la fertilización química en la producción de jícama en el Valle de Atlixco, región donde el cultivo se ha tornado importante en los últimos años. Los datos proporcionados por el Centro de Apoyo al Desarrollo Agrícola Regional (CADER) Atlixco evidencian que la superficie destinada a tal cultivo pasó de 89 ha en 1998 a 315 ha en 2001. Para el mismo periodo, el aumento en superficie en las zonas de temporal fue de

35 a 196 ha. Cabe mencionar que la jícama sembrada en condiciones de temporal se destina a la producción de "jícama piñatera".

En relación con el efecto de la aplicación de fertilizantes químicos en jícama, Díaz (1980) observó que aquellos no favorecieron el desarrollo del cultivo. La respuesta de esta especie a fertilizantes químicos u orgánicos en condiciones de temporal se desconoce, dado que no se han hecho pruebas al respecto.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se tuvo por objetivo evaluar el efecto que causa la aplicación de la harina de sangre y la vermicomposta del contenido ruminal procedentes del rastro municipal de Atlixco, Puebla, como fertilizantes orgánicos en el crecimiento y en la producción de jícama (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban), cultivada en condiciones de temporal.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó con un agricultor cooperante del Valle de Atlixco, Puebla; la parcela experimental se ubicó en la localidad de La Soledad Morelos, municipio de Huaquechula ($18^{\circ} 45' 5'' \text{ N}$ y $98^{\circ} 29' 2'' \text{ O}$), en un suelo de origen aluvial con textura franco-arenosa. El experimento se sembró el 27 de mayo del 2001 y se condujo exclusivamente en condiciones de temporal; se utilizó la variedad criolla de jícama (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) "Santa Ana Necoxtla". Los tratamientos de fertilización estudiados se muestran en el Cuadro 1; éstos se generaron a partir de las combinaciones de fertilización química (Q): 0, 50 y 100% de la dosis recomendada por Leyva y Mendoza (1984) —que es la 40-20-60—, y de harina de sangre (H) seca y molida: 0, 100 y 200% de la dosis recomendada por Aubert (1997) —esto es 33.3 g m^{-2} —, con el supuesto de que el total de nutrientes pudiera no estar disponible inmediatamente a la planta (Ames *et al.*, 2000). En adición, se incluyeron otros tratamientos con vermicomposta de contenido ruminal (V) y ceniza de madera (C), a razón de 400 y 66.7 g m^{-2} , respectivamente. En los tratamientos con fertilización química, las fuentes empleadas fueron urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio.

El diseño experimental fue el de bloques completos al azar con tres repeticiones; la unidad experimental quedó representada por tres surcos de 5 m de largo por 60 cm de ancho; se consideraron como parcela útil los 4 m lineales del surco central (eliminando cabeceras). La jícama se sembró en un

Cuadro 1. Tratamientos estudiados en el experimento. La Soledad, Atlixco.

Tratamiento	Dosis de fertilización			
	Fertilización química (Q)	Harina de sangre (H)	Vermicomposta (V)	Ceniza (C)
	----- % -----			
1	0	0	0	0
2	50	0	0	0
3	100	0	0	0
4	0	100	0	0
5	0	200	0	0
6	50	100	0	0
7	50	200	0	0
8	100	100	0	0
9	100	200	0	0
10	0	0	100	0
11	0	200	0	100
12	0	200	100	100

arreglo llamado "cinco de oros" (se colocan cuatro semillas formando un cuadrado y la quinta en el centro del mismo), sobre el lomo del surco y con distancias entre planta de 15 cm. Los productos se aplicaron en banda en el momento de la siembra. El ciclo de cultivo tuvo una duración de 153 días desde la siembra hasta la cosecha, momento en el que por parcela útil, se cuantificó el número de raíces producidas y el rendimiento agronómico. Posteriormente, las raíces se clasificaron en categorías: jícama de primera (con peso superior a 500 g), de segunda (con peso entre 500 y 200 g), de tercera (con peso entre 200 y 100 g) y de desecho (con peso inferior a 100 g). A partir de los datos anteriores, se calcularon las variables:

a) Rendimiento agronómico (REND): Definido como la producción de raíz de jícama por parcela útil, ajustada por los factores de densidad y humedad, para referir todos los datos a una misma población de plantas y contenido de humedad. Expresado en gramos por parcela útil y calculado como:

$$\text{REND} = (\text{PCAMPO})(\text{FD})(\text{AH})$$

Donde: PCAMPO = rendimiento de raíz por parcela útil (g). FD = ajuste por densidad de población, calculado como el cociente de la división: población ideal en la parcela útil (95 plantas) por número de plantas cosechadas. AH = ajuste por humedad, obtenido para estandarizar el rendimiento de raíz por parcela a 80% de humedad (valor promedio registrado en la raíz a la cosecha). Se calculó como: $\text{AH} = (100\% - \text{contenido de humedad de la raíz})/20\%$.

b) Rendimiento de jícama de segunda y tercera clase (REND2Y3): Definido como la producción de raíz de

jícama de segunda y tercera clase por parcela útil, ajustada por los factores de densidad y humedad descritos previamente. Expresado en gramos por parcela útil y calculado como:

$$\text{REND2Y3} = (\text{Rendimiento de raíz de segunda y tercera clase en gramos})(\text{FD})(\text{AH})$$

c) Proporción de rendimiento comercial (PROPOR): Cálculo basado en el hecho de que el tipo de jícama que comúnmente se obtiene en condiciones de temporal es de segunda y tercera categoría, las cuales se emplean comúnmente como fruta para las piñatas. Obtenida como:

$$\text{PROPOR} = (\text{REND2Y3}/\text{REND})(100)$$

De cada parcela útil también se tomaron cinco plantas al azar; en cada una de ellas se midieron las variables:

a) Longitud de raíz principal (LONGRPP): Se hizo un corte longitudinal de la raíz principal y se midió la longitud del eje axial, comprendido entre la corona y la raíz distal (en cm).

b) Diámetro de raíz principal (DIAMRPP): Se midió el diámetro de la parte media de la raíz principal (en cm).

c) Relación longitud/diámetro de la raíz principal (INDRAIZ): Variable indicadora de la forma de la jícama; se obtuvo al dividir la longitud de la raíz principal entre el diámetro de la misma (sin unidades).

d) Lóbulos en raíz principal (LOBULOS) Se contabilizó el número de "lóbulos" visibles externamente en la raíz principal.

e) Peso de raíz principal (PRAIZPPA): Fue el peso fresco de la raíz (en g).

f) Peso de follaje (PFOLLAJE): Fue el peso fresco del follaje (incluyendo tallo principal, ramas y hojas) (en g).

g) Contenido de humedad (CH) de la raíz y el follaje: Calculado como (Peso húmedo/Peso seco)100. Para estimarlo, se separó todo el follaje de la planta y de la raíz se cortó un gajo de la misma; ambas estructuras se pesaron, tanto en fresco, como en seco (después de secar en una estufa a 65 °C durante 48 h).

h) Índice de cosecha (IC): Definido por Gardner *et al.* (1985) como la proporción del rendimiento biológico correspondiente al rendimiento agronómico. Aplicado al caso de la jícama, se calculó a partir de las variables PRAIZPPA y PFOLLAJE. A fin de eliminar variaciones por contenido de humedad, el IC se expresó en base seca y se calculó como:

$$IC = \text{PRAIZPPA} / (\text{PRAIZPPA} + \text{PFOLLAJE}) 100$$

Todos los resultados se sometieron a un análisis de varianza; en adición, se probó una serie de contrastes ortogonales, todo ello empleando el paquete Statistical Analysis System, Versión 6.12 (SAS Institute, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características Físicas de la Raíz

Análisis de varianza. En el análisis de varianza para LONGRPP, INDRAIZ y PRAIZPPA, se encontró que no hubo diferencias significativas entre tratamientos; tampoco se detectaron diferencias al cuantificar el efecto de los factores principales y su interacción. Los contrastes entre los distintos tratamientos para las mismas variables tampoco resultaron estadísticamente significativos (Cuadro 2), con excepción del contraste T_6 vs T_7 para INDRAIZ. La significancia del mismo denota que las raíces obtenidas al aumentar la dosis de harina de 100 a 200% (manteniendo constante el químico a 50%) fueron más alargadas y menos anchas (Cuadro 3), demeritando por lo tanto su calidad comercial. Para el caso de la variable LÓBULOS, aun cuando se encontraron algunas diferencias, no se consideraron relevantes debido al alto coeficiente de variación registrado (Cuadro 2).

La variable para la cual el análisis de varianza detectó diferencias significativas entre tratamientos fue DIAMRPP; al efectuar la partición por factores

estudiados, se encontró que también hubo diferencias para fertilización química (Cuadro 2). En el análisis de contrastes de esta variable, dos fueron significativos: $T_{2,3}$ vs $T_{4,5}$ y $T_{6,7}$ vs $T_{8,9}$ (Cuadro 2). En el primer contraste, tal significancia se debió a que, en los tratamientos con harina de sangre sola, se produjeron jícamas con un diámetro menor que el obtenido en aquellos con fertilizante químico solo (Cuadro 3). La significancia del segundo contraste implica que, cuando se emplea harina de sangre en combinación con fertilizantes químicos, el aumento en la dosis de estos últimos en la mezcla (de 50 a 100%) ocasiona una disminución del diámetro de la jícama (Cuadro 3). Estos resultados sugieren que para DIAMRPP, la fertilización química resulta mejor que la aplicación exclusiva de harina de sangre y que, cuando se combinan ambos productos, es preferible mantener la dosis de fertilización química en 50%.

Análisis de las características físicas de la raíz. En el caso de LONGRPP, se observó que los valores más bajos (indicadores de jícamas más cortas y, por lo tanto, con mejores características para el mercado) se obtuvieron para los tratamientos con la combinación 100% químico + 100% harina, con 100% de harina, la combinación de harina, vermicomposta y ceniza y 200% de harina (Cuadro 3). En cuanto al DIAMRPP, los valores más altos (preferidos en el mercado) correspondieron a las combinaciones 50% químico con 100% de harina, a los tratamientos con químico solo y a la combinación de fertilizantes orgánicos (Cuadro 3).

Un mejor indicador de la forma de la jícama en función de los tratamientos es el INDRAIZ; éste es un factor que determina la elección de los consumidores pues, por lo general, buscan jícamas anchas (con mayor diámetro) y cortas (no alargadas), esto es, con un índice bajo de raíz. El tratamiento que dio el valor más bajo (0.81) fue 50% químico + 100% harina; esto significa que la jícama presentó forma de disco. El valor más alto (1.04), que representa jícamas en forma de pera, correspondió al tratamiento 100% químico + 200% harina.

En lo que respecta al peso de la raíz principal (PRAIZPPA), se observó que el peso más alto correspondió a los tratamientos 100% químico, 200% harina + 100% ceniza, combinación de los tres orgánicos y 50% químico + 100% harina, con 502.3, 469.4, 394.5 y 361.3 g, respectivamente. De manera general, los valores más bajos correspondieron a los tratamientos que involucraron vermicomposta o harina de sangre sola.

Con un análisis global, puede concluirse que los mejores tratamientos fueron los que involucraron la fertilización química sola a 100%, 50% Q + 100% H, y las combinaciones de abonos orgánicos (Tratamientos 11 y 12). Se observó que los tratamientos testigo, los de harina de sangre sola y el

de vermicomposta produjeron raíces con poca calidad para la venta.

Rendimiento Agronómico

Análisis de varianza. El análisis de las variables relacionadas con la producción de raíz (Cuadro 4)

Cuadro 2. Grados de libertad y cuadrados medios del análisis de varianza y de la prueba de contrastes para las características físicas de la raíz principal: longitud (LONGRPP), diámetro (DIAMRPP), relación longitud/diámetro (INDRAIZ), número de lóbulos (LOBULOS) y peso fresco (PRAIZPP). La Soledad, Atlixco.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios				
		LONGRPP	DIAMRPP	INDRAIZ	LOBULOS	PRAIZPPA
Tratamiento	11	0.32 ns	0.85 *	0.02 ns	0.16 ns	23598.94 ns
Químico	2	0.67 ns	1.38 *	0.00 ns	0.01 ns	34504.02 ns
Harina	2	0.43 ns	0.68 ns	0.04 ns	0.49 *	17243.09 ns
Quím x Harina	4	0.15 ns	0.87 ns	0.02 ns	0.14 ns	13599.29 ns
Residual	3	0.23 ns	0.60 ns	0.01 ns	0.07 ns	33898.99 ns
Error	22	0.29	0.38	0.01	0.14	36482.78
C.V.		9.76	10.17	13.08	84.35	57.20
Contrastes [†]						
T _{1a9} vs T _{10a12}	1	0.004 ns	0.28 ns	0.013 ns	0.055 ns	11163.92 ns
T ₁ vs T _{2a9}	1	0.043 ns	0.61 ns	0.007 ns	0.194 ns	0.43 ns
T _{2a5} vs T _{6a9}	1	0.079 ns	0.14 ns	0.013 ns	0.234 ns	80.06 ns
T _{2,3} vs T _{4,5}	1	0.750 ns	2.45 *	0.012 ns	0.525 ns	71838.05 ns
T _{6,7} vs T _{8,9}	1	0.998 ns	2.56 *	0.005 ns	0.001 ns	1515.29 ns
T ₂ vs T ₃	1	0.004 ns	0.24 ns	0.003 ns	0.058 ns	63685.23 ns
T ₄ vs T ₅	1	0.045 ns	0.05 ns	0.000 ns	0.489 ns	7415.68 ns
T ₆ vs T ₇	1	0.721 ns	1.48 ns	0.107 *	0.058 ns	13257.82 ns
T ₈ vs T ₉	1	0.173 ns	0.08 ns	0.021 ns	0.014 ns	98.81 ns
T ₁₀ vs T _{11,12}	1	0.060 ns	0.83 ns	0.010 ns	0.141 ns	82119.81 ns
T ₁₁ vs T ₁₂	1	0.614 ns	0.68 ns	0.000 ns	0.002 ns	8413.25 ns

* Significativo a 5%; ** Altamente significativo a 1%; ns = no significativo. Valores de F tabulada: $F_{22, 0.05}^{11} = 2.259$; $F_{22, 0.01}^{11} = 2.647$; $F_{22, 0.05}^2 = 3.44$; $F_{22, 0.01}^2 = 5.72$; $F_{22, 0.05}^4 = 2.82$; $F_{22, 0.01}^4 = 4.31$; $F_{22, 0.05}^3 = 3.05$; $F_{22, 0.01}^3 = 4.82$; $F_{22, 0.05}^1 = 4.30$; $F_{22, 0.01}^1 = 7.95$.

[†] T = tratamiento.

Cuadro 3. Características físicas de la raíz. La Soledad, Atlixco.

Tratamiento	Dosis fertilización [†]				Promedio [†]				
	Q	H	V	C	LONGRPP	DIAMRPP	INDRAIZ	LOBULOS (número)	PRAIZPPA
	----- % -----				----- cm -----				g
1	0	0	0	0	5.49	5.57	0.99	0.67	324.1
2	50	0	0	0	5.79	6.38	0.91	0.61	296.2
3	100	0	0	0	5.84	6.78	0.86	0.80	502.3
4	0	100	0	0	5.23	5.59	0.94	0.00	209.3
5	0	200	0	0	5.40	5.77	0.95	0.57	279.6
6	50	100	0	0	5.62	6.93	0.81	0.41	361.3
7	50	200	0	0	6.31	5.94	1.01	0.21	267.3
8	100	100	0	0	5.22	5.63	0.93	0.33	332.7
9	100	200	0	0	5.56	5.40	1.04	0.24	340.8
10	0	0	100	0	5.47	5.77	0.95	0.69	229.3
11	0	200	0	100	5.96	6.75	0.89	0.41	469.4
12	0	200	100	100	5.32	6.08	0.87	0.45	394.5

[†] Q = fertilización química; H = harina de sangre; V = vermicomposta; C = ceniza. [†] LONGRPP = longitud de raíz principal; DIAMRPP = diámetro de raíz principal; INDRAIZ = relación longitud/diámetro de raíces; PRAIZPP = peso fresco de la raíz.

indicó que en los tratamientos sólo hubo diferencias significativas para rendimiento agronómico (REND). El análisis factorial mostró que existieron diferencias en REND para el factor fertilización química y, en PROPOR, para harina.

Al contrastar los tratamientos (Cuadro 4), destacó la alta significancia del contraste $T_{2,3}$ vs $T_{4,5}$ para REND, REND2Y3 y PROPOR; en los tres casos, se observó que los tratamientos con Q dieron mejores resultados que los tratamientos con H (Cuadro 5). Otros contrastes que resultaron significativos para REND fueron T_{2a5} vs T_{6a9} , T_6 vs T_7 y T_{10} vs $T_{11,12}$. La significancia del contraste T_{2a5} vs T_{6a9} implica que el rendimiento que se obtuvo con las combinaciones de Q y H fue, en promedio, mayor que el empleo de Q o H solos (Cuadro 5). La interpretación de la comparación T_6 vs T_7 es la de que, cuando se mantiene constante la fertilización química a 50%, un aumento de la dosis de harina de sangre de 100 a 200% resulta en una disminución del rendimiento (Cuadro 5), sugiriendo un efecto negativo de altas dosis de H en la combinación con químico. Finalmente, la significancia del contraste T_{10} vs $T_{11,12}$ implica que la combinación de compuestos orgánicos resulta mejor que el empleo de vermicomposta sola (Cuadro 5).

Análisis del rendimiento agronómico. Los datos presentados en el Cuadro 5 indican que los máximos rendimientos agronómicos (REND) se alcanzaron con las combinaciones 50% químico + 100% harina, harina+ceniza+vermicomposta, y 100% químico + 100% harina. Los menores rendimientos se obtuvieron con los Tratamientos 4 y 5, que involucraron exclusivamente harina de sangre; adicionalmente, se notó que los rendimientos obtenidos con V fueron casi iguales a los obtenidos con el testigo absoluto, coincidiendo con los resultados obtenidos por Díaz *et al.* (2000) al experimentar con frijol. Al analizar los valores de REND2Y3 (que incluyen sólo las raíces de tamaño comercial) destacó el Tratamiento 100% químico, seguido por la combinación 50% químico + 100% harina y la combinación harina+ceniza+vermicomposta. En cuanto a la proporción REND2Y3/REND, algunos de los mejores valores se obtuvieron con los Tratamientos 100% químico, 100% vermicomposta y 50% químico. Conjuntando la información anterior, se concluye que los mejores tratamientos en relación con las variables de rendimiento fueron el de químico 100%, la combinación 50% químico + 100% harina y la combinación de los tres productos orgánicos.

Cuadro 4. Grados de libertad y cuadrados medios del análisis de varianza y de la prueba de contrastes para el rendimiento agronómico total (REND), el de segunda y tercera clase (REND2Y3), relación REND2Y3/REND e índice de cosecha (IC). La Soledad, Atlitxco.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios			
		REND	REND2Y3	PROPOR	IC
Tratamiento	11	7208512.22 **	3560581.95 ns	198.17 ns	0.00745 ns
Químico	2	15748141.02 **	7615048.44 ns	130.15 ns	0.00405 ns
Harina	2	7365976.43 ns	7413643.62 ns	603.34 *	0.00855 ns
Quím x Harina	4	3682180.29 ns	1331716.96 ns	104.59 ns	0.00993 ns
Residual	3	6112226.13 ns	1260716.52 ns	98.19 ns	0.00567 ns
Error	22	2637615.60	2530434.44	175.38	0.00594
C.V.		24.61	41.05	23.63	10.47672
Contrastes[†]					
T_{1a9} vs T_{10a12}	1	4885249.03 ns	1959839.79 ns	37.65 ns	0.00001 ns
T_1 vs T_{2a9}	1	1891900.48 ns	180596.11 ns	73.43 ns	0.02246 ns
T_{2a5} vs T_{6a9}	1	10727141.22 *	583080.31 ns	64.79 ns	0.00728 ns
$T_{2,3}$ vs $T_{4,5}$	1	21327170.82 **	21282907.59 **	1194.01 *	0.01951 ns
$T_{6,7}$ vs $T_{8,9}$	1	367461.95 ns	575741.01 ns	63.03 ns	0.00837 ns
T_2 vs T_3	1	2900972.57 ns	4451035.49 ns	113.24 ns	0.00058 ns
T_4 vs T_5	1	78335.76 ns	950183.69 ns	345.84 ns	0.00349 ns
T_6 vs T_7	1	16702079.65 *	3426356.39 ns	9.64 ns	0.00329 ns
T_8 vs T_9	1	6961893.60 ns	3934351.35 ns	21.16 ns	0.00005 ns
T_{10} vs $T_{11,12}$	1	10448247.17 *	1292441.50 ns	229.09 ns	0.00001 ns
T_{11} vs T_{12}	1	3003182.19 ns	529868.25 ns	28.01 ns	0.01682 ns

* Significativo a 5%; ** Altamente significativo a 1%; ns = no significativo. Valores de F tabulada: $F_{22, 0.05}^{11} = 2.259$; $F_{22, 0.01}^{11} = 2.647$; $F_{22, 0.05}^2 = 3.44$; $F_{22, 0.01}^2 = 5.72$; $F_{22, 0.05}^4 = 2.82$; $F_{22, 0.01}^4 = 4.31$; $F_{22, 0.05}^3 = 3.05$; $F_{22, 0.01}^3 = 4.82$; $F_{22, 0.05}^1 = 4.30$; $F_{22, 0.01}^1 = 7.95$. [†] T = tratamiento.

Cuadro 5. Comportamiento de variables de rendimiento agronómico. La Soledad, Atlixco.

Tratamiento	Dosis de fertilización [†]				Promedio [‡]			
	Q	H	V	C	REND	REND2Y3	PROPOR	IC
	----- % -----				----- g (parcela útil) [†] -----			
1	0	0	0	0	5638	3509	60.13	0.82
2	50	0	0	0	6450	4084	62.15	0.76
3	100	0	0	0	7840	5807	70.84	0.74
4	0	100	0	0	4365	2680	54.14	0.64
5	0	200	0	0	4593	1884	38.96	0.69
6	50	100	0	0	8992	4900	54.26	0.74
7	50	200	0	0	5656	3389	56.80	0.69
8	100	100	0	0	8051	4516	52.85	0.77
9	100	200	0	0	5897	2897	49.07	0.77
10	0	0	100	0	5714	3744	64.96	0.74
11	0	200	0	100	7292	4520	52.10	0.68
12	0	200	100	100	8707	4845	56.42	0.79

[†] Q = fertilización química; H = harina de sangre; V = vermicomposta; C = ceniza. [‡] REND = rendimiento agronómico total; REND2Y3 = rendimiento de segunda y tercera clase; PROPOR = proporción de rendimiento comercial; IC = índice de cosecha.

Al graficar los datos de REND, se observaron diferentes tendencias: primero, al aumentar la fertilización química de 0 a 100% hubo un incremento concomitante en el rendimiento agronómico (Figura 1a), y segundo, al aumentar de 0 a 200% la fertilización con harina de sangre se ocasionó una disminución en producción, la cual fue más evidente

al pasar de 0 a 100% (Figura 1b). Esto último sugiere un efecto negativo de la aplicación de harina de sangre sola y en dosis crecientes en el rendimiento de raíz en jícama, debido, probablemente, a que al aplicar solamente harina de sangre, pudo generarse una competencia entre microorganismos y plantas por los nutrimentos disponibles en el suelo, pues los primeros

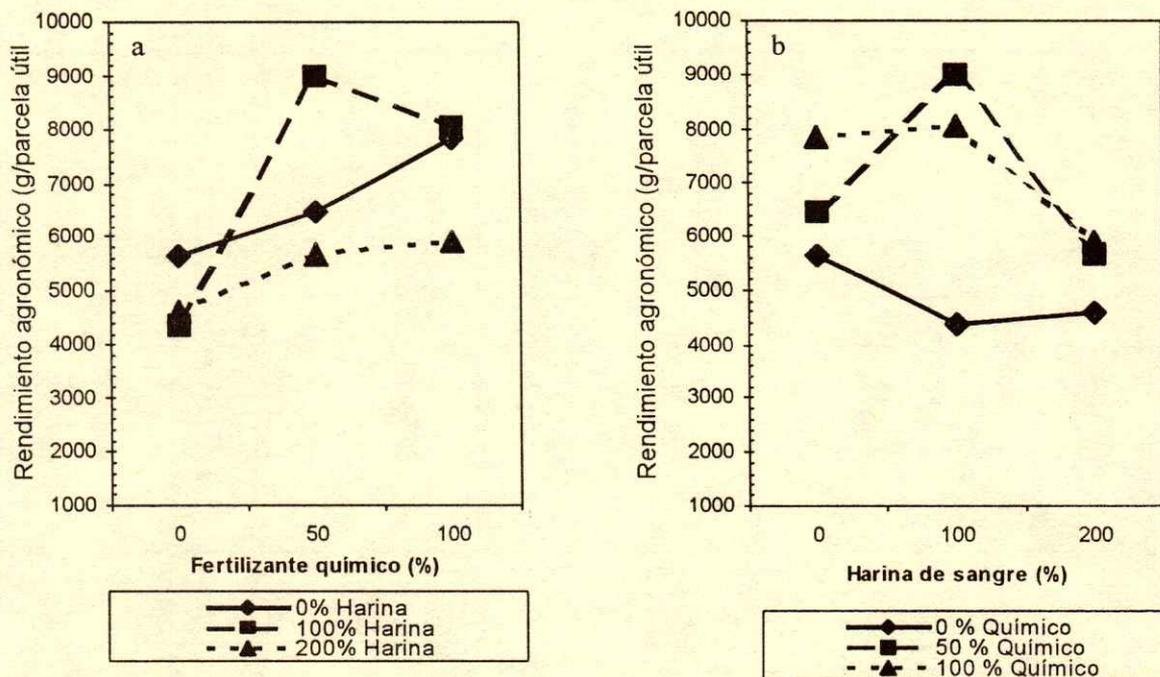


Figura 1. Tendencias en el rendimiento agronómico de jícama, considerando las dosis de fertilización química (a) y de harina de sangre (b). La Soledad, Atlixco.

requieren de energía para descomponer la sangre en nitratos o compuestos amoniacales asimilables por las plantas (Rugen y Bachman, 1990).

Si el análisis gráfico se realiza manteniendo constantes las dosis de harina de sangre (H), se notan las siguientes tendencias al aumentar la fertilización química (Q): en los tratamientos con 100% de H ocurre un incremento importante en REND al adicionar 50% de Q, pero al aumentar las dosis a 100% de Q, el rendimiento disminuye (Figura 1a). Por otro lado, cuando la fertilización con H se mantiene en 200%, se detecta un incremento en REND al agregar 50% de Q; dicha tendencia se mantiene –aunque menos pronunciada– al aumentar la dosis de Q hasta 100% (Figura 1a).

Al mantener una dosis constante de fertilización química (50%) y aumentar la proporción de harina, se observó que al pasar de cero a 100% H en la mezcla, se produjo un incremento en REND (alcanzando el valor máximo en el experimento), pero al aumentar la dosis de H hasta 200% la producción descendió (Figura 1b). Cuando la dosis de fertilización química (Q) se mantuvo fija en 100%, el rendimiento aumentó ligeramente al incrementar la dosis de H de 0 a 100%, y descendió de manera considerable al aumentar la dosis de H a 200% (Figura 1b).

Las respuestas anteriores indican que la harina de sangre puede tener efecto sinérgico con el fertilizante cuando la dosis de aquella no supera 100%, y que el efecto se vuelve antagónico cuando la dosis de harina alcanza 200%. Estos resultados coinciden en cierta medida con lo encontrado por Dima y Otero (1997), quienes obtuvieron los máximos rendimientos en diferentes cultivos al combinar fertilizantes químicos con abonos orgánicos. Hallazgos similares fueron reportados por Díaz *et al.* (2000) en frijol al combinar la dosis recomendada de fertilización química con vermicomposta, y por Sandoval *et al.* (2000) en haba. El análisis gráfico del rendimiento de jícama con valor comercial (REND2Y3) indicó que la producción de jícamas aptas para el mercado aumentó al incrementar la dosis de fertilización química (Q) de 0 a 100%, el rendimiento observado con 100% de Q fue el más alto de todos los tratamientos evaluados (Figura 2a). Se notó que al aumentar la dosis de harina aplicada, la magnitud de REND2Y3 disminuyó de manera general (Figura 2b).

Al revisar el comportamiento de REND2Y3 cuando se aplicó fertilizante químico (Q) y se mantuvieron constantes las dosis de harina de sangre (H), se encontró que las tendencias fueron las mismas a las dosis 100% y 200% de H (Figura 2a): REND2Y3

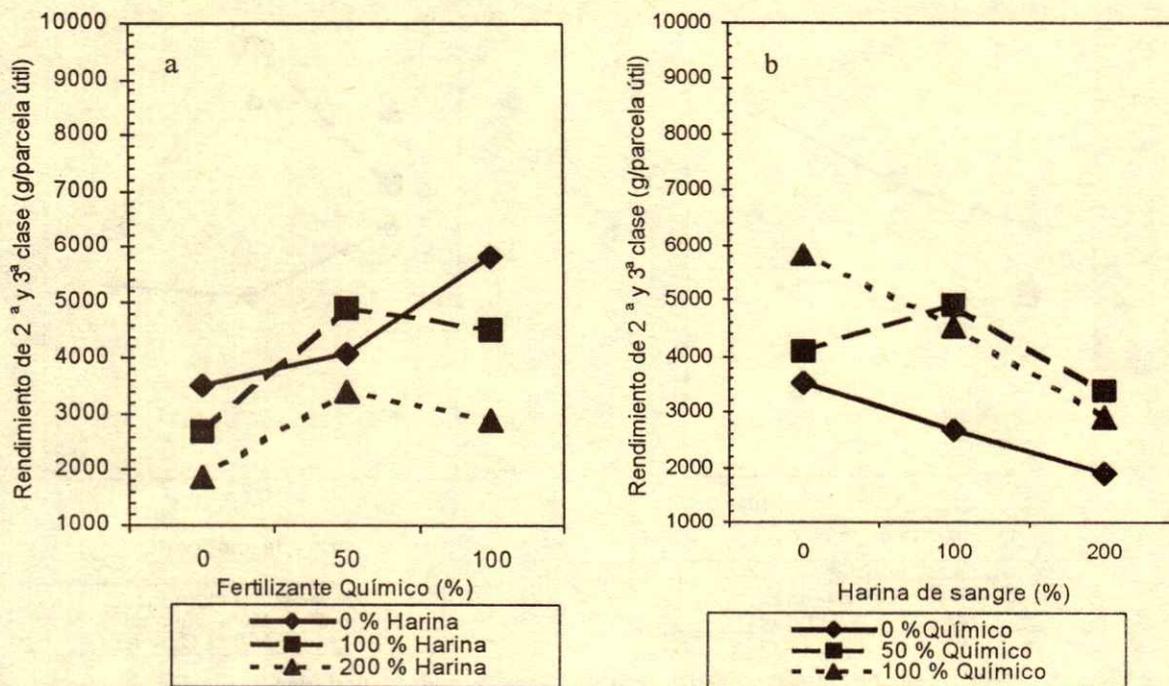


Figura 2. Tendencias en el rendimiento de jícama de segunda y tercera clase, considerando las dosis de fertilización química (a) y de harina de sangre (b). La Soledad, Atlixco.

aumentó al pasar de 0 a 50% de fertilización química (Q) y disminuyó al elevar la dosis de Q de 50 a 100%; asimismo, cuando el fertilizante químico se aplicó con 200% de H, REND2Y3 presentó valores inferiores a los registrados al utilizar 100% de H. Cuando el análisis se efectuó a la inversa, esto es, aumentando H y manteniendo constante Q (Figura 2b) se encontró que con 50% de Q primero hubo un incremento en REND2Y3 al moverse de 0 a 100% de H y, posteriormente, una disminución al pasar de 100 a 200% de H. Al emplear 100% de Q se registró un decremento en REND2Y3 al elevar la dosis de H de 0 a 200%.

Los resultados obtenidos, tanto en el análisis de varianza, como en los contrastes y en los valores promedio para rendimiento agronómico sugieren que el tipo de fertilizante empleado (orgánico o químico) es un factor determinante en el rendimiento de la jícama. Mientras que la fertilización química se presenta en forma de sales altamente solubles y es de fácil absorción por las plantas, la disponibilidad y absorción de los fertilizantes orgánicos están ligadas a la actividad biológica del suelo (Chen, 1999; Hossner y Juo, 1999). Los organismos denitrificadores del suelo necesitan buenas condiciones de humedad y temperatura, para transformar el nitrógeno de las proteínas de la sangre en amonio y nitratos disponibles para las plantas (Rugen y Bachman, 1990); en este sentido, las condiciones de sequía que se presentaron en el experimento (se registraron *in situ* 392 mm de precipitación) pudieron afectar el metabolismo de los microorganismos y, de ese modo, el rendimiento del cultivo de jícama.

CONCLUSIONES

- En condiciones de temporal, el uso de la harina de sangre como único fertilizante tuvo impactos negativos sobre el desarrollo del cultivo, pues se obtuvieron rendimientos inferiores a cuando no se fertilizó. Sin embargo, al combinar harina de sangre con fertilizante químico, el rendimiento mejoró.

- El tratamiento con el que se obtuvieron los mejores resultados, tanto en apariencia física, como en rendimiento agronómico de jícama, fue la combinación de 50% fertilización química + 100% harina de sangre.

- Es conveniente mencionar que la combinación de productos orgánicos (harina, ceniza, vermicomposta) también resultó en rendimientos altos de jícama.

- Se concluye, que algunos desechos del rastro (sangre y contenido ruminal) procesados y combinados adecuadamente, pueden ser útiles como complemento a la fertilización química en la especie estudiada.

LITERATURA CITADA

- Ames, G., G. Kuepper y H. Born. 2000. Organic culture of bramble fruits. Horticulture production guide. Appropriate Technology Transfer for Rural Areas. Fayetteville, AR.
- Aubert, C. 1997. El huerto biológico. Editorial Integral. Barcelona, España.
- Chen, Z.S. 1999. Selecting indicators to evaluate soil quality. Extension Bull. Food Fert. Techn. Center 473: 1-21.
- Díaz A., A. 1980. Cultivo de la jícama. Panagfa 8(71): 19-21.
- Díaz R., R., E. Sandoval C. y B.E. Herrera C. 2000. Efecto de la lombricomposta y fertilizante químico en frijol. pp. 577-581. In: Quintero L., R., T. Reyna T., L. Corlay C., A. Ibáñez H. y N.E. García C. (eds.). La Edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Colegio de Postgraduados-Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Autónoma Chapingo. México, D.F.
- Dima, S.J. y A.N. Odero. 1997. Organic farming for sustainable agricultural production. A brief theoretical review and preliminary empirical evidence. Environ. Resource Econ. 10: 177-188.
- Gardner, F.P., R.B. Pearce y R.L. Mitchell. 1985. Physiology of crop plants. Iowa State University Press. Ames, IA.
- Hossner, L.R. y A.S.R. Juo. 1999. Soils nutrient management for sustained food crop production in upland farming systems in the tropics. Extension Bull. Food Fert. Techn. Center. 471: 1-19.
- Jeavons, J. 1991. Cultivo biointensivo de alimentos. Editorial Ecology Action. Willits, CA.
- Leyva P., J.A. y R. Mendoza R. 1984. Respuesta de la jícama (*Pachyrhizus erosus*) a la fertilización, densidad de población, método de siembra y desfloreo, bajo condiciones de riego. Centro de Investigación y Capacitación para el Desarrollo Agrícola Regional-Plan Puebla. Puebla, México.
- Rugen, C. y J. Bachman. 1990. Organic blueberry culture. Appropriate Technology Transfer for Rural Areas. Fayetteville, AR.
- Sánchez R., G., R. Gómez M., L. Ávalos F., L. Oiruegas E. y J. Rosete D. 1999. Oportunidades de desarrollo en la industria de la carne de bovino en México: Una estrategia de reconversión. Boletín Informativo XXXII. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Morelia, Michoacán, México.
- Sandoval C., E., R. Díaz R. y M.A. Tornero C. 2000. Efecto de la fertilización química y aplicación de lombricomposta en haba (*Vicia faba* L.) en la región oriente de Puebla. pp. 582-586. In: Quintero L., R., T. Reyna T., L. Corlay C., A. Ibáñez H. y N.E. García C. (eds.). La Edafología y sus perspectivas al Siglo XXI. Colegio de Postgraduados-Universidad Nacional Autónoma de México-Universidad Autónoma Chapingo. México, D.F.
- SAS Institute, Inc. 1996. The SAS System for Windows. Cary, NC.
- Sipes, B.S., A.S. Arakaki, D.P. Schmitt y R.T. Hamasaki. 1999. Root-knot nematode management in tropical cropping systems with organic products. J. Sustainable Agric. 15(2-3): 69-76.

EL PAPEL DE ÓXIDOS DE HIERRO EN SUELOS

Role of Iron Oxides in Soils

Otilio Acevedo-Sandoval^{1†}, Enrique Ortiz-Hernández¹, Misael Cruz-Sánchez¹
y Enrique Cruz-Chávez¹

RESUMEN

El hierro es uno de los elementos más frecuentes en las rocas y en los suelos agrícolas. El color del suelo y, en consecuencia, la diferenciación visual de los horizontes del perfil se relaciona, frecuentemente, con la forma y composición de los depósitos de óxidos e hidróxidos de hierro, cuyo contenido en el suelo suele expresarse en porcentajes. Los óxidos de hierro son minerales de neoformación provenientes de la alteración de rocas y suelos y, debido a que no se encuentran unidos química o estructuralmente a los silicatos, ocurren como óxidos libres. Los óxidos de hierro en el suelo son importantes, ya que no existe prácticamente un suelo donde no se encuentren, aunque sea en pequeñas cantidades. El conocimiento de estructura, propiedades y naturaleza de los óxidos de hierro se ha aumentado en los últimos años, si bien estos conocimientos indican las complejas relaciones que se establecen entre los óxidos y los otros componentes orgánicos e inorgánicos del suelo. Los óxidos de hierro presentes en el suelo, en especial depositados como recubrimiento de minerales primarios y secundarios o infiltrados en agregados de arcilla, alteran la carga eléctrica, modifican las propiedades de superficie e incrementan la capacidad amortiguadora del suelo; el hierro juega un papel importante en la agregación de partículas y en la formación de la estructura del suelo. El objetivo del presente trabajo fue documentar los resultados de varios estudios que sugieren la evolución del conocimiento de los óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos de hierro en el ambiente edáfico y discutir su significancia en el desarrollo de la morfología de los suelos y sus propiedades.

Palabras clave: Óxido férrico, óxido ferroso, agregación.

¹ Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, km 4.5 Carr. Pachuca-Tulancingo, 42084 Pachuca, Hidalgo, México.

[†] Autor responsable (acevedo@uaeh.reduaeh.mx)

Recibido: Diciembre de 2002. Aceptado: Abril de 2004.
Publicado como ensayo en *Terra Latinoamericana* 22: 485-497.

SUMMARY

Iron is one of the most frequent elements in both rocks and agricultural soils. The color of the soil as well as the visual identification of soil horizons is frequently correlated with the form and composition of iron oxides and hydroxides. Iron content in soils is expressed in percent. Iron oxides are minerals of neoformation produced by the alteration of rocks and soils. Because they are not united chemically or structurally to silicates, they occur in the form of free oxides. Iron oxides in soils are important because they can be found in variable proportions in every soil type. The knowledge of the structure, properties, and characteristics of iron oxides has increased in recent years and indicates their complex relationship with both the organic and inorganic components of the soil. Iron oxides present in soils, especially coating particle of other minerals or mixed with clayed aggregates, alter the electrical charge, modify the surface properties, and increase the buffer capacity of the soil. Furthermore, iron plays an important role in particle aggregation and in the formation of soil structure.

Index words: Ferric oxide, ferrous oxide, aggregation.

INTRODUCCIÓN

Los óxidos de hierro son los óxidos metálicos más abundantes en el suelo (Schwertmann y Taylor, 1989). Los óxidos y los oxihidróxidos de hierro influyen en las propiedades de los suelos altamente meteorizados. Estos minerales se presentan en cristales muy pequeños y se pueden agregar, dispersar a través del suelo o revestir a otros minerales. Los óxidos de hierro se emplean como indicadores de la pedogénesis (Schwertmann, 1985), además, se usan para determinar sus propiedades inherentes como son hábito de cristalización, cristalinidad y sustitución isomórfica (Heck y Mermut, 1999), propiedades que pueden indicar las condiciones de medio ambiente en las cuales se formaron, por ejemplo, el área de sustitución de aluminio puede reflejar la actividad de

este elemento en la solución del suelo. Los cristales pequeños de los óxidos de hierro presentan una mayor área superficial, el cual aumenta la capacidad de adsorción de fosfatos del suelo, propiedad de suma importancia en agronomía (Prasetyo y Gilkes, 1994).

DISCUSIÓN

Hierro en el Suelo

Los óxidos en el suelo son importantes, ya que no existe prácticamente un suelo donde no estén presentes, aunque sea en pequeñas cantidades (Besoain, 1985). Bodek *et al.* (1988) mencionaron que el contenido de hierro en el suelo varía de 0.5 a 5% y que la media estimada es de 3.8%. Este contenido depende del tipo de suelo y de la roca madre, por ejemplo Yeróshkina, citado por Kaúrichev (1980), mencionó que el hierro no silícico [obtenido por el método de Mehra y Jackson (1960)], constituye hasta 50% de la masa del suelo o de 10 a 70% del contenido de hierro total (Cuadro 1). La reserva total en el suelo es del orden de 0.7 a 55%; sin embargo, el hierro intercambiable oscila entre 1 y 1000 mg kg⁻¹ y el soluble entre < 0.1 y 25 mg L⁻¹ (Castellanos *et al.*, 2000). El contenido de hierro total (Fe₂O₃) en los suelos de la corteza silícica de meteorización suele ser de 2 a 6% y en la corteza alítica de meteorización alcanza 30% (Kaúrichev, 1980).

Wild (1992) mencionó que las concentraciones de Fe²⁺ y Fe³⁺ en la solución de suelos que presentan condiciones aerobias son mayores que 10⁻⁷ M,

fijándose estos iones en soluciones nutritivas. Se desconoce la concentración de hierro en la solución del suelo que garantice la velocidad óptima de crecimiento para las distintas especies cultivadas. Es probable que en la interfase suelo-raíz se descompongan los complejos férricos y se reduzca el Fe³⁺ antes de su absorción por las plantas (Römheld, 1991).

Formas Cristalinas, Paracristalinas y Amorfas de Óxidos de Hierro

Químicamente, el óxido de hierro consiste de simples compuestos en la forma pura de Fe, O e H únicamente. El hierro es una estructura octaédrica en el cual seis átomos de oxígeno y/o grupos oxidrilos se arreglan en paquetes compactos hexagonales o cúbicos, con pequeños intersticios entre ellos (Figura 1). Estos intersticios son pequeños sitios para iones de Fe³⁺, los cuales pueden ser desplazados por otras especies iónicas trivalentes, pero es significativo encontrar sustitución de Fe³⁺ únicamente (Murad y Fischer, 1985; Zinder *et al.*, 1986). Los dos principales grupos de óxidos de hierro son: los óxidos (Fe₂O₃) y los oxihidróxidos (FeOOH); los trihidróxidos [Fe(OH)₃] no existen. Al interior de cada grupo existente son llamados forma α, que forman paquetes cerrados de oxígeno hexagonal (hematita, α-Fe₂O₃ y goethita, α-FeOOH) y paquetes cerrados de forma cúbica γ (magnetita, γ-Fe₂O₃ y lepidocrocita γ-FeOOH) (Taylor, 1990).

Cuadro 1. Formas de hierro en el suelo.

Formas de hierro	Compuestos de hierro
Silícico	Hierro en las composiciones de silicatos de aluminio
No silícico libre	Hierro en los compuestos de óxidos e hidróxidos de hierro en distintos grados de cristalización y amorfos, hierro de complejos, hierro de intercambio y soluble en agua
a) Amorfo	Goethita, lepidocrocita magnetita,
b) Cristalizado	ferrihidrita. Primordialmente en formas de
c) De intercambio	hierro bivalente, en forma iónica
d) Soluble en agua	(primordialmente en Fe ²⁺) en forma coloidal (protegido por algunas sustancias orgánicas o por sílice coloidal) en forma de complejos y de composiciones intracomplejas

Fuente: Kaúrichev (1980).

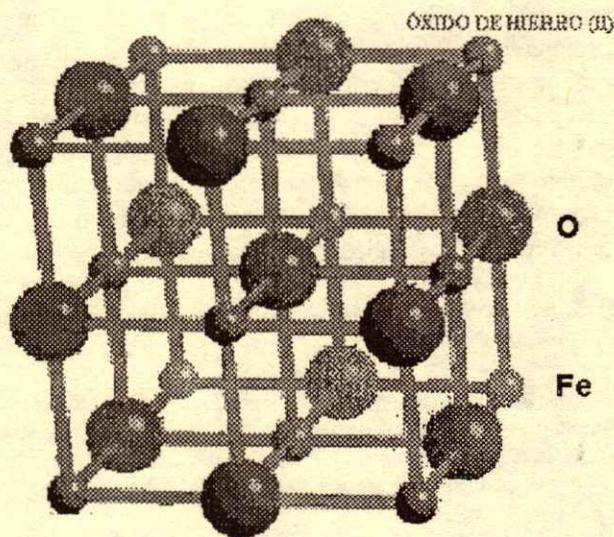


Figura 1. Estructura del óxido de hierro.

Los óxidos de hierro son productos de neoformación proveniente de la alteración de rocas y suelo, debido a que no se encuentran unidos química o estructuralmente a los silicatos, éstos se encuentran en la forma de óxidos libres. El hidróxido férrico, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, es el resultado directo de la oxidación del hierro ferroso y precipitado que, con el tiempo, es mineralizado. En el sentido genético, es importante la correlación de las formas de hierro con distinto grado de cristalización; entre éstas las que se encuentran en el suelo son:

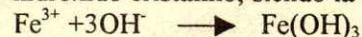
- oxihidróxido férrico amorfo ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)
- maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)
- lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$)
- hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)
- goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$).

los cuales difieren únicamente en el arreglo espacial de la unidad estructural básica: el octaedro $\text{Fe}(\text{O},\text{OH})_6$ (Lindsay, 1985).

La precipitación del hierro a partir de una solución iónica puede lograrse por elevación del pH o por oxidación del hierro ferroso en solución, debido a que el producto de solubilidad del hidróxido férrico es mucho más bajo que el del hidróxido ferroso (Taylor, 1990).

La valencia del hierro en el momento de la precipitación es crítica con referencia a la estructura del cristal, es decir, si se dispone sólo de iones férricos durante la precipitación se obtiene siempre óxido hidratado alfa, con agrupamiento hexagonal de átomos de oxígeno; por el contrario, si se da la disponibilidad simultánea de iones ferrosos y férricos se permite la síntesis de hidróxidos γ que tiene agrupamiento cúbico (Murad y Fisher, 1985; Schwertmann, 1990; Taylor, 1990).

La rápida precipitación del ión férrico mediante la adición de un álcali a una solución de iones férricos, produce un gel voluminoso de color pardo, el cual lentamente se transforma por envejecimiento a hidróxido cristalino, siendo la reacción:



El gel resultante se engloba en la fórmula $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ y se nombra como gel pardo u oxihidróxido férrico amorfo; por envejecimiento de éste se origina goethita, hematita e hidrohematita, así como mezclas de dos o tres de estos componentes. Los factores que influyen en la naturaleza de los productos de envejecimiento del gel férrico son: temperatura y pH; bajas temperaturas y pH elevados favorecen la formación de goethita, altas temperaturas y pH bajo estimulan la formación de hematita; bajas

temperaturas y pH neutro conducen a la formación de hidrohematita, que es una forma amorfa y parda precursora de la hematita. El envejecimiento es acelerado por temperaturas elevadas, pero también es retardado por la presencia de aniones, como los fosfatos que pueden reemplazar al grupo hidroxilo (Kaúrichev, 1980; Besoain, 1985; Lindsay, 1985; Taylor, 1990). La ferrihidrita es una estructura imperfecta de la hematita, con la fórmula $\text{Fe}_5(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}_3$ (Schwertmann, 1990).

La alta energía superficial de los óxidos de hierro no llega a alcanzar un mayor grado de sobresaturación, ya que todos los óxidos poseen una baja solubilidad. Una sobresaturación puede conducir a una nucleación elevada y, en consecuencia, a un significativo número de cristales pequeños en condiciones superficiales, los cuales pertenecen al suelo.

Los óxidos de hierro se forman rápidamente por disolución en pH bajos y, una vez que las condiciones del suelo se estabilizan, la disolución es extremadamente lenta. La disolución del hierro es originada cuando el Fe (III) es reducido a Fe (II) por la transferencia de electrones, dada por la condición deficiente de oxígeno. Nuevos óxidos de hierro se forman cuando se reintegra el oxígeno al sistema. Los óxidos de hierro reductomórficos del suelo pueden ser de formación joven dada por condiciones de oxidación-reducción, por ejemplo mecanismos de movilización e inmovilización del hierro dentro del perfil.

Determinación de Óxidos de Hierro

La identificación de los materiales de hierro y de los minerales de hierro plantea una gran dificultad para su estudio. Parte del problema se debe al bajo porcentaje que hay en los suelos y al empleo de difracción de rayos X que no siempre produce buenos resultados (Dahlgren, 1994). Para evaluar el contenido de hierro en el suelo, se han empleado técnicas donde se usan varios reactivos (Cuadro 2), cuyos resultados dan una estimación de la cantidad de estos minerales (Shuman, 1985; Parfitt y Childs, 1988; Zhang *et al.*, 1997).

El tratamiento con ditionito-citrato-bicarbonato (Mehra y Jackson, 1960) extrae hierro (Fe_d) de la mayoría de los minerales del hierro pedogénico, esta técnica determina óxidos de hierro lábiles; el oxalato ácido de amonio (Fe_o) extrae hierro amorfo, no cristalino y pobremente ordenado (Smith, 1994), es

Cuadro 2. Eficiencia de algunos reactivos para disolver componentes del suelo (Parfitt y Childs, 1988)

Componentes del suelo	Piro-fosfato	Oxalato	Ditionito-citrato
Ferrihidrita	Eficiente	Eficiente	Eficiente
Goethita	Deficiente	---	Eficiente
Hamatita	---	---	Eficiente
Lepidocrocita	---	Deficiente-regular	Eficiente
Maghemita	---	Deficiente-regular	Eficiente
Magnetita	---	Deficiente-regular	Regular

Deficiente: < 10%; regular: 10 a 80%; eficiente: > 80%.

selectivo de la ferrihidrita. El pirofosfato de sodio o potasio (Fe_p) obtiene el hierro presente en el suelo como parte de complejos orgánicos (Smith, 1994). Algunas relaciones de hierro son usadas para determinar la presencia de estos minerales en el suelo, como: Fe_o/Fe_d es una medida de la proporción del total de hierro pedogénico (amorfo más ferrihidrita), $Fe_2O_3(\text{ditionito})/Fe_2O_3(\text{total})$ es una medida de la cantidad total de Fe que es retirado del suelo, la diferencia $Fe_d - Fe_o$ es usada para estimar el hierro en la goethita y la hematita (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2002).

Óxidos, Hidróxidos y Oxihidróxidos de Hierro: Composición y Morfología en el Ambiente Edáfico

En el Cuadro 3, se presentan la composición y la morfología de los óxidos de hierro; las formas son principalmente gobernadas por los arreglos específicos del mineral $Fe(O,OH)_6$ octaédricos en la estructura; algunas morfologías se pueden separar y observar en el suelo. Sin embargo, las formas pueden modificarse ligera o fuertemente, debido a las interferencias de la solución del suelo desde el cual los óxidos de hierro se forman. En particular, los compuestos en solución que tienen alta afinidad por la superficie de los óxidos de hierro (orgánicos, silicatos y estructuras fosfatadas) pueden impedir la cristalización y no alcanzan formas geométricas regulares o típicas.

La morfología de los cristales de hierro del suelo presenta alguna similitud con aquellos que se sintetizan en el laboratorio. La naturaleza acicular de las goethitas del suelo es claramente visible, pero es menos desarrollada que la sintetizada; además, en ocasiones pueden presentarse formas aciculares y no aciculares (Besoin, 1985; Taylor, 1990).

Los óxidos de hierro desempeñan un papel importante en los suelos, debido a su facilidad para

cambiar valencia y formar complejos con numerosos productos orgánicos y minerales. Así, el hierro de los minerales puede liberarse mediante dos mecanismos: a) oxidación, transformación en Fe^{3+} y expulsión subsiguiente de redes, y b) movilización como Fe^{2+} siempre que el medio esté exento de oxígeno.

Dentro de las formas móviles de hierro en los suelos se encuentran: las cristalizadas, las amorfas y las de intercambio móviles y asimilables.

Aparte de éstas, se distinguen las formas iónicas y las coloidales, las composiciones complejas y las intra complejas. El contenido de las distintas formas de hierro está ligado, en sumo grado, a la génesis e influye sobre la fertilidad del suelo. Las formas móviles de hierro son las que más influyen sobre la edafogénesis y el crecimiento de las plantas.

El hierro desempeña un papel importante en los procesos de ferralitización, laterización, podsolización, gleificación y solodización. A partir de la proporción del contenido y de las formas de hierro en distintos horizontes, puede evaluarse el grado de desarrollo de los procesos edáficos antes indicados.

La distribución del hierro, en función de la profundidad en los perfiles del suelo, es un reflejo de los procesos pedogenéticos. En el horizonte superficial, los patrones de distribución de estos elementos pueden ser diferentes que en los horizontes subsuperficiales, debido a las prácticas agrícolas que el campesino realiza.

Zhang *et al.* (1997) encontraron en Alfisoles y Oxisoles que el hierro se presenta en todo el perfil asociado con las formas amorfas predominando en los horizontes subsuperficiales y, en menor cantidad, asociado como óxido de hierro. Estos resultados coinciden con lo reportado por Acevedo-Sandoval *et al.* (2002) en Inceptisoles y Alfisoles del estado de México. En los Ultisoles, los óxidos de hierro se presentan en los horizontes superficiales (los primeros 40 cm), mientras que las formas amorfas se encuentran en todo el perfil. En los Oxisoles, la mayor concentración de hierro se encuentra a 79 cm

Cuadro 3. Composición y morfología de los óxidos de hierro.

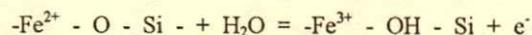
Especie	Composición	Morfología
Goethita	$FeOOH$	Agujas o listonado
Hematita	Fe_2O_3	Láminas hexagonales
Maghemita	Fe_2O_3	
Magnetita	Fe_3O_4	Cúbica
Lepidocrocita	$FeOOH$	Láminas alargadas
Ferrihidrita	$Fe_5(OH)_8 \cdot 4H_2O_3$	Esférica

de profundidad; esto se atribuye a un intenso proceso de ferralitzación (Wild, 1992).

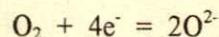
Fuentes de Procedencia de los Óxidos de Hierro en los Suelos

Las fuentes de hierro en los suelos las constituyen diversos minerales primarios ferromagnesianos, destacando los piroxenos, anfíboles, algunas variedades de granate, epidota, filosilicatos como biotitas y olivino. Una pequeña parte de hierro se incorpora a la estructura de los filosilicatos, en particular en los Minerales 2:1 o se compleja con la materia orgánica (Murad y Fischer, 1985).

El hierro en las rocas se presenta en estado divalente y se libera a través de una reacción combinada hidrolítica oxidativa del tipo (Besoin, 1985):

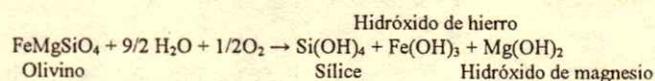


en la cual el oxígeno atmosférico capta el electrón:

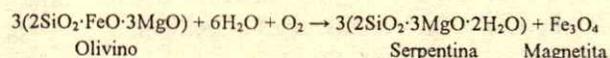


La oxidación provoca la pérdida de electrones del catión con lo que se modifican el tamaño y la carga del mismo. Ello causa un desequilibrio en la estructura del mineral, lo que obliga al catión a abandonar la red, dejando un hueco hacia donde puede ser atraído un H^+ , la solubilidad del hierro es radicalmente modificada por la oxidación. El Fe^{2+} en la forma catiónica o como hidróxido $Fe(OH)_2$ es relativamente fácil de remover del medio en solución; en cambio, ante la presencia de oxígeno y si el pH es superior a 3.5, el Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} que precipita como $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ de muy baja solubilidad (Ford, 1984).

La descomposición del olivino es un buen ejemplo de una oxidación asociada a una hidratación que da lugar a la formación de óxidos e hidróxidos de hierro:



En ocasiones aparecen, como productos intermedios, la serpentina y la magnetita, pero si se sigue oxidándose e hidratándose dará sucesivamente hematita y goethita o estilpnosiderita (Murad y Fisher, 1985):



El tamaño de los cristales de óxidos de hierro en suelos oscila entre 10 y 100 nm junto con los aluminosilicatos pobremente cristalinos, como son el alófono y las sustancias húmicas. Los óxidos de hierro se encuentran entre las partículas más pequeñas del suelo (Figura 2).

Influencia de las Propiedades Físicas y Químicas del Microambiente sobre los Óxidos de Hierro

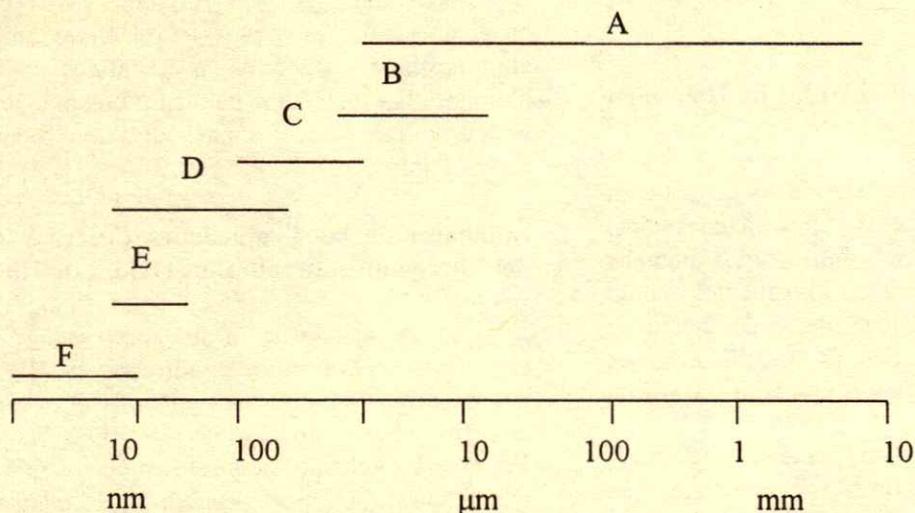
La principal forma en que se presenta el hierro en el suelo es como óxido e hidróxido $Fe(III)$ en forma de pequeños granos de mineral o revestimientos amorfos sobre otros minerales. Los minerales de $Fe(II)$ son solubles y persisten en suelos que presenten condiciones aerobias; cuando las condiciones se cambian, se oxida y se precipita como óxido $Fe(III)$ (Scheinost y Schwertmann, 1999).

La formación de óxidos de hierro en el suelo es afectada por la materia orgánica y por las bacterias, el hierro forma quelatos metálicos con la materia orgánica y algunas bacterias participan en el ciclo del hierro. La distribución de hierro extraíble depende de la presencia de la materia orgánica. Los ácidos húmicos del suelo son fuertemente adsorbidos o acomplejados con el hierro en $pH > 3$ (Duxbury *et al.*, 1989). El hierro debería ser el catión principal que se uniera a la carga negativa de la materia orgánica y de las arcillas, sin embargo, el hierro tiende a hidrolizarse dentro de innumerables formas: policationes, hidróxidos y óxidos (Zhang *et al.*, 1997).

Otros constituyentes del suelo que son adsorbidos por $Fe(III)$ son óxidos cristalinos, minerales arcillosos y oxihidróxidos de hierro y manganeso. En el Cuadro 4, se dan las constantes de adsorción para hierro en minerales arcillosos, sílice y materia orgánica.

La solubilidad del hierro en el suelo depende de la disolución de los oxihidróxidos de $Fe(III)$, de los procesos hidrolíticos, de la complejación del hierro y del potencial redox. En resumen, la solubilidad del hierro puede ser significativamente afectada por la formación de otros compuestos de hierro, como: sulfatos, sulfuros y carbonatos (Murad y Fischer, 1985; Schwertmann, 1990).

La solubilidad del $Fe(III)$ es controlada por muchos óxidos solubles presentes, como suelo- $Fe(OH)_3$, que gobiernan la actividad de $Fe(III)$ en el suelo. En esta discusión, suelo- $Fe(OH)_3$ es definida como una fase amorfa que tiene un mayor



A = Cuarzo, feldespato, mica, etc. B = Caolinita, gibbsita. C = Esmectitas
D = Lepidocrocita. E = Goethita, hematita. F = Ferrihidrita, alofano.

Figura 2. Comparación del tamaño de minerales del suelo (Schwertmann, 1990).

orden estructural que un precipitado reciente de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (amorfo).

Suelo- $\text{Fe}(\text{OH})_3$, magnetita, o siderita pueden controlar la solubilidad de $\text{Fe}(\text{II})$ en los suelos, dependiendo del potencial redox y del CO_2 . En condiciones oxidantes ($\text{pe} + \text{pH} > 11.5$), el

suelo- $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (el cual es compuesto intermedio en solubilidad para hidróxidos amorfos y óxidos cristalinos) controla la solubilidad; si el $\text{pH} < 11.5$ forma magnetita (Fe_3O_4) que es la fase estable hasta siderita (FeCO_3), la cual está determinada por la presión parcial de CO_2 (Schwertmann, 1990; Taylor, 1990).

Cuadro 4. Constante de adsorción para hierro.

Adsorbente	Concentración analítica (M)	pH	A_m^\dagger	K_L^\ddagger	A^\S
Arcillas					
Caolinita	$10^{-5.5} - 10^{-5}$	3	4.3	5.5	-
Saturada con Ca	$10^{-5.5} - 10^{-5}$	4	14.9	6.0	-
Forma Na	0 - 0.015	3	1430	2.6	-
Bentonita, forma Na	0 - 0.015	3	6180	2.8	-
Illita, forma Na	0 - 0.015	3	4920	2.9	-
Montmorillonita	$10^{-2.5}$	> 0.5	-	-	220
Forma Na	$10^{-2.5}$	> 1.0	-	-	260
		> 1.6	-	-	280
		> 2.1	-	-	280
Forma H	$10^{-2.5} - 10^{-2.2}$	-	460	4.2	-
Sílice					
SiO_2	$10^{-3.9}$	2.7	-	-	4.0
SiO_2	0 - $10^{-3.4}$	2.5	0.5	6.4	-
		3.0	1.0	6.7	-
Materia orgánica					
Ácido húmico	$10^{-4.3} - 10^{-3.3}$	2.4	1760	3.2	-

$^\dagger A_m$ = adsorción máxima de Langmuir ($\mu\text{mol g}^{-1}$); $^\ddagger K_L$ = constante de Langmuir ($\log \text{M}^{-1}$); $^\S A$ = adsorción ($\mu\text{mol g}^{-1}$).

Fuente: Bodek *et al.* (1988).

La reacción del hierro en los procesos de alteración depende del sistema Eh-pH del medio ambiente y del estado de oxidación de estos compuestos. Valores bajos de pH 5 y del potencial redox favorecen las formas ferrosas; pH de 8 ó valores redox crea un medio ambiente estable para hierro férrico. El potencial de electrodo para $\text{Fe}(\text{II})/\text{Fe}(\text{III})$ es -0.771 V (Bodek *et al.*, 1988).

En la Figura 3, se muestra un esquema de algunos de los parámetros físico-químicos que influyen en la dirección de la mineralización del hierro.

Los caminos químicos que se presentan son derivados de experimentos realizados en laboratorio y que pueden asociarse significativamente con las observaciones de campo.

La sustitución de aluminio en goethita se presenta de forma continua en los suelos (Taylor, 1990), sin embargo, ésta no puede ser sintetizada en el laboratorio a partir de un sistema de hidróxido $\text{Al}(\text{III})-\text{Fe}(\text{III})$. En condiciones ambientales, este sistema puede conducir únicamente a la formación de

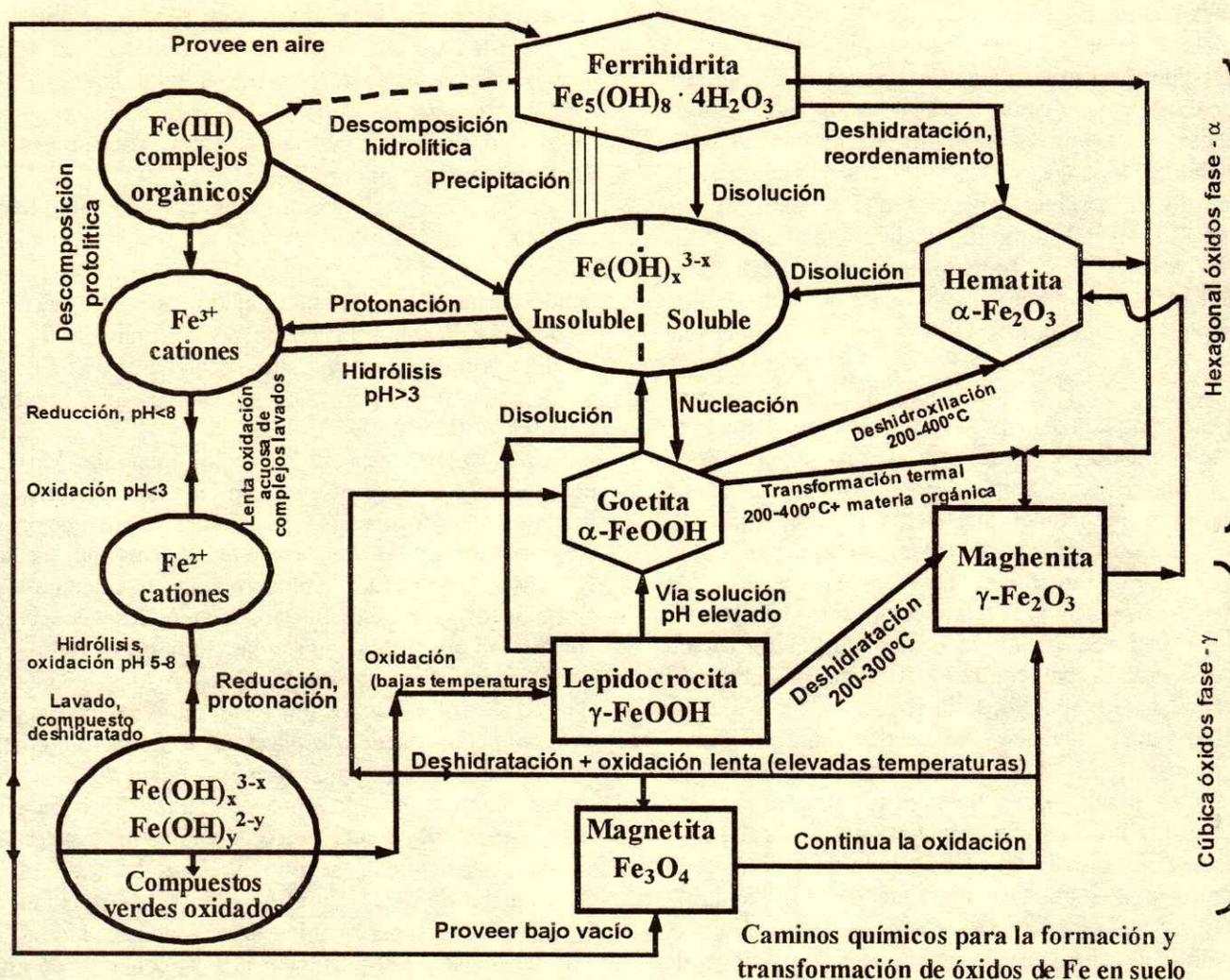


Figura 3. Caminos químicos para la formación y transformación de óxidos de hierro en el suelo (Taylor, 1990).

hematita-Al con valores muy bajos de relación Al/(Al+Fe). Por otro lado, el aluminio es causante de la formación de goetita durante la oxidación de un sistema Fe(II)-Al(III), en la ausencia de aluminio puede normalmente conducir a otras fases.

Los óxidos de hierro (goetita, lepidocrocita, magnetita, maghemita y ferrihidrita, cualquiera como producto final o como un precursor de goetita y/o hematita) pueden formarse a pH neutro a partir de la oxidación de un sistema de Fe(II) por cambios ligeros en el porcentaje de oxidación, concentración de hierro y temperatura.

Taylor (1990) mencionó que otros óxidos de hierro comunes en el suelo pueden ser transformados

a magnetita cuando se eleva la temperatura del suelo, ocasionado por un incendio de pastos o bosques. La temperatura necesaria para la transformación no puede lograrse a una profundidad mayor que 1 cm en pastos incinerados o mayor que 5 cm, en el caso de hojas secas. En suelos de Australia, se han encontrado cantidades considerables de material de magnetita, resultado directo de varias quemaduras.

Como puede observarse en la Figura 3, la formación de magnetita puede llevarse a cabo por la vía de compuestos green rust. Estos compuestos resultan de la combinación de Fe(II) e hidroxiespecies de Fe(III) a través de una oxidación controlada de un sistema Fe(II) oxidado debajo del agua para producir

goethita, lepidocrocita, ferrihidrita o maghemita, o combinaciones de estas fases, dependiendo de las condiciones en que se lleve a cabo la oxidación.

Es conocido que la lepidocrocita se presenta, en particular, en ambientes pedogenéticos de regiones húmedas y templadas. En diferentes condiciones ambientales, la lepidocrocita puede transformarse a un polimorfo de goethita, mientras que a temperaturas elevadas (250 °C) durante un incendio forestal, la lepidocrocita se transforma a maghemita, presentándose ésta en mayor cantidad en suelos tropicales y subtropicales (Gehring y Hofmeister, 1994).

Chiang *et al.* (1999) mencionaron que la presencia de lepidocrocita como óxido de hierro predominante en suelos puede ser el resultado de una temporada de lluvia alta (por ejemplo, precipitación anual de 3000 mm y una temperatura media anual de 10.3 °C), contenido de arcilla, hierro y aluminio alto, y un pobre drenaje en los horizontes profundos, lo que puede aumentar la reducción y la oxidación en los suelos.

Schwertmann (1990) mencionó que la formación de lepidocrocita requiere de Fe(II) como precursor. El Fe(II), el cual se derivó de la reducción de óxidos de Fe(III), aparentemente se oxidó para formar lepidocrocita. La lepidocrocita que se forma en horizontes B de suelos forestales no alterados, puede ser causada por la lixiviación de Fe(II) o Al desde el horizonte A con pH bajo, contenido alto de materia orgánica y en condiciones de reducción. La frecuencia de la reducción y oxidación en el suelo afecta el tamaño del cristal de los minerales de óxidos de hierro.

Chiang *et al.* (1999) indicaron que, en ausencia de citrato, los productos de precipitación de la oxidación de Fe(II) formados en pH 6 después de un periodo de 120 min fueron la goethita y pequeñas cantidades de lepidocrocita. Pequeñas cantidades de citrato en pH 6 pueden promover y estabilizar la formación de lepidocrocita. La lepidocrocita se presenta en suelos con drenaje pobre en áreas de clima templado o tropical con un amplio rango de pH.

Influencia de las Especies Cristalinas de Óxidos de Hierro sobre el Color de los Suelos

Los óxidos de hierro son empleados como indicadores de medio ambiente pedogenético por tres razones: a) incluyen algunos minerales, b) tienen diferentes colores y c) el tipo de mineral formado es influenciado por el medio ambiente (Schwertmann,

1993). Todos los óxidos de hierro presentan colores llamativos entre rojos, amarillos y pardos, y pueden ser identificados en el suelo; sin embargo, en una mezcla de colores fuertes (como el rojo sangre de la hematita) enmascara a los colores débiles, como es el caso del amarillo de la goethita (Scheinost y Schwertmann, 1999).

La hematita presente en el suelo es de color rojo con hues entre 7.5YR y 10YR, la goethita de color amarillo con hue entre 7.5YR y 2.5YR, la lepidocrocita de color anaranjado con un hue de 7.5YR. La ferrihidrita puede ser distinguida de la goethita porque ésta es más roja, hue de 5 a 7.5YR, y de la lepidocrocita por valores menores que o iguales a 6 (Schwertmann, 1993).

Estos colores específicos de los minerales varían con relación a su concentración, tamaño del cristal, grado de cementación y posibles sustituciones isomórficas. En suelos aerobios, óxidos de hierro (hematita, goethita, lepidocrocita, maghemita y ferrihidrita) son compuestos inmóviles de baja solubilidad que tienen colores entre amarillo y rojo.

En condiciones anaerobias, los óxidos de hierro pueden ser solubilizados por respiración bacteriana. El Fe²⁺ móvil puede desplazarse a zonas aerobias donde es oxidado para formar nuevos óxidos de hierro. Este proceso provoca una distribución heterogénea de FeO y color, mientras que, en condiciones aerobias, se presenta más homogénea la distribución de FeO₂. En el Cuadro 5, se presentan la forma y la presencia de color en los óxidos de hierro.

Scheinost y Schwertmann (1999) concluyeron que las muestras de goethita, alcaganeita y la hematita se separan claramente por el hue, mientras que la maghemita y la jarosita pueden ser distinguidas por su extremado value, y la lepidocrocita por su alto chroma.

En cuanto a los demás óxidos de hierro que presentan hues, values y chromas intermedios (ferroxita, ferrihidrita, akaganeita y schwertmanita), no pueden identificarse con seguridad por su color, debido a la semejanza en color, el cual se explica por la estructura semejante del cristal Fe-Fe; además, estos minerales presentan una mayor variabilidad en el color debido al tamaño de la partícula y su forma, a la agregación de partículas y a los defectos cristalinos o impurezas, que privan esta clasificación, basada en el color.

Los suelos que contienen hematita o lepidocrocita pueden ser diferenciados con seguridad de los suelos que contienen únicamente goethita.

Cuadro 5. Forma y presencia de óxidos de hierro cristalino y paracristalinos del suelo.

Grupo	Fórmula	Nombre	Sistema cristalino	Color	Presencia en suelos
Óxidos anhidros	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Hematita	Hexagonal	Rojo	Principalmente en suelos de zonas tropicales
	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Maghemita	Tetragonal	Pardo rojizo	Ocasionalmente en zonas templadas o paleosuelos
	Fe_3O_4	Magnetita	Cúbico	Negro	Principalmente en suelos de climas cálidos tropicales o subtropicales
Oxihidróxidos	$\alpha\text{-FeOOH}$	Goethita	Ortorrómico	Pardo amar.	Material primario no pedogenético
	$\gamma\text{-FeOOH}$	Lepidocrocita	Ortorrómico	Anaran.	Suelos de climas húmedos, templados. En suelos tropicales y suelos hidromórficos con climas de verano caliente
Óxidos paracristalinos	$\text{Fe}_3(\text{OH})_8\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Ferrihidrita	Romboédrica	Pardo rojizo	Suelos hidromórficos, no calcáreos o suelos bien drenados, climas de verano caliente
					Suelos ácidos de climas fríos o templados con abundante materia orgánica

Fuente: Besoain (1985).

Superficie Específica de los Óxidos de Hierro

El conocimiento de la estructura, de las propiedades y de la naturaleza de los óxidos de hierro se ha aumentado en los últimos años; estos conocimientos también indican las complejas relaciones que se establecen entre los óxidos y los otros componentes orgánicos e inorgánicos del suelo. La presencia de los óxidos de hierro en el suelo, en especial depositados como cubierta de las partículas minerales o infiltrados en agregados de arcilla (Figura 4), altera la carga eléctrica, modifica las propiedades de superficie e incrementa la capacidad amortiguadora del suelo. Los hidróxidos e hidroprotóxidos de hierro poseen amplia superficie, por lo tanto, en un medio ácido pueden absorber complejos de microelementos y, en un medio alcalino, cargas positivas adsorben aniones.

A la superficie, los óxidos de hierro en contacto con la fase líquida de un suelo se les denomina grupos funcionales hidróxidos. Algunas superficies desarrollan cargas a través de la desorción o adsorción, respectivamente de iones hidrógenos (H^+) u oxidrilos (OH^-). El signo y la magnitud de la carga pueden depender de la concentración de H^+ en un medio de fase líquida, y esta carga puede controlar las características de absorción y adsorción de los óxidos de hierro por un valor de compuestos iónicos y no iónicos. La carga también puede conducir a la interacción con otros sólidos de la fase del suelo resultando en una agregación y cementación de las partículas del suelo.

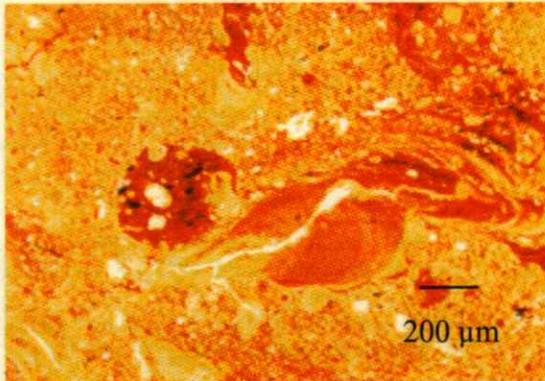
Pequeñas cantidades de ferrihidrita pueden proporcionarle al suelo, mayor área superficial

específica (200 a $500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) y una alta proporción de sitios activos, lo cual puede contribuir a un conjunto de propiedades del suelo (Childs, 1992). Greenland *et al.*, citados por Schwertmann (1990), estimaron que el área superficial de suelos rojos de Australia es de 150 a $300 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$.

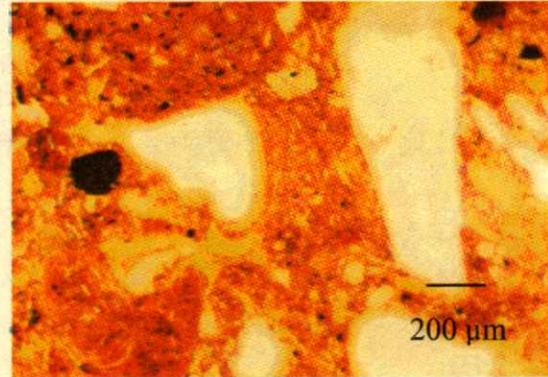
Borggaard, citado por Schwertmann (1990), mencionó que las fases cristalinas de los óxidos de hierro presentan una menor área superficial que los amorfos. Las ferrihidritas que tienen un tamaño de partícula de 3 a 7 nm presentan un área superficial mayor que el resto de los óxidos de hierro del suelo; valores que varían de 327 y $1082 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ de hierro extraído por EDTA se han reportado en suelos de Tasmania y Dinamarca. En cuanto al área superficial de suelos con goethita y hematita, ésta es del intervalo de 50 a $200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$.

Papel de los Óxidos de Hierro como Secuestrantes de Elementos Trazas y Contaminantes

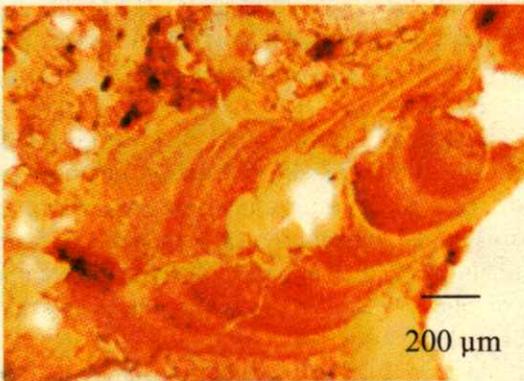
En muchos suelos ácidos, los óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos de hierro constituyen un grupo de coloides que son capaces de adsorber amplias cantidades de metales traza y tienen, además, una importante influencia en las concentraciones de los mismos en la solución del suelo. Estos coloides juegan un papel importante en la sorción y disponibilidad de fosfatos. La sorción de metales traza y de fosfatos en varios suelos está influenciada por la presencia de diferentes formas de hierro en cantidades variables y por el pH, la materia orgánica y otras propiedades del suelo (Zhang *et al.*, 1997).



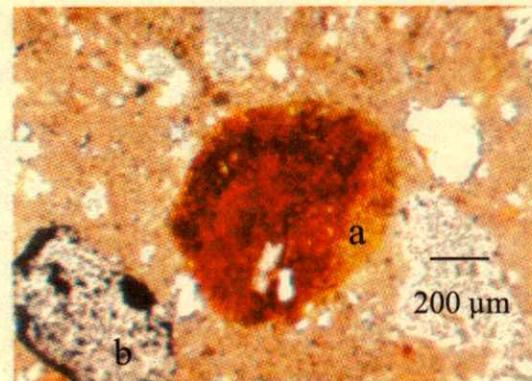
A) Presencia de nódulos Seudomorfofos de Fe/Mn y manganeso en disolución debido a procesos de hidromorfismo (Bt Typic paleustalf)



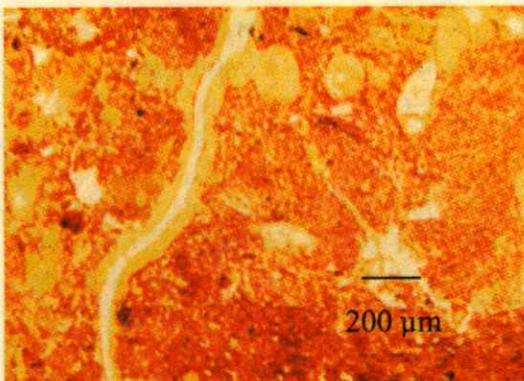
B) Revestimiento de ferriargilanes en partículas de minerales primarios (Bt Typic paleustalf)



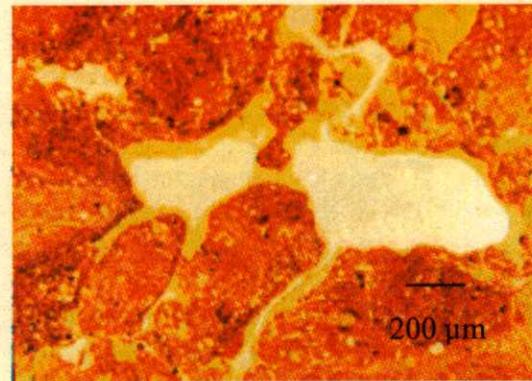
C) Microlaminación en un poro (Bt Typic paleustalf)



D) Nódulo ferromagnesiano (a) y mineral reemplazado en sus bordes por magnetita (b) (Bw Dystric eutrochrept)



E) Ferriargilanes revistiendo fisuras (Bt Typic Typic paleustalf)



F) Morfología de los pedes de bloques Subangulares revestidos de Ferriargilanes (Bt Typic paleustalf)

La elevada superficie específica de los óxidos de hierro y la forma en que se dispongan como cubiertas en torno a las partículas, implican que muchas propiedades de superficie de los suelos sean dependientes de los óxidos de hierro. Esta superficie adsorbe algunos aniones, como fosfato, molibdato y silicato, y oligoelementos como Cu, Pb, V, Zn, Co, Ni, además algunos otros elementos esenciales para las plantas (Besoain, 1985). Se ha demostrado que la adsorción de fosfatos en suelos es debida esencialmente a óxidos de hierro.

Parfitt, citado por Childs (1992), mostró que la adsorción de fosfatos por ferrihidrita natural es comparable con el alófono.

Los óxidos de hierro desempeñan un papel muy importante en los suelos; esto se debe a las propiedades específicas del metal y sus iones, y, en especial, a la facilidad con que cambian valencia y pueden formar complejos con numerosos productos orgánicos y minerales. Los óxidos de hierro son anfóteros con respecto a la reacción con los iones H^+ y OH^- , y a valores de pH ácidos los protones son retenidos por la superficie de los grupos funcionales Fe-OH que promueven el incremento de la carga positiva: $Fe-OH + H^+ = Fe-OH_2^+$, mientras que en pH alcalinos, el ión H^+ puede ser liberado y crear una carga negativa: $Fe-OH = Fe-O^- + H^+$.

Cargas positivas y negativas pueden ser balanceadas por cantidades equivalentes de aniones y cationes, respectivamente. El pH, en el cual la superficie transporta igual cantidad de cargas positivas y negativas, es llamado carga de punto cero (CPZ) o punto cero de carga neta.

El CPZ es una propiedad importante de los óxidos de hierro. En suelos que presentan estos óxidos, el pH puede influir en la adsorción de cationes y aniones, así como en arcillas dispersas en el agua, por la interacción entre los óxidos y la carga negativa de las arcillas silicatadas.

Agregación por Óxidos de Hierro

Varios autores han expresado que los óxidos de hierro son ineficaces como agentes de la estabilidad de agregados, debido a que estos óxidos se presentan en el suelo como partículas libres o discontinuas. Puede presentarse una correlación significativa falsa entre la estabilidad de agregados y los óxidos de hierro, a menos que se asegure por una inspección visual que algún tipo de óxido de hierro forme una película superficial sobre las partículas de las arcillas.

El efecto de la agregación de partículas por los óxidos de hierro varía de un suelo a otro y esta diferencia es causada por la cantidad y naturaleza de los óxidos en el suelo, unido a la pedogénesis del suelo.

Muggler *et al.* (1999) mencionaron que suelos de tipo Oxisol presentan una fuerte agregación de partículas primarias, culminando en una baja cantidad de arcillas dispersas en los horizontes B. Muchas de las partículas de arcilla, las cuales consisten en general de caolinita y/o gibbsita, son agregadas dentro de partículas secundarias de tamaño de 5 a 300 μm . Esta agregación se atribuye al efecto de óxidos de hierro pobremente cristalinos, pero al removerse parcial o totalmente se conduce a una dispersión de las partículas. Greenland *et al.*, citados por Muggler *et al.* (1999), establecieron que las partículas de la fracción arcilla tienden a ser partículas discretas que presentan un pequeño efecto sobre la agregación. Muggler *et al.* (1999) reportaron que la mayor agregación por óxidos de hierro se presenta en los agregados de tamaño de los limos.

Schwertmann y Taylor (1989) mencionaron los principales efectos de los óxidos de hierro en el suelo: a) una correlación significativa entre el porcentaje de agregados estables en agua y los óxidos de hierro; b) en observaciones realizadas en microscopio electrónico se presenta el óxido de hierro depositado sobre plaquetas de caolinita; c) se manifiesta una dispersión de agregados del suelo después de remover los óxidos de hierro con agentes reductores; y d) al adicionarse óxidos de hierro sintéticos se promueve el efecto de agregación en el suelo. En general, los óxidos de hierro estabilizan a las arcillas al disminuir la concentración crítica de coagulación, la dispersión de arcillas y las arcillas expandibles; en resumen, contribuyen a la estabilidad de los agregados y a la estructura del suelo.

La actividad catalítica de la ferrihidrita en algunas transformaciones orgánicas se atribuye a su área superficial específica alta. La interacción de los óxidos de hierro con las arcillas depende del pH; a bajos pH, los óxidos se precipitan sobre la superficie de los minerales arcillosos y, una vez formados estos revestimientos, son estables a pH elevados (Peacock y Rimmer, 2000).

La agregación estable en suelos oxidados puede atribuirse a una asociación entre óxidos de hierro y arcillas silicatadas. En general, estas uniones no pueden ser destruidas por fuerzas dispersivas, porque se requiere de una disolución de los óxidos de hierro.

Para la agregación se requiere de muy bajo contenido de óxidos de hierro; estos óxidos reaccionan con las partículas del suelo a través de las fuerzas de Coulomb y no Coulomb. La permanente carga negativa de los silicatos puede interactuar con la carga variable positiva de los óxidos de hierro.

La variación del pH influye en el sistema, directamente en la agregación al incrementar el área superficial de los óxidos de hierro (ferrihidrita > goethita) al disminuir el pH. Sin embargo, policones pequeños de hidróxido de hierro, con carga positiva alta es en particular efectiva, algunos cationes son estables únicamente a pH bajos.

En suelos, (al removerse los óxidos de hierro con ditionito, se presentó una dispersión de partículas finas) correlaciones estadísticas significativas tienden a ser encontradas entre el porcentaje de agregados estables en agua, con las propiedades estructurales y con el contenido de óxidos de hierro.

Se ha demostrado que se requiere de una mayor cantidad de óxidos de hierro en la cementación que en la agregación. En cementación, los óxidos de hierro desarrollan cristales entre la matriz de las partículas, donde este intercrecimiento del cristal puede conducir a una matriz estable y no dispersa (Childs *et al.*, 1990).

Hierro en la Planta

El hierro es un elemento necesario en la síntesis de clorofila y forma parte esencial del citocromo, el cual actúa como portador de electrones en la fotosíntesis y en la respiración. Sirve como un catalizador en la división celular y en los procesos de crecimiento. Forma parte esencial de la ferredoxina, de la nitrato reductasa y de la nitrogenasa; esta última durante la fijación biológica de nitrógeno y es, además, un activador de muchas otras enzimas. Su movilidad en la planta es muy baja y su contenido total varía de 20 a 3000 mg kg⁻¹, aunque el intervalo adecuado varía de 50 a 300 mg kg⁻¹. El hierro es absorbido por la raíz en forma activa como Fe²⁺ y Fe³⁺ o como quelato y como tal se transporta vía xilema y su movilidad es media (Castellanos *et al.*, 2000).

CONCLUSIÓN

El estudio de los óxidos de hierro en suelos de la República Mexicana no se ha efectuado con detalle, por tal motivo no se les ha valorado, ni se ha dado la importancia fundamental que tienen estos óxidos en la

pedogénesis, así como en las propiedades físicas, químicas y mineralógicas que se presentan en suelos tanto ácidos, como calcáreos e inundados, por lo que el presente documento pretendió dar un acercamiento al conocimiento y a la trascendencia que tienen los óxidos de hierro en el suelo.

LITERATURA CITADA

- Acevedo-Sandoval, O., M. Cruz-Sánchez y E. Cruz-Chávez. 2002. Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico. *Agrociencia* 36: 401-409.
- Besoain, E. 1985. *Minerales de arcillas de suelos*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Bodek, I., W.J. Lyman, W.F. Reehl y D. Rosenblatt. 1988. *Environmental inorganic chemistry, properties, processes and estimation methods*. Pergamon Press. New York.
- Castellanos, J.Z., J.X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. 2a ed. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Celaya, Guanajuato, México.
- Chiang, H.C., M.K. Wang, K.H. Hwang, N. White y J. Dixon. 1999. Mineralogy of B horizons in alpine forest soils of Taiwan. *Soil Sci.* 164: 111-122.
- Childs, C.W. 1992. Ferrihydrite: A review of structure, properties and occurrence in relation to soils. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 155: 441-448.
- Childs, C.W., R.W.P. Palmer y C.W. Ross. 1990. Thick iron oxide pans in soils of Taranaki, New Zealand. *Austr. J. Soil Res.* 28: 245-257.
- Dahlgren, R.A. 1994. Quantification of allophane and imogolite. pp. 430-451. *In: Amonette, J.E. y L.W. Zelazny (eds.). Quantitative methods in soil mineralogy*. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Duxbury, J.M., M.S. Smith y J.W. Doran. 1989. Organic matter as a source and a sink of plant nutrients. pp. 33-68. *In: Coleman, D.C., J.M. Oades y G. Uehara (eds.). Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. University of Hawaii Press. Honolulu, Hawaii.
- Ford, I.N. 1984. Dinámica mineral en el suelo, algunos puntos de referencia para su estudio. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, estado de México.
- Gehring, A.U. y A.M. Hofmeister. 1994. The transformation of lepidocrocite during heating: A magnetic and spectroscopic study. *Clays and Clay Minerals* 42: 409-415.
- Heck, R.J. y A.R. Mermut. 1999. Mechanisms and rates of iron dissolution from Brazilian plinthustalfts by dilute hydrochloric and ascorbic acids. *Soil Sci.* 164(4): 242-251.
- Kairichev, I.S. 1984. *Prácticas de Edafología*. Trad. al español por Esther Vicente. Editorial Mir. Moscú.
- Lindsay, W.L. 1985. Solubility and redox equilibria of iron compounds in soils. pp. 37-62. *In: Stucki, J.W., B.A. Goodman y U. Schwertmann. Iron in soils and clay minerals*. NATO ASI Series C217. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, The Netherlands.
- Mehra, O.P. y M.L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrato system buffered by sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7: 317-327.

- Muggler, C.C., C. van Griethuysen, P. Buurman y T. Pape. 1999. Aggregation, organic matter and iron oxide morphology in oxisols from minas gerais, Brazil. *Soil Sci.* 164: 759-770.
- Murad, E. y W.R. Fischer. 1985. The geobiochemical cycle of iron. pp. 1-18. *In: Stucki, J.W., B.A. Goodman y U. Schwertmann (eds.). Iron in soils and clay minerals.* NATO ASI Series C217. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, The Netherlands.
- Parfitt, R.L. y C.W. Childs. 1988. Estimation of forms of Fe and Al: A review and analysis of contrasting soils by dissolution and Mossbauer methods. *Austr. J. Soil Res.* 26: 121-144.
- Peacock S. y D. Rimmer. 2000. The suitability of an iron oxide-rich gypsum by-product as a soil amendment. *J. Environ. Quality* 29(6): 1969-1975.
- Prasetyo, B.H. y R.J. Gilkes. 1994. Properties of iron oxides from red soils derived from volcanic tuff in west Java. *Austr. J. Soil Res.* 32: 781-794.
- Römheld, V. 1991. The role of phytosiderophores in acquisition of iron and other micronutrients in graminaceous species: An ecological approach. pp. 159-166. *In: Chen, Y. y Y. Hadar (eds.). Iron nutrition and interactions in plants.* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- Scheinost, A.C. y U. Schwertmann. 1999. Color identification of iron oxides and hydroxysulfates: Use and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1463-1471.
- Schwertmann, U. 1985. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. pp. 267-308. *In: Stucki, J.W., B.A. Goodman y U. Schwertmann (eds.). Iron in soils and clay minerals.* NATO ASI Series C217. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, The Netherlands.
- Schwertmann, U. 1990. Some properties of soil and synthetic iron oxides. pp. 57-84. *In: De Boodt, M.F., M.H.B. Hayes y A. Herbillon (eds.). Soil colloids and their associations in aggregates.* NATO ASI Series B214. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, The Netherlands.
- Schwertmann, U. 1993. Relations between iron oxides, soil color and soil formation. pp. 51-70. *In: Special Publication 31.* Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Schwertmann, U. y R.M. Taylor. 1989. Iron oxides. pp. 379-438. *In: Dixon, J.B. y S.B. Weed (eds.). Minerals in soil environments.* Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Smith, B.F.L. 1994. Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods. pp. 333-357. *In: Wilson, M.J. (ed.). Clay mineralogy spectroscopic and chemical determinative methods.* Chapman and Hall. London, UK.
- Taylor, R.M. 1990. Some observations on the formation and transformation of iron oxides. pp. 85-104. *In: De Boodt, M.F., M.H.B. Hayes y A. Herbillon (eds.). Soil colloids and their associations in aggregates.* Plenum Press. New York.
- Wild, A. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Zhang, M., A.K. Alva, Y.C. Li y D.V. Calvert. 1997. Fractionation of iron, manganese, aluminium and phosphorus in selected sandy soils under citrus production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61(3): 794-801.
- Zinder, B., G. Furrer y W. Stumm. 1986. The coordination chemistry of weathering. II Dissolution of Fe(III) oxides. *Geochim. Cosmochim. Acta* 50: 1861-1869.

SALINIDAD EN EL BAJO RIO CONCHOS: APORTES Y TENDENCIAS

Salinity Variations Along the Lower Rio Conchos: Sources and Trends

Mélida Gutiérrez^{1†} y Enrique Carreón-Hernández²

RESUMEN

La salinidad en la zona norte de México se ha acrecentado de manera significativa en las últimas décadas, amenazando la productividad agrícola de varias cuencas, entre ellas la del río Conchos. Una investigación más completa a este respecto es necesaria para determinar si este incremento es un fenómeno temporal, periódico o permanente. En este estudio, se determinaron las variaciones de salinidad, tanto temporales, como a lo largo del bajo río Conchos, usando para ello datos reportados durante los últimos 20 años por agencias gubernamentales y varios investigadores. Fuentes de origen de esta salinidad incluyen procesos como la evaporación y la disolución de material geológico, a los que se añade salinidad proveniente de drenes de irrigación y la causada por procesos menos evidentes, como la infiltración de agua subterránea salina. La salinidad a lo largo del bajo río Conchos aumenta gradualmente con incrementos súbitos en algunos puntos. Uno de éstos se debe a la descarga de un dren de irrigación a la altura de Delicias, donde el contenido de sodio aumenta en 40% y el calcio en 10%. En 1997, la salinidad a lo largo del bajo río Conchos, expresada en términos de conductividad eléctrica, aumentó de 0.26 dS m⁻¹ a la altura de Camargo a 2.03 dS m⁻¹ después de recibir descargas de irrigación cerca a Delicias, para luego disminuir a 1.89 dS m⁻¹ en Cuchillo Parado y a 1.86 dS m⁻¹ a su desembocadura. La variación de la salinidad del bajo río Conchos con respecto al tiempo fluctúa de manera considerable y presenta una tendencia de aumento.

Palabras clave: Río Bravo, presa Luis L. León.

¹ Department of Geography, Geology and Planning, Southwest Missouri State University, Springfield, MO 65804, USA.

[†] Autor responsable: (meg434f@smsu.edu)

² Departamento de Manejo de Recursos Naturales, Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua, 31031 Chihuahua, México.

Recibido: Mayo de 2003. Aceptado: Mayo de 2004.

Publicado como ensayo en *Terra Latinoamericana* 22: 499-506.

SUMMARY

Salinity in Northern Mexico has increased significantly in the past decades, menacing the agricultural productivity of this area. A more complete investigation is needed to determine if this is a temporary, cyclic, or a permanent occurrence. Temporal and downstream variations of salinity along the lower Rio Conchos are reported here. The data utilized for this study were obtained from reports issued by governmental agencies and other researchers. Salinity sources include processes such as evaporation and weathering. In addition, irrigation return drains contribute salts to the river, and also other less evident processes such as infiltration of saline groundwater. Salinity along the lower Rio Conchos increases gradually, with a few sudden increases at specific points. One of these points is a return of irrigation drain near Delicias where the sodium content increases by 40% and calcium by 10%. In 1997, salinity, expressed as conductivity, increased from 0.26 dS m⁻¹ in Camargo to 2.03 dS m⁻¹ after receiving irrigation drains near Delicias and then decreased to 1.89 dS m⁻¹ at Cuchillo Parado and to 1.86 dS m⁻¹ near its confluence to the Rio Grande. Salinity fluctuates greatly with time and has an increasing trend.

Index words: Rio Grande, Luis L. León dam.

INTRODUCCIÓN

Aunado al problema de la escasez de agua y a la alta tasa de crecimiento poblacional a lo largo de la frontera norte, el contenido de sales en ríos y reservorios es motivo de preocupación, debido a los efectos nocivos que altas concentraciones de éstas representan, en especial para el sector agrícola (Miyamoto *et al.*, 1995).

La salinidad en el bajo río Conchos es en gran parte de origen natural, debido al material geológico con alto contenido de sales que aflora en esta parte de la cuenca, así como a las altas tasas de evaporación que imperan (INEGI, 1999). Otras fuentes potenciales de salinidad incluyen drenes agrícolas y aguas

residuales que se incorporan al río en varios puntos. La contribución de cada una de estas fuentes es difícil de determinar, debido a la complejidad del sistema y a la cantidad limitada de datos de monitoreo.

Un aumento en la concentración de sales en los suelos es un producto indeseado, ya que, en general, conlleva una reducción drástica de su productividad (Miyamoto *et al.*, 1995). La salinidad es un término general que incluye a las sales disueltas presentes. Un incremento en salinidad en el agua de riego afecta la presión osmótica y la capacidad de absorción de agua de las plantas. Algunos componentes de la salinidad son, además, tóxicos para las plantas, entre ellos sodio, cloruro y boro, por lo que su contenido en aguas utilizadas para irrigación se monitorea escrupulosamente. Incrementos en la salinidad del agua y suelo pueden asimismo afectar de forma negativa la zona ribereña, la cual es vital para la fauna y flora silvestre en zonas áridas y semiáridas.

Este estudio tiene como objetivo la determinación de las variaciones de salinidad, tanto temporales, como a lo largo del bajo río Conchos, usando datos reportados por agencias gubernamentales e investigadores durante los últimos 20 años. Estos resultados se comparan, además, con la salinidad de ríos aledaños y se discuten sus posibles fuentes de origen. La relación y cuantificación de cada una de las variables que afectan la salinidad son aspectos clave en la planeación de un mejor manejo del recurso.

REVISIÓN DE LITERATURA

Salinidades elevadas pueden afectar la actividad agrícola dependiendo de la cantidad y del tipo de sales presentes, así como de la resistencia del cultivo a la presencia de estas sales (Rhoades *et al.*, 1992). Una salinidad mayor que 1000 mg L⁻¹ daña los cultivos de hortalizas, mientras que una salinidad entre 1000 y 6000 mg L⁻¹ puede utilizarse para irrigar cultivos más resistentes, los cuales incluyen algodón, trigo y algunos tipos de pastizales, teniendo precaución de que la tierra esté bien drenada para evitar una acumulación de sales en los suelos (Rhoades *et al.*, 1992).

Dentro de la cuenca del bajo río Conchos se encuentran importantes zonas de riego donde se cultiva algodón, trigo, sorgo, maíz, alfalfa, hortalizas, frijol, nuez y chile. La calidad del agua y extensión de áreas cultivadas en la cuenca del bajo río Conchos se documenta en forma general (Kelly, 2001), y específica en cuanto a su hidrología (INEGI, 1983,

1999). Varios reportes binacionales (IBWC, 1994; TNRCC, 1994; HARC, 2000) y páginas web, actualizadas regularmente (NASQAN <http://water.usgs.gov/nasqan/>; Comisión Internacional de Límites y Aguas <http://www.ibwc.state.gov/CRP/monstats.htm>) incluyen datos sobre el bajo río Conchos. Datos sobre calidad de aguas y salinidad de suelos se encuentran en Gutiérrez y Borrego (1999) y Gutiérrez *et al.* (2004), respectivamente.

En el río que recibe las aguas del río Conchos, el río Bravo, la salinidad (reservorios Elephant Butte, Amistad y Falcón) se ha aumentado (Miyamoto *et al.*, 1995; Phillips *et al.*, 2003), afectando, además, la distribución de especies de peces, encontrándose cada vez más peces de tipo estuarino (agua salada) río arriba (Edwards y Contreras-Balderas, 1991; Contreras-Balderas y Lozano-Vilano, 1994). La salinidad del río Bravo ha sobrepasado, en ocasiones, 1000 mg L⁻¹ de sólidos totales (límite para agua potable en el estado de Texas) (Lurry *et al.*, 1998).

Ubicación del Área

La cuenca del río Conchos (68 606 km²) (INEGI, 1999) se encuentra casi en su totalidad dentro del estado de Chihuahua, ocupando 26% de la extensión territorial de éste. El río Conchos nace en las estribaciones de la Sierra Madre Occidental en Chihuahua y desemboca en el río Bravo, cerca de la ciudad fronteriza de Ojinaga (Figura 1), luego de cruzar gran parte del desierto chihuahuense.

El río Conchos desemboca en el río Bravo y, a partir de este punto, la cantidad y calidad de aguas fronterizas es cuidadosamente monitoreada por oficinas binacionales de la Comisión Internacional de Límites y Aguas. Debido a que el caudal del río Bravo se reduce hasta casi desaparecer 130 km aguas abajo de El Paso/Cd. Juárez, es decir 341 km antes de la desembocadura del Conchos al Bravo (Fort Quitman), el aporte del río Conchos de 909 millones de m³ anuales (promedio entre 1969 y 1989) contribuye la mayor parte del agua que lleva el río Bravo en este tramo.

La precipitación en la cuenca del Conchos es de tipo monzón, siendo julio, agosto y septiembre los meses de lluvia. La precipitación afecta el gasto del río de una manera significativa, aun cuando la distribución e intensidad de estas lluvias está lejos de tener un patrón predecible debido a su naturaleza esporádica, corta duración e intensidad variable.

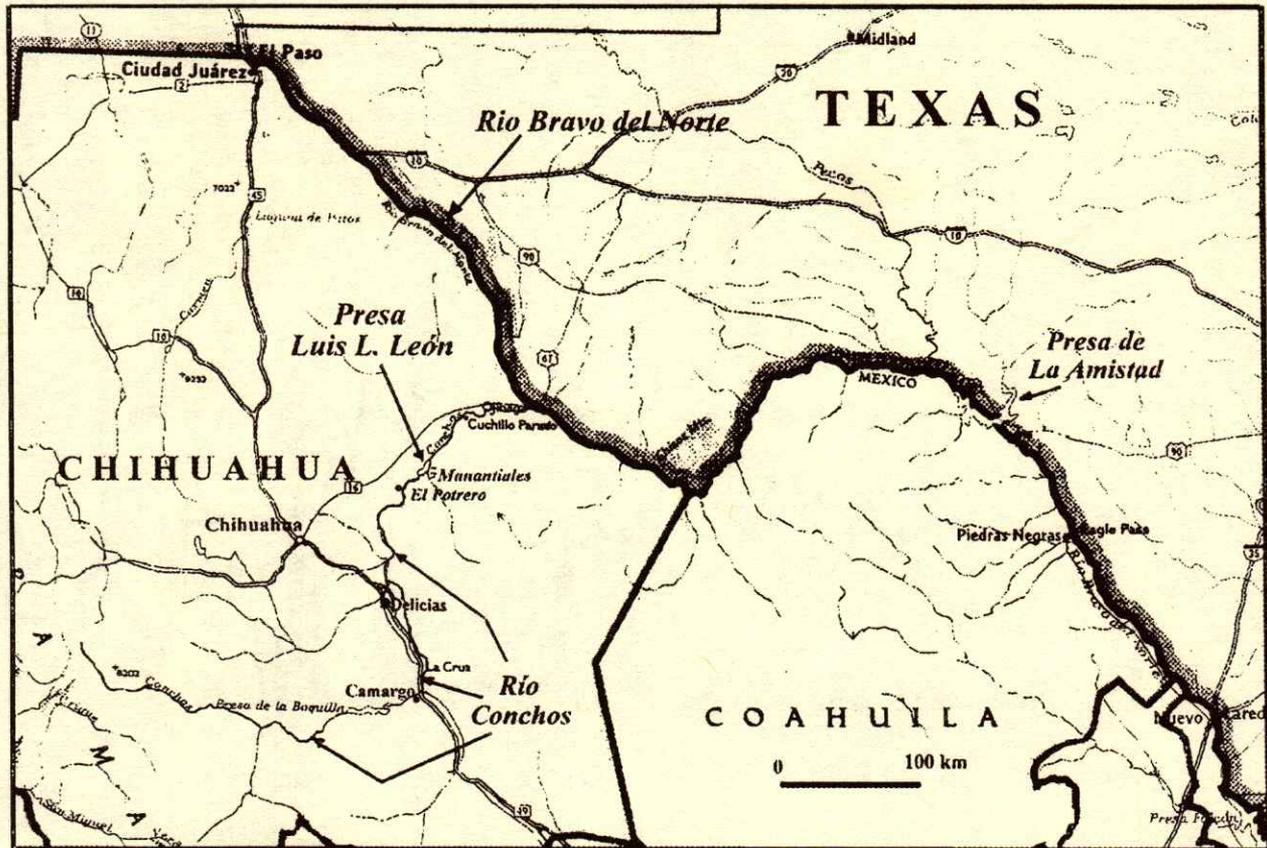


Figura 1. Ubicación de los lugares mencionados.

Estudios concernientes a la mejor identificación de periodos de lluvia y sequía se han intensificado en los últimos años (Velasco-Montes *et al.*, 2000) <http://www.sequia.edu.mx>.

Salinidad en la Cuenca del Bajo Río Conchos

La salinidad del río es una función del gasto y, en consecuencia, de la precipitación. Sin embargo, la relación entre precipitación y gasto no es una relación directa (Figura 2), debido al almacenamiento y manejo del agua en varias presas, evaporación e infiltración.

Los puntos a lo largo del río Bravo donde se han encontrado las concentraciones más altas de sales son Fort Quitman [2000 a 5000 mg L⁻¹ de sólidos disueltos totales (SDT)] y la confluencia del río Pecos (2000 a 4000 mg L⁻¹ SDT). Aunque el contenido de sales en el río Conchos no alcanza aún estas concentraciones tan elevadas, su ubicación lo coloca dentro de esta área susceptible, ya que su

desembocadura está localizada justamente entre estos dos puntos (Figura 1).

El manejo de las aguas del río Conchos ha sido motivo de tensión entre los usuarios de agua del río Bravo, principalmente respecto a la cantidad de agua aportada a su desembocadura, la cual está sujeta al Tratado Internacional de 1944. Es importante notar que, de acuerdo con datos históricos, el aporte del río Conchos mejora la calidad del río Bravo en cuanto a su concentración de sales y sustancias tóxicas (Miyamoto *et al.*, 1995; Lurry *et al.*, 1998) al suministrar agua de relativamente buena calidad. La reducción del aporte del río Conchos durante los noventa, adjudicada a una sequía extrema en esta cuenca, disminuyó este efecto de dilución en una forma significativa, ocasionando que se mantuviera la alta salinidad en el río Bravo y aumentara el contenido de sales en el reservorio Amistad de 690 mg L⁻¹ de sólidos disueltos totales (SDT), en 1993, a 848 mg L⁻¹, en 2000. Sin embargo, la salinidad de este último disminuyó a 680 mg L⁻¹ SDT, en 2002, lo que

MÉTODOS

Los datos de salinidad utilizados en este estudio se tomaron de reportes públicos, los cuales incluyen reportes anuales publicados por la Comisión Internacional de Límites y Aguas que datan de 1889 a la fecha (IBWC), mapa de aguas superficiales (INEGI, 1983), varios reportes binacionales (IBWC, 1994; TNRC, 1994; HARC, 2000), un estudio de calidad del agua del río Conchos (Gutiérrez y Borrego, 1999) y varios estudios de salinidad en el río Bravo (Miyamoto *et al.*, 1995; Phillips *et al.*, 2003). Para el río Bravo se cuenta con datos web que se actualizan de forma continua; NASQAN con datos de 1996 a la fecha <http://water.usgs.gov/nasqan/> y IBCW con datos de 1956 a la fecha <http://www.ibwc.state.gov/CRP/monstats.htm>. No todas estas fuentes contienen todos los parámetros aquí mencionados. Algunos reportes contienen sólo datos de conductividad eléctrica, mientras que los más completos contienen conductividad eléctrica, SDT, cationes y aniones.

La salinidad del agua se expresa, en general, en su conductividad eléctrica (en dS m^{-1}), o como total de sólidos disueltos (SDT) (en mg L^{-1}). A su vez, los SDT se obtienen de los sólidos que resultan de la evaporación completa de una muestra de agua o sumando cada uno de los iones causantes de salinidad (cloruros, sodio, calcio, etc.). En este último tipo de medición se obtiene una mejor evaluación de la salinidad, ya que se conoce la contribución de cada uno de los iones, con las que pueden calcularse relaciones como Cl/SO_4 , Cl/Sr , Ca/Al y $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$, que son muy útiles para establecer el origen de la salinidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 1 muestra valores de conductividad y cationes a lo largo del río Conchos (Gutiérrez y Borrego, 1999) en el segmento del río Conchos comprendido entre la Presa La Boquilla a Cuchillo Parado. Las concentraciones muestran un incremento gradual, excepto por algunos puntos donde se registra un aumento súbito en alguno de sus componentes, principalmente notorios en el área de Delicias (drenes agrícolas) y a la altura de la Presa Luis L. León (sales naturales).

El Cuadro 1 muestra que estos dos incrementos se deben a dos fuentes de salinidad, como lo muestra la proporción de iones calcio y sodio, magnificándose esta diferencia una vez que se determina la relación $\text{Na}/(\text{Ca} + \text{Na})$. El valor de esta fracción aumenta gradualmente aguas abajo, debido a la evaporación, para luego disminuir súbitamente de 0.86 a 0.44 meq L^{-1} a la altura de la presa Luis L. León. Este último lugar corresponde a la entrada del río a la zona de evaporitas situada al este del área geológica denominada Plataforma de Aldama (DeFord y Haenggi, 1970), donde abundan el yeso (fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y otros minerales evaporíticos. Esta diferencia se observa también en la relación Ca/Al en el mismo cuadro. En cuanto a su origen, estas sales pueden ser aportadas por varios arroyos (dos afluentes grandes convergen en esta área: el arroyo Grande y el arroyo Las Víboras) o por infiltraciones subterráneas que convergen en el reservorio de la presa. Para estimar la contribución de cada una de estas posibles fuentes de salinidad, se tomaron varias muestras de aguas subterráneas que afloran como manantiales y una muestra de agua de pozo poco profundo (noria) cerca de este reservorio.

Cuadro 1. Conductividad eléctrica (CE), calcio y sodio a lo largo del río Conchos (Junio 1997).

	CE	Ca^{2+}	Na^+	$\frac{\text{Na}^+}{(\text{Ca}+\text{Na})}$	$\frac{\text{Ca}^+}{\text{Al}}$
	dS m^{-1}	----- mg L^{-1} -----			
Presa La Boquilla	0.24	28	13	0.42	132
Camargo	0.26	37	15	0.59	90
La Cruz	1.25	191	65	0.46	292
Delicias	0.73	152	124	0.74	426
Dren de irrigación (antes)	1.68	142	193	0.82	393
Dren de irrigación (después)	2.03	156	270	0.86	326
Presa Luis L. León	1.05	67	118	0.86	2050
San Pedro	1.39	242	55	0.44	2111
Cuchillo Parado	1.89	319	41	0.31	1769

† Concentraciones en meq L^{-1} .

Los manantiales Chorreras, El Atascadero y Las Minas se encuentran bastante cercanos uno del otro y muy cerca de la presa Luis L. León, mientras que el cuarto manantial (sin nombre) se encuentra aguas arriba del arroyo Las Víboras. Los resultados muestran una diferencia marcada en la composición de los cuatro manantiales (Cuadro 2). Aunque el agua de los tres manantiales cercanos a la presa Luis L. León es relativamente salina, la cantidad de sales es tres veces menor que la del río Conchos y con la misma proporción de calcio y de sodio, lo que hace improbable que estos manantiales sean los responsables del incremento de salinidad. Un resultado similar se obtiene del agua de noria en El Potrero. Esta noria se encuentra a las orillas del río aguas arriba del reservorio y tiene una profundidad de 3 m. Al igual que los tres manantiales mencionados, su concentración de sales es proporcional a la del río Conchos. Sin embargo, el manantial sin nombre muestra una elevada concentración de calcio como la que se espera encontrar para explicar el incremento de salinidad en este tramo del río y, de acuerdo con su ubicación, puede asumirse que este incremento se debe al material evaporítico del área.

Estos resultados sugieren que el aumento en conductividad eléctrica y calcio del río Conchos a la altura de la presa Luis L. León se debe principalmente a un aporte de sales durante avenidas de los arroyos

vecinos y, en menor grado, al aporte de soluciones salinas subterráneas. Para verificar esta aseveración, se necesita obtener muestras representativas de agua en estos arroyos durante una avenida, lo cual es sumamente difícil de realizar, ya que el caudal en el arroyo crece considerablemente durante un corto intervalo de tiempo. Una sugerencia para solventar este problema es la instalación de instrumentos de muestreo debidamente anclados.

Una manera de determinar la tendencia de la salinidad es utilizando los valores de salinidad en reservorios de las presas, ya que, de esta manera, se obtiene un valor representativo de un periodo de tiempo más largo que neutralice incrementos súbitos. En la presa Luis L. León (también conocida como El Granero) se observa una disminución de 27% en la salinidad entre 1983 y 1997 (Cuadro 2). Aunque el tiempo de residencia estimado para este reservorio es de un año, sólo dos valores de salinidad son insuficientes para determinar una tendencia. Además, la cantidad de agua almacenada en el momento que se mide el valor de conductividad es un factor importante para determinar las tendencias de salinidad reales. La cantidad de agua almacenada en este reservorio varía cuantiosamente, de acuerdo con análisis de imágenes de satélite (Gutiérrez *et al.*, 2004).

Los datos de salinidad y gasto del río Conchos son más abundantes a su confluencia con el río Bravo,

Cuadro 2. Conductividad eléctrica (CE) de tres manantiales que descargan a la presa Luis L. León y puntos cercanos. Muestras tomadas en 1997 y 2001 se complementan con valores publicados en INEGI (1983).

Lugar y fecha de muestreo	CE	SDT [†]	Ca ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
	dS m ⁻¹		mg L ⁻¹				
Manantial Chorreras							
Jun. 1983	0.64	432	48	63	152	94	57
Oct. 2001	0.61	n.d.	62	53	n.d.	n.d.	n.d.
Manantial El Atascadero							
Jun. 1983	0.93	556	38	110	183	104	99
Manantial Las Minas							
Jun. 1983	1.05	700	43	73	207	292	21
Manantial sin nombre [‡]							
Jun. 1983	3.20	2748	508	75	256	294	291
Río Conchos (El Potrero)							
Jun. 1983	1.46	891	44	187	207	355	60
Oct. 2001	2.46	n.d.	149	342	n.d.	n.d.	n.d.
Noria (El Potrero)							
Jun. 1983	2.19	1416	110	314	256	563	142
Oct. 2001	2.16	n.d.	164	272	n.d.	n.d.	n.d.
Presa Luis L. León							
Jun. 1983	1.45	863	42	183	189	344	67
Jun. 1997	1.05	n.d.	67	118	n.d.	n.d.	n.d.

[†]SDT = total de sólidos disueltos. [‡]Descarga en zona de evaporitas hacia el arroyo Las Víboras. n.d. = no hay datos.

debido a estaciones de monitoreo binacionales que complementan la información obtenida en otras partes del río. La relación de datos, incluyendo salinidad y gasto entre 1980 y 1998, se presentan en el Cuadro 3. Cabe mencionar que, tanto la salinidad, como el gasto no son valores promedio para estos meses, sino promedio de un número n de días. Los datos se separaron por trimestre para resaltar variaciones estacionales de gasto, las cuales suelen ser muy drásticas. Los valores de salinidad (promedio de n días) varían entre 1.05 y 2.09 dS m^{-1} . Una vez graficados los datos de salinidad vs. tiempo para cada trimestre, se calculó una línea recta que representara la tendencia con el método de regresión de mínimos cuadrados y se obtuvo una pendiente positiva para cada uno de los trimestres. Aunque esta pendiente no pasa de ser sólo una estimación de la tendencia, ya que los 20 años no están representados en su totalidad, los resultados obtenidos fueron 28.8 y 27.2 para los trimestres de enero-marzo y abril-junio, respectivamente, y valores de 12.5 y 13.0 para julio-septiembre y octubre-diciembre, respectivamente. La diferencia entre el primer par de valores y el segundo se explica con base en el mayor gasto presente en los meses de lluvia julio-diciembre que desvanece los efectos de un aumento en el contenido de sales, mientras que el menor gasto en los meses secos los concentra.

Para determinar si la aparente disminución en la concentración de sales a mayor gasto es una variación proporcional, se determinó el coeficiente de correlación para las 600 observaciones gasto-salinidad que comprenden el Cuadro 3 y se obtuvo un valor de -0.43, lo que indica una correlación moderada. Es

evidente, entonces, que existen fuentes adicionales de salinidad que complican el establecimiento de una relación simple de la salinidad como función únicamente del gasto. Las posibles fuentes de estas sales incluyen el aporte por sales depositadas a las orillas del río y en arroyos, soluciones salinas subterráneas, evaporación, variaciones en el nivel freático, o una combinación de éstas.

Una pregunta a considerar es: ¿Qué efectos pueden tener estas sales en actividades económicas de la región, principalmente del tipo agrícola? La disminución del rendimiento de cultivos agrícolas en el norte de México se ha adjudicado, en gran parte, a la clorosis, la cual consiste en una baja disponibilidad de micronutrientes, como hierro y zinc, y que se agudiza por medio de reacciones alcalinas en suelos calcáreos. La clorosis de las plantas que crecen en suelos calcáreos es un fenómeno muy complejo. Al parecer, el método más apropiado y eficiente para combatir esta deficiencia es la aplicación de ácido sulfúrico en dosis bajas, solo o con Fe, Mn o Zn en el agua de riego (Lee-Rodríguez *et al.*, 1998). Dentro del distrito de riego 005 (Delicias) existen pequeñas áreas con suelos sódico-salinós que no son productivos (INEGI, 1999; Gutiérrez *et al.*, 2004).

Un análisis de los posibles efectos de un aumento en la salinidad del agua de irrigación en suelos agrícolas es entonces prioritario y hace necesario un monitoreo de salinidad en los ríos y reservorios de la región, así como la determinación del aporte de sales a estos últimos por medio de arroyos. No menos importante es el efecto que un aumento en la salinidad produciría en la flora y fauna silvestre de las áreas ribereñas, ríos y reservorios. Además del monitoreo

Cuadro 3. Salinidad del río Conchos a su desembocadura expresada como conductividad eléctrica (dS m^{-1}), seguida del gasto ($m^3 s^{-1}$) en paréntesis y el número de muestreos n (Fuente: IBWC, 1994).

	1980	1983	1985	1987	1990	1993	1998
Enero a marzo	1.51 (12.1) $n = 3$	1.40 (5.7) $n = 23$	1.40 (13.4) $n = 30$	1.30 (24.3) $n = 4$	1.46 (14.5) $n = 32$	1.73 (5.8) $n = 25$	2.09 (1.4) $n = 1$
Abril a junio	1.46 (19.3) $n = 3$	1.31 (19.4) $n = 26$	1.46 (14.6) $n = 33$	1.13 (37.0) $n = 37$	1.80 (9.3) $n = 29$	1.05 (69.8) $n = 8$	1.78 (3.5) $n = 14$
Julio a septiembre	1.30 (31.9) $n = 3$	1.51 (9.1) $n = 16$	1.31 (30.7) $n = 38$	1.08 (40.2) $n = 41$	1.07 (174.4) $n = 33$	1.32 (50.3) $n = 37$	1.79 (4.5) $n = 14$
Octubre a diciembre	1.47 (13.3) $n = 3$	1.34 (13.3) $n = 26$	1.31 (30.9) $n = 24$	1.41 (211.9) $n = 27$	1.56 (98.2) $n = 26$	1.25 (13.1) $n = 20$	2.08 (1.8) $n = 3$

de los ríos, una herramienta útil a considerar en estudios futuros es el análisis de imágenes de satélite para medir la degradación de suelos en áreas semiáridas, extensión de las áreas afectadas y para predecir el posible efecto en la calidad de agua del río al implementarse programas de control de salinidad.

CONCLUSIONES

- El análisis de las fuentes potenciales de salinidad en el bajo río Conchos indica que gran parte (hasta 50%) es de origen natural y que la contribución de sales por medio de arroyos puede ser significativa, dada la gran cantidad de evaporitas que afloran en el área. De acuerdo con la información con la que se cuenta, los drenes de irrigación son una contribución importante de sales, seguida por aportes salinos superficiales (o subterráneos) que se forman por disolución de evaporitas presentes en el área.

- La salinidad del bajo río Conchos parece variar de una manera cíclica con una ligera tendencia al aumento, aunque más datos son necesarios para establecer una relación concreta. Un monitoreo de la salinidad que permita la identificación y cuantificación de las fuentes de salinidad es necesario para el control de la salinidad y el desarrollo sostenible de esta cuenca.

LITERATURA CITADA

- Contreras-Balderas, S. y M.L. Lozano-Vilano. 1994. Water, endangered fishes, and development perspectives in arid lands of Mexico. *Conservation Biol.* 8(2): 379-387.
- DeFord, R.K. y W.T. Haengi. 1970. Stratigraphic nomenclature of cretaceous rocks in northeastern Chihuahua. pp. 175-196. *In: Seewald, K. y D. Sundeen (eds.). The geologic framework of the Chihuahua tectonic belt.* West Texas Geological Society. Midland, TX.
- Edwards, R.J. y S. Contreras-Balderas. 1991. Historical changes in the ichthyofauna of the lower Rio Grande (Rio Bravo del Norte), Texas and Mexico. *Southwestern Nat.* 36: 201-212.
- Gibbs, R.J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science* 170: 1088-1090.
- Gutiérrez, M. y P. Borrego. 1999. Water quality assessment of the Rio Conchos, Chihuahua, Mexico. *Environ. Intern.* 25: 573-583.
- Gutiérrez, M., K. Mickus y E. Johnson. 2004. Watershed assessment along a segment of the Rio Conchos in northern Mexico using satellite images. *J. Arid Environ.* 56: 395-412.
- HARC. Houston Advance Research Center. 2000. Water and sustainable development in the binational lower Rio Grande/Rio Bravo basin. Houston Advance Research Center-Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey-Center for Global Studies. Woodland, TX.
- IBWC. International Boundary and Water Commission. 1994. Binational study regarding the presence of toxic substances in the Rio Grande/Rio Bravo and its tributaries along the boundary portion between the United States and Mexico. El Paso, TX.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1983. Carta hidrológica de aguas superficiales: Delicias, Chihuahua. Escala 1:250 000. México, D.F.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1999. Estudio hidrológico del Estado de Chihuahua. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Kelly, M.E. 2001. The Rio Conchos: A preliminary overview. Texas Center for Policy Studies. Austin, TX.
- Lee-Rodríguez, V., M.J. Beltrán-Fonseca, J.N. Lerma-Molina y L.P. Licón-Trillo. 1998. Aplicación de ácido sulfúrico en el riego corrige la clorosis férrica de los cultivos en suelos calcáreos. *Terra* 16: 149-161.
- Loh, I.C. 1988. Observed changes in the inflow salinity to Wellington Reservoir, Western Australia. Report WS34. Water Authority of Western Australia. Perth, Australia.
- Lovich, J.E. y R.C. de Gouvain. 1998. Saltcedar invasion in desert wetlands of the southwestern United States: Ecological and political implications. pp. 447-467. *In: Majumdar, S.K. (ed.). Ecology of wetlands and associated systems.* Pennsylvania Academy of Science. Philadelphia, PA.
- Lurry, D.L., D.C. Reutter y F.C. Wells. 1998. Rio Grande NASQAN Program, Fact Sheet FS-083-98. United States Geological Survey. Austin, TX.
- Miyamoto, S., L.B. Fenn y D. Swetlik. 1995. Flow of salts and trace elements in the Rio Grande System. Texas Agriculture Experimental Station-Texas Water Resources Institute. College Station, TX.
- Phillips, F.M., S.K. Mills, J.M.H. Hendrickx y J.F. Hogan. 2003. Environmental tracers applied to quantifying causes of salinity in arid-region rivers: Results from the Rio Grande, southwestern USA. pp. 295-312. *In: Alsharhan, A.S. y W.W. Wood (eds.). Water resources perspectives: Evaluation, management and policy.* Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Rhoades, J.D. 1992. Instrumental field methods of salinity appraisal. pp. 231-238. *In: Topp, G.C., W.D. Reynolds y R.E. Green (eds.). Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice.* Special Publication 30. American Society of Agriculture-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Rhoades, J.D., A. Kandiah y A.M. Mashali. 1992. The use of saline waters for crop production. Irrigation and drainage Paper 48. Food and Agricultural Organization. Rome, Italy.
- TNRCC. Texas Natural Resource Conservation Commission. 1994. Water quality in the Rio Grande basin. Austin, TX.
- Velasco-Montes, S., L.A. Aceves-Navarro, R. Arteaga-Ramírez, M.A. Vázquez-Peña, G. Crespo-Pichardo y L.A. Urbina-Estrada. 2000. Monitoreo y análisis de las sequías en el estado de Chihuahua. Memorias X Congreso Nacional de Irrigación. Chihuahua, Chih., México.
- <http://www.chapingo.mx/anei/xcongreso/Congreso.html>

HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN LA AGREGACIÓN DEL SUELO Y SU ESTABILIDAD

Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Soil Aggregation and its Stability

M.C.A. González-Chávez^{1†}, M.C. Gutiérrez-Castorena¹ y Sara Wright²

RESUMEN

El objetivo de esta revisión es documentar la participación de los microorganismos del suelo, con énfasis en los hongos micorrizicos arbusculares (HMA) en la formación y estabilidad de agregados en el suelo. La participación de la biota del suelo, en este proceso, se sugirió a finales de la década de los treinta y adquiere relevancia tras el concepto de naturaleza jerárquica del desarrollo de los agregados. Este modelo estableció varios mecanismos en la formación y estabilización en relación con escalas espaciales y temporales; sin embargo, la aportación más importante fue en los años ochenta, al considerar a los HMA como contribuyentes mayores en el proceso de agregación. Las evidencias mostraron que el micelio externo de los HMA participa en el mecanismo de atrapar y enlazar las partículas primarias para el desarrollo de agregados y su estabilidad. Además que la asociación HMA-raíces contribuye a la agregación del suelo, así como el tipo de cultivo y las prácticas de manejo. Más recientemente, se descubrió que todos los HMA producen una proteína, que se denominó glomalina, la cual se acumula en las hifas, raíces y en el suelo, fortaleciendo aún más la participación de este tipo de hongos en la estructura del suelo. Con base en lo anterior se sugiere el uso de los HMA dentro de las prácticas de conservación de suelos, con la idea de minimizar la erosión y mantener la fertilidad, aunado a su relevante contribución en la captura de C en el suelo.

Palabras clave: Estructura del suelo, sustancias microbianas, glomalina, labranza.

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

[†] Autor responsable (carmeng@colpos.mx)

² Soil Microbial Systems Laboratory, United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service. Beltsville MD 20705, USA. swright@ba.ars.usda.gov.

Recibido: Julio de 2003. Aceptado: Junio de 2004.
Publicado como ensayo en *Terra Latinoamericana* 22: 507-514.

SUMMARY

This paper reviews the participation of soil microorganisms in the formation and stabilization of soil aggregates, with special emphasis on arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). Biota participation was suggested at the end of the thirties, but its importance became relevant after the hierarchy model of aggregate formation. The model was based on different formation and stabilization mechanisms occurring at spatial and time scales. The participation of AMF as transcendental contributors in soil aggregation processes was the most important soil biota consideration during the decade of the eighties. External mycelium of AMF was shown to be the relevant fungal structure participating in this process by trapping and binding soil particles. Hence, these fungi along with plant roots and crop and soil management practices are important factors contributing to soil aggregation. Recently, the discovery of glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of all AMF and accumulated on hyphae, roots and soil, gives stronger support for the participation of these fungi in soil aggregation. All this information suggests the use of AMF in soil conservation practices may help to minimize soil erosion, enhance soil fertility and contribute to C sequestration in the soil.

Index words: Soil structure, microbial substances, glomalin, tillage.

ESTRUCTURA Y ESTABILIDAD DE AGREGADOS

La estructura del suelo es la expresión de la agregación, orientación y organización de las partículas primarias del suelo en agregados de mayor tamaño (Hillel, 1982); los agregados son unidades secundarias o conjuntos estables de partículas de suelo enlazadas o cementadas por sustancias orgánicas, óxidos de hierro, carbonatos, arcillas o sílice (Brady y Weil, 1999) y son el resultado de factores y procesos,

como: textura, contenido de materia orgánica, humedad del suelo, condiciones climáticas e impacto de las actividades del hombre en el suelo.

Hillel (1982) mencionó que los agregados son estables cuando las partículas individuales del suelo se mantienen unidas durante diferentes condiciones (humedecimiento, secado, congelamiento, descongelamiento, crecimiento de la planta y actividad microbiana).

Las características de un suelo con agregados estables son: adecuada infiltración, aireación, capacidad de retención de agua, menor encostramiento en la superficie del suelo y mayor resistencia a la erosión (Brady y Weil, 1999). Asimismo, la agregación determina la actividad biológica, en especial el crecimiento de raíces y movimiento de fauna, y es un factor importante en la funcionalidad del suelo. Sin embargo, a diferencia de la textura, propiedad innata del suelo, los agregados se pueden destruir (modificar la estructura) por el cambio y tiempo de uso de las prácticas de cultivo.

El suelo se agrega esencialmente por dos procesos: físico-químico y biológico. En el físico-químico están involucrados la atracción entre partículas arcillosas y cationes de la solución del suelo (Ca^{2+} , Fe^{2+}) o coloides orgánicos (humus) y por expansión-contracción de los materiales arcillosos. Los agregados que se forman bajo esos procesos son poco estables en agua. En el caso del proceso biológico es importante la actividad de los organismos, por ejemplo: excrementos de mesofauna, atrape de partículas por parte de las raíces y pegamentos producidos por hongos y bacterias; los agregados que se forman son en general estables en agua.

Tisdall y Oades (1982) propusieron un modelo jerárquico en la formación de agregados de acuerdo con los tamaños de las partículas y donde participan los procesos físico-químicos y biológicos. En este modelo, los microagregados se unen para producir agregados de mayor tamaño, donde las diferentes clases de materia orgánica son las responsables de sostener los niveles de organización y, por lo tanto, también varía la estabilidad. Los microagregados son muy estables debido a la participación de material húmico aromático recalcitrante que se asocia con compuestos amorfos de Fe y Al, como resultado tienen mayor influencia sobre las propiedades físicas y químicas del suelo (Voronin y Sereda, 1976); en contraste, los macroagregados son menos estables por la participación de raíces, hifas y polisacáridos de

plantas y microorganismos, los cuales están fuertemente influenciados por los factores del suelo.

Se ha generado abundante información teórica sobre el material orgánico como agente cementante, no obstante, aún no hay un entendimiento claro de los mecanismos que están involucrados en su formación. Se menciona que actúa como un agente cementante que varía de acuerdo con su persistencia en el suelo y, por lo tanto, determina la estabilidad de los agregados.

PARTICIPACIÓN DE MICROORGANISMOS EN LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS

La función de los microorganismos del suelo en la formación y estabilidad de la estructura del suelo ahora se reconoce; por ejemplo, en las raíces, en particular en los pelos radicales, las hifas de los hongos exudan polisacáridos y otros compuestos orgánicos formando una malla pegajosa que une a las partículas individuales del suelo y microagregados para formar macroagregados. Las bacterias también producen polisacáridos y otros materiales. Muchos de estos pegamentos resisten a la disolución por agua y no sólo permiten la formación de agregados, sino le dan estabilidad por un periodo largo (Mehta *et al.*, 1960; Acton *et al.*, 1963; Brady y Weil, 1999).

Los polisacáridos son polímeros no cargados, de más de 10 unidades de azúcar, unidos por un enlace funcional acetal; se producen rápidamente, pero también se descomponen rápidamente (Tisdall y Oades, 1982) y pueden estar actuando como cementantes o pegamentos (Oades, 1989). Los primeros trabajos que se reportaron sobre este tema fueron realizados por Aspiras *et al.* (1971) y Tisdall y Oades (1980), quienes mostraron que los polisacáridos que producen las hifas son los que estabilizan a los agregados, en especial si éstas no se rompen y sus partes más internas no se exponen (Allison, 1968, 1973). Como resultado, los polisacáridos pueden permanecer intactos dentro de los agregados y no ser disponibles al ataque microbiano. Otro mecanismo por el cual los polisacáridos pueden persistir en el suelo es por la formación de complejos con metales o uniéndose a grupos activos de otros compuestos orgánicos y a minerales arcillosos (Allison, 1968).

A la asociación entre raíces y hongos se le llama micorriza, la cual es en especial efectiva para estabilizar los agregados en corto tiempo. Sims (1990) mencionó que los polisacáridos los producen hifas de varios tipos de hongos. Entre las gomas de origen

fúngico que participan en la agregación existen el sclerogun y la glomalina. El primero es un polisacárido extracelular producido por un hongo saprobio *Sclerotium* que se adsorbe sobre las superficies de partículas (Chenu, 1989), como la montmorillonita o caolinita y la glomalina la cual es una glicoproteína que las hifas de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) exudan, de carácter hidrofóbico y que se acumula sobre las partículas de arcilla. El nombre de la glomalina se derivó de la antigua ubicación de estos hongos dentro del orden de los Glomales (Morton y Benny, 1990).

PARTICIPACIÓN DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Los HMA son hongos cosmopolitas que se asocian en las raíces de la mayoría de las especies vegetales (> 85%) y les proporcionan múltiples beneficios: mayor transporte de nutrimentos, protección en condiciones de estrés, como: patógenos de hábitos radicales, salinidad, sequía, acidez y elementos tóxicos (Smith y Read, 1997). También son responsables de influenciar la diversidad vegetal y productividad en ecosistemas naturales (Van der Heijden *et al.*, 1998).

Los HMA tienen una importante ventaja con respecto a otros hongos y microorganismos del suelo, debido a que tienen un abastecimiento constante directo de C orgánico desde su hospedante. Sus hifas parecen permanecer viables por mayor tiempo, por lo que su participación en la estabilidad de agregados se considera de mayor importancia.

Las hifas micorrízicas son el componente mayor de los hongos del suelo donde se desarrollan plantas, en particular cuando son micorrízicas (Kabir *et al.*, 1997); esto es, son susceptibles de la colonización por estos hongos. De la longitud hifal en el suelo, los HMA contribuyen con una enorme proporción. En comparación con la raíz, el área de la superficie por unidad de volumen de las hifas de HMA puede ser aproximadamente 100 veces más (Harley, 1989). Esta cantidad de hifas varía en los ecosistemas y presenta valores promedio comunes de 0.5 a 5 m (de hifa por gramo de suelo) en suelos cultivados y de hasta 20 m en suelos no perturbados.

Se ha reportado que la simbiosis micorrízica tiene influencia sobre la estabilidad de agregados precisamente por esta gran cantidad de hifas, pero la contribución directa por las plantas colonizadas o por

los hongos no se entiende claramente. Los primeros trabajos al respecto fueron los de Miller y Jastrow (1990), quienes encontraron una relación entre la longitud y densidad de hifas de HMA colonizando raíces de *Lolium perenne* y el diámetro medio geométrico (DMG) de los agregados estables en agua (AEA). Thomas *et al.* (1993) estudiaron el efecto de las raíces de soya colonizadas o no, y el de hifas de HMA sobre los AEA, utilizando un sistema de macetas con compartimientos. Estos investigadores encontraron que la cantidad de AEA fue significativamente mayor en el compartimiento de las raíces micorrizadas (5.1%) y el de las hifas (4.3%), en comparación con los valores observados en raíces no colonizadas (3.9%) y el tratamiento sin planta (3.4%).

Previo a este experimento, se planteó la hipótesis de que las hifas de los HMA eran importantes agentes enlazadores en el suelo (Tisdall, 1991; Miller y Jastrow, 1992), pero después de los trabajos de Thomas y colaboradores, el papel de éstas en la agregación se comprobó y se reconoció su importancia.

Tisdall (1991) encontró que las hifas de HMA juegan un papel relevante en la agregación del suelo, debido principalmente a dos mecanismos: una acción mecánica, que participa en la unión de partículas, y una acción cementante por la presencia de polisacáridos extracelulares. La acción mecánica recae en el micelio externo de los hongos, el cual es un importante agente de enlace, al participar en el envolvimiento de las partículas y producción de agentes cementantes, que incrementan la resistencia a la erosión (Miller y Jastrow, 1992).

En el caso de los polisacáridos extracelulares, éstos actúan como gomas donde las partículas pueden estar adheridas, debido a que las hifas micorrízicas exudan productos que se almacenan y acumulan en su superficie (Figura 1) (González-Chávez, 2000). Uno de estos productos fúngicos, presentes sólo en HMA, es la glomalina (Wright y Upadhyaya, 1996).

Dodd *et al.* (2000) observaron que la arquitectura del micelio de los HMA varía entre géneros. Esta característica puede influir diferencialmente en el papel de los géneros de HMA en la agregación del suelo. Las especies de la familia Gigasporaceae forman redes hifales muy finas y pueden desempeñar un papel importante para atrapar las partículas del suelo (Tisdall, 1991; Miller y Jastrow, 1992), mientras que las especies del género *Glomus*, al formar hifas corredoras más gruesas, pueden facilitar mayor flujo de nutrimentos a la planta.

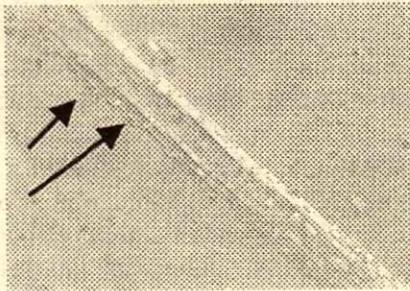


Figura 1. Hifa de *Glomus claroideum* BEG-134 que muestra acumulación de material extracelular. (Observación al microscopio de contraste de fases 40 x) (González-Chávez, 2000).

Las raíces sirven como sitios hospederos de los HMA, pero el hospedante influye diferencialmente sobre los hongos y tiene efecto directo sobre el suelo. Raíces finas (0.2 a 1 mm) permiten agregación directa, mientras que raíces muy finas (< 0.2 mm) parecen favorecer el crecimiento de HMA y otros microorganismos más efectivamente. Estas interacciones necesitan que se examinen con más detenimiento para determinar los mecanismos involucrados.

Las bacterias del suelo se asocian al micelio externo de los HMA y están embebidas en la capa externa de la pared, la cual es mucilaginoso. Se conoce poco acerca de las propiedades de este mucigel, pero se ha observado que este material es acumulable y que el grosor de la pared hifal se incrementa con la edad (Figura 1). Con base en los reportes de Wright y Upadhyaya (1996) y en estas propiedades del mucigel, este componente parece ser la glomalina. Esta información sugiere que las hifas de HMA, otros microorganismos del suelo y la planta pueden actuar en forma sinérgica en la formación y estabilización de agregados.

En resumen, los procesos por los cuales los HMA participan en la agregación del suelo serían: 1) enlazamiento físico por desarrollo extensivo de las hifas externas en el suelo para crear un esqueleto estructural que participa en la adherencia de partículas del suelo; 2) enlazamiento químico, debido al mucigel (glomalina) que las hifas producen y excretan en las raíces colonizadas y en el suelo; 3) creación de condiciones adecuadas para el desarrollo de raíces e hifas externas; 4) involucramiento de microagregados en macroagregados pequeños y la creación de la estructura del macroagregado; 5) protección contra los procesos de excesivo secado y humedecimiento de los agregados de los diferentes niveles jerárquicos, debido al carácter hidrofóbico de la glomalina; y 6) creación

de condiciones adecuadas para el desarrollo de otros microorganismos de la rizosfera que están involucrados en la formación y estabilidad de agregados.

CARACTERÍSTICAS DE LA GLOMALINA

Los resultados de Wright y Upadhyaya (1996) son los que más información han dado sobre agentes cementantes en el suelo. Estos autores descubrieron, durante un intento por encontrar una prueba inmunológica que auxiliara en la taxonomía de HMA, que las hifas con crecimiento activo, de todos los HMA, producen una proteína a la cual denominaron glomalina.

Esta proteína pertenece al grupo de las glicoproteínas, con oligosacáridos que contienen N (Wright *et al.*, 1998), la cual posee características de lectinas con moderada a fuerte aglutinación a succinil-concavalina A, aglutininas de *Glycine max* y *Triticum vulgare*, y con débil aglutinación a *Lens culinaris* (Wright y Upadhyaya, 1996). Además, tiene aproximadamente 60% de carbohidratos y puede estar presente en los agregados en cantidades de tres a 10 veces mayores que los carbohidratos extraídos con agua caliente, pero la glomalina no se extrae en estas condiciones. Lo anterior significa que es una molécula compleja que requiere para su extracción de un tratamiento drástico (citrate de sodio 20 a 50 mM y uso de autoclave por 30 min a 1 h o más). Esto también sugiere que es una molécula estable y resistente a la descomposición, sin embargo, no hay muchos detalles de sus propiedades moleculares.

Como prueba para detectar la glomalina en material hifal, raíces y suelo, Wright y Upadhyaya (1996) produjeron un anticuerpo monoclonal de hongos en activo crecimiento utilizando un ensayo de inmunofluorescencia, el cual facilitó su identificación. Esta prueba inmunológica mostró que la glomalina se deposita en la pared hifal más externa (Figura 2a), en las raíces colonizadas (Figura 2b), las partículas del suelo o del sustrato de crecimiento (Figura 2c) y sobre macroagregados (Figura 2d). Esta proteína parece tener actividad cementante estable que reduce la ruptura de macroagregados durante los eventos de humedecimiento y secado del suelo. Asimismo, es una proteína insoluble en su estado natural y con posible carácter hidrofóbico; más aún, puede permitir la penetración de aire y un eficiente drenaje de agua, así como cubrir los agregados y proteger el material iniciando la agregación, minerales del suelo, otros

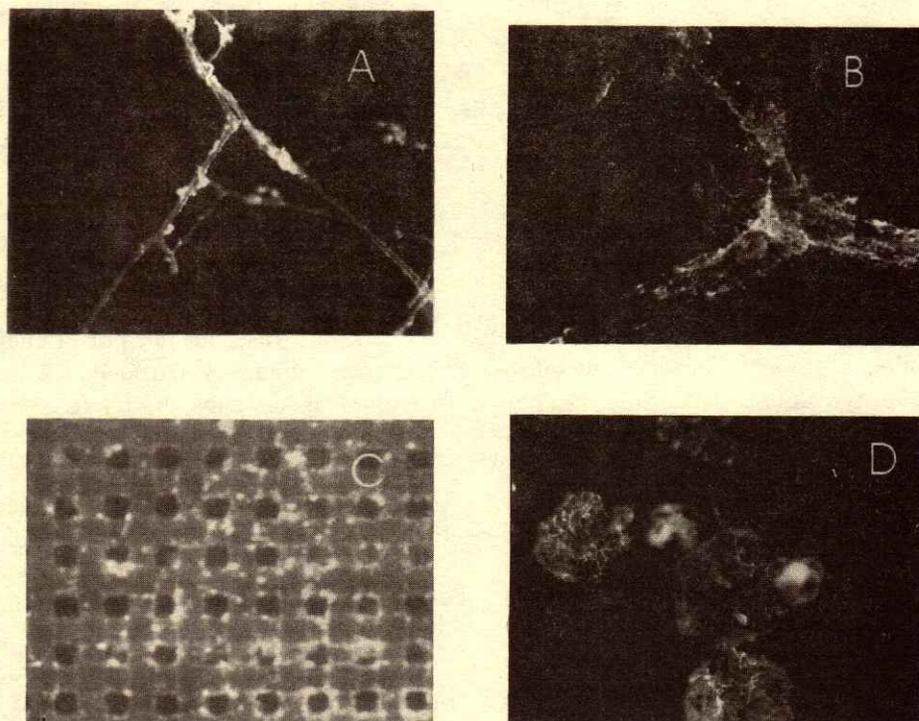


Figura 2. Glomalina, en hifas, raíces y agregados, que se revela por inmunofluorescencia (reacción con el anticuerpo monoclonal 32B1). El color blanco en las hifas y en la superficie es glomalina. A) Hifas externas de hongos arbusculares con glomalina (100x). B) acumulación de glomalina en una raíz de sorgo activamente colonizada por *Glomus mosseae* (50x). C) Glomalina depositada en mallas de nylon de un cultivo de propagación (100x). D) Glomalina en la superficie de un agregado del suelo (25x).

microorganismos y materia orgánica (Wright y Upadhyaya, 1998).

Miller y Jastrow (2000) sugirieron que la glomalina, al cubrir a los agregados, impide el movimiento del agua en los poros dentro de la estructura del agregado y los hace más estables. La asociación de partículas de arcilla unidas a los polisacáridos se ha ilustrado convincentemente con microscopía electrónica (Marshall, 1976; Tisdall y Oades, 1979). Es probable que el potencial de presión que ejerce el agua en los poros internos del agregado se disminuya con el polisacárido y evite que las arcillas se expandan y que los agregados se rompan. Con este mismo esquema, la glomalina puede funcionar; sin embargo, esta hipótesis requiere confirmación.

El almacén de glomalina en el suelo se deriva de la proteína producida directamente por las hifas de los HMA, la presente en las raíces colonizadas y la excretada al suelo (Figura 2). Para su cuantificación, el análisis se basa en la determinación de proteínas totales, glomalina fácilmente extraíble (GFE) y glomalina total (GT). Los valores de proteínas totales

se utilizan como un parámetro confiable, debido a que los extractos crudos representan en su mayoría el contenido de glomalina. Para la GFE, la glomalina se libera fácilmente por extracción y calentamiento en autoclave; esta fracción considera proteína de recién producción. La GT involucra a la proteína que se produce, excreta y acumula por un período mayor, por lo que se requiere de numerosas extracciones para obtener el mayor rendimiento de proteína.

Wright y Upadhyaya (1998) reportaron concentraciones de GT de 4.8 a 21 mg g⁻¹ de suelo. Sin embargo, Nichols (2003) mencionó que estas concentraciones pueden ser aun mayores, debido a que, en algunos suelos, la glomalina se enlaza fuertemente a partículas del suelo y estos valores pueden estar subestimados.

Nichols (2003) reportó que la vida media de la glomalina puede ser entre siete y 42 años; siendo mayor a la vida media de diferentes productos del suelo de origen microbiano. De esta manera, esta molécula, al estar fuertemente atrapada dentro de micro y macroagregados, representa un importante reservorio de C en el suelo.

Wright y Upadhyaya (1998) y Rillig *et al.* (2001) reportaron que la glomalina se asocia con Fe, el cual puede ser el cromóforo que imparte el color a los extractos de suelo resultantes con citrato de sodio, que son pardo rojizos. Wright (2000) demostró que la glomalina puede contener desde 1 a 9% de Fe. Tisdall y Oades (1982) y Emerson y Greenland (1990) mencionaron que los materiales asociados con metales polivalentes y polímeros están involucrados en la persistencia de los agregados.

Wright y Upadhyaya (1998) trabajaron con suelos de Estados Unidos, principalmente Ultisoles, Alfisoles, Inceptisoles y algunos Molisoles. Estos autores encontraron que los suelos de bosques con pH ácidos presentaron el más alto contenido de glomalina, mientras que en suelos calcáreos hay poca glomalina. La explicación se refirió a que los suelos presentaron deficiencias de Fe. Los suelos de Texas están limitados por agua (régimen de humedad cercano al arídico), hay poca producción de materia orgánica, además el pH es alcalino; condiciones ambientales más limitativas para el desarrollo de los hongos y la formación de agregados, que el contenido de Fe en el suelo.

La información anterior se relaciona con el comportamiento de la glomalina en cuatro órdenes de suelo; sin embargo, la Taxonomía de Suelos de la Escuela Americana (Soil Survey Staff, 1999) reportó 12 órdenes de suelos, por lo que falta mucho que estudiar sobre esta glicoproteína en las diferentes condiciones ambientales. Al respecto, Nichols (2003) mencionó que es necesario entender más sobre las propiedades físico-químicas de enlace de la glomalina en el suelo para comprender mejor por qué algunos tipos de suelo requieren numerosas extracciones.

Por otra parte, cuando se identificó la glomalina, se cuestionó si esta glicoproteína variaba en el mismo suelo y con diferentes tipos de labranza. Franzluebbers *et al.* (2000) encontraron que la distribución y estabilidad de los agregados es mayor en pastizales y con labranza de conservación. Wright *et al.* (1999) reportaron que en el sistema de labranza tradicional la producción de glomalina disminuye, no así en campos de maíz con labranza cero. Aunque hay una ligera tendencia a aumentar la glomalina en un sistema de labranza de conservación, el porcentaje de agregados estables es inferior con respecto al de los pastizales, debido principalmente al corto tiempo en que el sistema se implantó (cuatro años). No obstante, la labranza cero es una actividad agrícola recomendable para incrementar la producción de la

glomalina y, como ya se mencionó, ésta mejora la estabilidad de agregados.

RECIENTES CONSIDERACIONES DE LA FUNCIÓN DE LA GLOMALINA EN EL SUELO

Miller y Jastrow (1992) mencionaron que el proceso de agregación se ha identificado no sólo como un mecanismo por el cual el suelo resiste las fuerzas erosivas del aire y del agua, sino también como un mecanismo trascendental por el cual el suelo acumula materia orgánica y carbono. La acumulación ocurre porque los residuos orgánicos son encapsulados por arcilla, limo y bioproductos protectores durante el proceso de la agregación. Así, los productos carbonados se protegen de la acción degradativa de microorganismos. En este contexto, la glomalina puede participar en el recubrimiento de los residuos orgánicos, lo que impide su rápida degradación. Debido al alto contenido de C (30 a 50%), recalcitrancia, hidrofobicidad y fácil producción, la glomalina representa una fuente de secuestro de carbono en el suelo.

Rillig *et al.* (1999) observaron que valores altos de CO₂ estimulan a los hongos a producir más glomalina. Estos autores estudiaron, durante tres años, un área semiárida y, durante seis años, un pastizal en San Diego, California, USA. Cuando los valores de CO₂ se incrementaron a 675 µL L⁻¹ (valor predicho para la mitad de este siglo), se observó producción de tres veces más hifas y cinco veces más glomalina, en comparación con valores de 370 µL L⁻¹ de CO₂ (valor actual de CO₂).

La razón por la cual todos los HMA producen la glomalina es incierta; Rillig y Steinberg (2002) formularon como hipótesis que su producción puede ser una estrategia del hongo para mejorar su espacio físico, aunque su producción y secreción pueden constituir alto costo de C y N para el hongo. Estos autores observaron que el uso de partículas pequeñas (perlas de vidrio > 106 µm para simular un suelo no agregado) disminuyó la longitud hifal en 80%, en comparación con partículas de mayor tamaño (710 a 1180 µm), las cuales simulaban un suelo agregado, pero el rendimiento de glomalina fue siete veces mayor cuando el hongo se desarrolló en las partículas pequeñas.

Finalmente, es necesario mencionar que los HMA se deberían considerar como un importante componente para el éxito de las prácticas de conservación del suelo, donde la creación y el

mantenimiento de la estructura del suelo son trascendentales. El beneficio de la participación de los hongos dependerá del grado de degradación del suelo (Miller y Jastrow, 1992), debido a que los agregados del suelo son relevantes en el proceso de conservación, no sólo por el control que ejercen sobre la erosión, sino porque representan reservas nutrimentales.

AGRADECIMIENTOS

Ma. del Carmen González-Chávez expresa su gratitud a la Fundación México-Estados Unidos para la Ciencia y a la Academia Mexicana de las Ciencias por el apoyo económico para su estancia de investigación en el USDA-ARS, Beltsville, MD, USA con la Dra. S. Wright.

LITERATURA CITADA

- Acton, C.J., D.A. Rennie y E.A. Paul. 1963. The relationship of polysaccharides to soil aggregation. *Can. J. Soil Sci.* 43: 201-209.
- Allison, F.E. 1968. Soil aggregation: Some facts and fallacies as seen by a microbiologist. *Soil Sci.* 106: 136-143.
- Allison, F.E. 1973. Soil organic matter and its role in crop production. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Aspiras, R.B., O.N. Allen, G. Chesters y R.F. Harris. 1971. Chemical and physical stability of microbial stabilized aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35: 283-286.
- Brady, N.C. y R.R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. 20th ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- Chenu, C. 1989. Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures. *Soil Biol. Biochem.* 21: 299-305.
- Dodd, J.C., C.L. Boddington, A. Rodriguez, C. González-Chávez e I. Mansur. 2000. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) from different genera: Form, function and detection. *Plant Soil* 226: 131-151.
- Emerson, W.W. y D.J. Greenland. 1990. Soil aggregates: Formation and stability. pp. 485-511. *In: De Boodt, M.F., M.H.B. Hayes y A. Herbillon (eds.). Soil colloids and their associations in aggregates.* Plenum Press. New York.
- Franzluebbers, A.J., S.F. Wright y J.A. Stuedemann. 2000. Soil aggregation and glomalin under pastures in the Southern Piedmont USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1018-1026.
- Gonzalez-Chavez, M.C. 2000. Arbuscular mycorrhizal fungi from As/Cu polluted soils, contribution to plant tolerance and importance of the external mycelium. PhD Thesis. University of Reading. Reading, UK.
- Harley, J.L. 1989. The significance of mycorrhiza. *Mycol. Res.* 92: 129-139.
- Hillel, D. 1982. Introduction to soil physics. Academic Press. San Diego, CA.
- Kabir, Z, I.P. O'Halloran y C. Hamel. 1997. The proliferation of fungal hyphae in soils supporting mycorrhizal and non-mycorrhizal plants. *Mycorrhiza* 6: 477-480.
- Marshall, K.C. 1976. Interfaces in microbial ecology. Harvard University Press. Cambridge, MA.
- Mehta, N.C., H. Streuli, M. Muller y H. Deuel. 1960. Role of polysaccharides in soil aggregation. *J. Sci. Food Agric.* 11: 40-47.
- Miller, R.M. y J.D. Jastrow. 1990. Hierarchy or root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biol. Biochem.* 22: 579-584.
- Miller, R.M. y J.D. Jastrow. 1992. The role of mycorrhizal fungi in soil conservation. Special Publication 54. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Miller, R.M. y J.D. Jastrow. 2000. Mycorrhizal fungi influence soil structure. pp. 4-18. *In: Kapulnik, Y. y D. Douds (eds.). Arbuscular mycorrhizas: Physiology, molecular biology and ecology.* Kluwer. Dordrecht, The Netherlands.
- Morton, J.B. y G.L. Benny. 1990. Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): A new order, Glomales, two new suborders, Glominaeae and Gigasporineae, and two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an emendation of Glomaceae. *Mycotaxon* 37: 471-491.
- Nichols, K. 2003. Characterization of glomalin, a glycoprotein produced by arbuscular mycorrhizal fungi. PhD dissertation. University of Maryland. College Park, MD.
- Oades, J.M. 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. pp. 89-159. *In: Dixon, J.B. y S.B. Weed (eds.). Minerals in soil environments.* 2nd ed. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Rillig, M.C. y P.D. Steinberg. 2002. Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: A mechanism of habitat modification? *Soil Biol. Biochem.* 34: 1371-1374.
- Rillig, M.C., S.F. Wright, M.F. Allen y C.B. Field. 1999. Rise in carbon dioxide changes soil structure. *Nature* 400: 628.
- Rillig, M.C., S.F. Wright, K.A. Nichols, W.F. Schmidt y M.S. Tom. 2001. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant Soil* 233: 167-177.
- Sims, G.K. 1990. Biological degradation of soil. *Adv. Soil Sci.* 11: 289-330.
- Smith, S.E. y D.J. Read. 1997. Mycorrhizal symbiosis. 2nd ed. Academic Press. Cambridge, Great Britain.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. Second edition. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.
- Thomas, R.S., R.L. Franson y G.J. Bethlenfalvay. 1993. Separation of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and root effect on soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 77-81.
- Tisdall, J.M. 1991. Fungal hyphae and structural stability of soil. *Aust. J. Soil Res.* 29: 729-743.
- Tisdall, J.M. y J.M. Oades. 1979. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Aust. J. Soil Res.* 17: 429-441.
- Tisdall, J.M. y J.M. Oades. 1980. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth. *Aust. J. Soil Res.* 18: 423-433.
- Tisdall, J.M. y J.M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil. Sci.* 33: 141-163.
- Van der Heijden, M., J.N. Klironomos, M. Ursic, P. Moutoglis, R. Streitwolf-Engle, T. Boller, A. Wiemkem e I.R. Sanders. 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant

- biodiversity ecosystem variability and productivity. *Nature* 396: 69-72.
- Voronin, A.D. y N.A. Sereda. 1976. Composition and structure of the microaggregate fractions of certain type of soils. *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* 31: 100-107.
- Wright, S.F. 2000. A fluorescent antibody assay for hyphae and glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 226: 171-177.
- Wright, S. y A. Upadhyaya. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci.* 161: 575-586.
- Wright, S. y A. Upadhyaya. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 198: 97-107.
- Wright, S., A. Upadhyaya y J.S. Buyer. 1998. Comparison of N-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis. *Soil Biol. Biochem.* 30: 1853-1857.
- Wright, S.F., J.L. Starr e I.C. Paltineanu. 1999. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1825-1829.

EDUCACIÓN AMBIENTAL, IMPRESCINDIBLE EN LA FORMACIÓN DE NUEVAS GENERACIONES

Environmental Education, Essential in the Development of New Generations

Margarita R. Gómez-Moliné^{1‡} y Laura Bertha Reyes-Sánchez¹

RESUMEN

En este artículo, se exponen las razones por las que la educación ambiental debe formar parte importante de la cultura de todos los ciudadanos, ya que los cambios provocados por el consumo de energía, la industrialización de las materias primas, la degradación de los recursos no renovables y la cantidad creciente de residuos han afectado y siguen afectando nuestra calidad de vida. Los ciudadanos necesitan estar capacitados para poder tomar decisiones coherentes con modelos de vida respetuosos del medio ambiente y con la diversidad de culturas y personas; deben poseer conocimientos que les permitan defender los propios puntos de vista y reconocer los de los demás. Se hace hincapié en la formación de profesorado para que introduzca estos conceptos desde los primeros años de escolarización de los estudiantes y poder contar, en el futuro, con ciudadanos dotados de argumentos y actitud reflexiva y decidida para actuar en la solución de los grandes problemas ambientales.

Palabras clave: Medio ambiente, suelo, formación docente.

SUMMARY

In this paper we explain why environmental education must be an important part of the culture of every citizen, because the changes caused by the use of fuels, the industrialization of raw materials, and the increasing wastes have affected and continue affecting our quality of life. Citizens need to be capable of making decisions coherent with models of life that respect the environment and the diversity of cultures and people. They have to know how to defend their own points of view and to recognize those of others.

¹ Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. Cuautitlán Izcalli, México.

[‡] Autor responsable (marquim32@aol.com)

Recibido: Junio de 2003. Aceptado: Julio de 2004.
Publicado como ensayo en *Terra Latinoamericana* 22: 515-522.

We emphasize teacher training to introduce these concepts at the early years of school, so that, in the future, citizens may have the elements and the critical attitude necessary to take action in the solution of the great environmental problems.

Index words: Environmental education, soil, teachers training.

INTRODUCCIÓN

En nuestro planeta, la vida se ha desarrollado desde hace varios miles de millones de años, a pesar de haber sufrido toda clase de catástrofes que han provocado la desaparición de muchas especies. En los últimos 200 años, nuevas catástrofes han ocurrido; sin embargo, éstas han sido provocadas por la especie humana, quienes olvidan que son una especie que también puede desaparecer. Por eso, es importante tomar conciencia del peligro que conlleva un mal manejo del ambiente, con objeto de planificar y tomar acciones tendientes a que la Tierra siga siendo un buen lugar donde vivir y donde el suelo conserve su capacidad para producir los alimentos que son necesarios para nuestra supervivencia.

Los medios de difusión informan periódicamente de desastres ecológicos y de contaminaciones peligrosas, también hacen saber predicciones sobre las consecuencias de determinadas prácticas, como la destrucción de la capa de ozono, alimentos contaminados, radiaciones, etc. Esta información, el ciudadano la recibe filtrada de lo que se discute en altos niveles sobre el tema, y las acciones que se deberían llevar a cabo para impedir esos peligros no están en sus manos, puesto que no tiene los elementos cognitivos para discernirla y no ha sido educado para poder combatirla.

Todas estas reflexiones pueden resultar de utilidad si se hace algo al respecto, es decir, educar convenientemente a los ciudadanos para que hagan oír su voz frente a los intereses de gobernantes e industriales, pero con una voz capaz de convencer, de razonar y de negociar. Se necesita una "educación ambiental" del ciudadano y que las nuevas

generaciones, mejor preparadas, puedan sustituir las ideas caducas.

Para la Comunidad Edafológica Nacional, se presentan dos retos: el de la "educación ambiental" en general y, en particular, el de la "educación en conservación del suelo", para mantener una producción sustentable. Para ello, se requiere cambiar de actitud frente al peligro que representan la pérdida y el deterioro de nuestros recursos naturales.

En este artículo, se presentan la información y los argumentos que apoyan la necesidad de desarrollar la toma de conciencia de la importancia de la protección del suelo a lo largo de toda la escolaridad y se proporcionan ejemplos de las acciones prácticas que se han llevado a cabo en distintos contextos.

En Qué Consiste la Educación Ambiental

El término "educación" ha ido cambiando a lo largo de los siglos, además de que cada grupo social lo emplea de forma diferente, en función de su propia ideología. Este es un hecho normal en cualquier concepto, lo cual obliga a ir "redefiniendo" el sentido con el que se utiliza la palabra, o bien crear una nueva. En este caso la expresión "educación ambiental" parece adecuada para el tema que se desea presentar y se interpreta de la manera que se describe a continuación.

La actividad humana se enfocó desde sus orígenes a obtener de la naturaleza todo aquello que contribuyera a satisfacer sus necesidades inmediatas: cobijo, vestido y alimento, que se obtenían con grandes esfuerzos para no sucumbir en un medio natural agresivo para el hombre. Las transformaciones naturales del medio y la consecuente contaminación de origen natural, superaba con creces la mínima incidencia imputable al hombre. El reto ambiental no se planteaba como superación al deterioro, sino como defensa de éste ante los fenómenos naturales.

Avanzando en la historia, el hombre toma conciencia de su poder de intervención en las transformaciones del medio natural, del que ya no extrae únicamente lo necesario, sino todo aquello que contribuye a aumentar su grado de bienestar y, en las sociedades industrializadas, deja de ser víctima para convertirse en protagonista del mundo que le rodea.

Su arribo a la revolución industrial significó no sólo un desarrollo tecnológico y económico, sino una gran revolución cultural que modificó profundamente el sistema de valores de la sociedad tradicional.

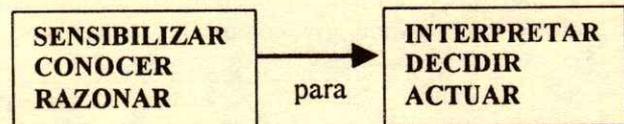
Si al hombre del siglo XIX se le hubiera advertido que la actividad humana que se iniciaba con la revolución industrial podría llegar a modificar las condiciones básicas del medio ambiente global, se le hubiera tratado de ingenuo, pues la capacidad biótica límite del planeta Tierra se percibía como ilimitada para absorber las transformaciones de la biosfera provocadas por el hombre (Álvarez, 1994).

Aunque para unos, la expresión "educación ambiental" consiste en dar y recibir mucha información y conocimientos nuevos; para otros, lo más importante es el cambio de las ideas sobre lo que acontece a nuestro alrededor y sobre todo del cambio de nuestras maneras de actuar. Según Sanmartí (1998), "se aprende algo cuando se reconoce una nueva manera de entender el porqué suceden las cosas, distinta y más útil que la anterior". La educación contribuye a la formación completa del ser humano mediante la aportación de conocimientos, habilidades, destrezas, valores, actitudes, creencias y formas de actuar.

Crear conciencia ambiental en una parte de la sociedad supone educar para el cambio de los comportamientos individuales y colectivos, lo cual implica una transformación que afecta el estilo de vida individual en el consumo, la salud, el civismo y la igualdad, y posibilita, por lo tanto, para el ejercicio de la democracia como vía de construcción de una misma escala de valores.

Implica también un cambio en la cultura colectiva que afecta la forma de pensar, sentir y actuar. Desde la perspectiva educativa, supone afrontar el reto de ofrecer vivencias de modelos alternativos, que permitan cambiar las actitudes y los comportamientos y analizar la incongruencia presente en la sociedad entre los valores existentes y aquellos que se requieren en la nueva construcción. Por ejemplo: cooperación vs competitividad, solidaridad vs individualismo, ocultación vs transparencia.

El nuevo modelo educativo, según Pujol y Villanueva (1998), que puede ofrecerse a la comunidad se dirige a



A lo que habría que agregar que este modelo ofrece también la capacidad de ejercer nuestro

derecho a una vida sostenible, practicando una nueva educación: **la educación ambiental.**

Educar para la sustentabilidad es un objetivo que va más allá de una materia más en el currículo. No se trata de reproducir formas centradas en la técnica, sino una invitación al debate y a la reflexión sobre el tipo de tecnología y organización social que permitan a la gente vivir en armonía unos y otros con el medio natural. No se trata, en absoluto, de introducir un catálogo de normas de conducta que empiezan con "No haga...", "Haga..."

Este nuevo enfoque requiere de un cambio de perspectiva que sea asumido en forma global mediante modelos de actuación y de consumo que hagan posibles nuevos modelos sociales. La educación ambiental, por lo tanto, deja de ser competencia de determinadas áreas científicas para convertirse en una responsabilidad colectiva, lo que es una tarea de la Sociedad.

Desde 1977, la UNESCO (1987) planteó tres objetivos principales de la educación ambiental:

- Fomentar el conocimiento de la interdependencia entre los elementos económicos, sociales, políticos y ecológicos para estimular una actitud de compromiso.
- Proporcionar a cada persona oportunidades de adquirir el conocimiento, los valores, las actitudes, la responsabilidad y las herramientas necesarias para proteger y mejorar el medio.
- Crear nuevos modelos de comportamiento de los individuos, de los grupos y de la sociedad en su conjunto, hacia el medio.

Esto último se refiere a que no hay soluciones ni recetas válidas para todos los grupos y personas, ya que cada situación es distinta y no existen recetas mágicas, pero sin duda se pueden proponer lineamientos generales, aplicables a determinados grupos y personas para apoyar dichos modelos de comportamiento, para lo cual se precisa que los individuos, además de adquirir conocimientos sólidos, desarrollen capacidades creativas que les permitan sugerir acciones nuevas para viejos problemas.

Pero Primero, ¿Cómo Somos?

En una encuesta entre jóvenes a los que se pedía su opinión acerca de las causas y posibles soluciones de los problemas ambientales, descrita por Sanmartí (1998), se identificaron cuatro tipologías de respuestas:

- Pasivos, dispuestos a acatar normas. Son los que consideran que los problemas ambientales los han de resolver los gobernantes y los técnicos. Creen que se pueden encontrar soluciones tecnológicas adecuadas y que el problema se resolverá si los técnicos indican muy claramente cómo se ha de actuar y si se facilita esta actuación.

- Controladores, represores. Son los que consideran que las causas se deben a que las autoridades gubernamentales no controlan a las industrias y, en general, a los agentes contaminantes. Para ellos también existen soluciones tecnológicas y creen que, si no se aplican, es porque no se controla ni se castiga a los que no lo hacen.

- Catastrofistas. Son aquellos que consideran que la especie humana se caracteriza precisamente por el individualismo y por la búsqueda de provecho personal. Por ello, creen que no hay solución al problema, ya que no es posible cambiar lo que es innato.

- Ecologistas, consumidores racionales. Son aquellos que consideran que las causas de los problemas ambientales están en el modelo de vida desarrollado en los últimos años y que, para solucionarlos, todas las personas deberían cambiar su comportamiento individual y colectivamente.

Es interesante reconocer que sólo estos últimos ponen el acento en que es importante cambiar el modelo de sociedad de consumo desarrollado en los últimos años en los países industrializados. La forma de vida que éste promueve es insostenible ecológicamente y, por ello, es necesario "inventar" tanto nuevas maneras de utilizar los recursos del medio, como de convivir.

Algo Tiene que Cambiar en Nuestra Actitud

La contaminación, la devastación, la degradación y la pérdida de recursos naturales, no son problemas que se puedan resolver tecnológicamente -aunque la ciencia puede ayudar- con los valores predominantes actuales, basados en la competencia, la falta de solidaridad, la uniformidad o la jerarquización. Los cambios necesarios deben ser profundos y para que se puedan dar, se necesita que sea posible (según Sanmartí, 1998):

- La capacitación para actuar, individual y colectivamente.
- La experimentación de nuevas vivencias alternativas.

- La comprensión de otras maneras de explicitar el funcionamiento del mundo.

Capacitación para la Acción

Se ha pensado que la educación, en relación con el medio ambiente, tiene como objetivo fundamental cambiar conductas concretas como, por ejemplo, no tirar residuos, separarlos adecuadamente, "respetar" el medio en el que se actúa, etc. Pero educar ambientalmente implica, más que aprender a actuar de determinada manera, aprender a tomar decisiones coherentes en cada una de las situaciones en las que uno se encuentra en la vida cotidiana, es decir, capacitar a las personas para actuar en el ámbito individual y social.

En un momento de cambio como el actual, se encuentra que no existen "recetas" o modelos conductuales válidos para todas las situaciones, porque incinerar residuos puede ser adecuado cerca del mar, pero no en zonas pobres de oxígeno. Además, los modelos conductuales también evolucionan.

La relación entre sociedad y medio ambiente ha sufrido cambios importantes en los últimos cincuenta años, desde los años optimistas en los que el crecimiento parecía ilimitado hasta la crisis de los setenta; o la pérdida masiva de bosques y especies endémicas, la tragedia de Chernovil, o el agujero de ozono en los finales del siglo XX, por nombrar algunos en los cuales la educación ambiental ha enfrentado el problema de diferentes formas. En el Cuadro 1, se indica cómo se podrían sintetizar estos cambios en forma esquemática.

Resumiendo, hace algunos años, la consigna era "limpiar" lo que se ensuciaba, depurar, conservar... más adelante fue "reciclar", reaprovechar y, en la actualidad, lo más importante es "minimizar", reducir el consumo y tomar sólo lo necesario.

Educar para una Tierra sostenible en el tiempo y en el espacio, implica capacitar a las personas para que, reconociendo que no existen reglas preestablecidas y que sean siempre válidas, sepan tomar decisiones coherentes con modelos de vida respetuosos con el medio ambiente y con la diversidad de culturas y personas. Ello implica ser capaz de cambiar conductas en función de las circunstancias, de defender los propios puntos de vista públicamente y reconocer el de los demás, de dialogar, de negociar.

Experimentación de Nuevas Vivencias

No se puede cambiar si no se está sensibilizado, ignorando o sin reconocer los problemas y sin desear encontrar soluciones. Sensibilizar implica sentir emociones y placeres diferentes a los habituales y reconocer como deseables y posibles otras maneras de relacionarse con el medio.

La sensibilización hacia la problemática ambiental requiere necesariamente pasar por la percepción directa del problema y también de las posibles alternativas. A través de los sentidos, se captan nuevas sensaciones y se despiertan nuevos placeres, para ello es importante poderse sumergir en una realidad y cambiar los sentimientos de pesimismo e impotencia por las emociones relacionadas con la ilusión, la utopía y la experimentación de alternativas.

La sensibilización es una condición imprescindible para educar ambientalmente, pero no es suficiente si no cambian los modelos explicativos de los problemas ni la práctica. Por lo tanto, educar implica también profundizar en:

1. Nuevas formas de ver el mundo.
2. Formación de profesores y actualización del profesorado.
3. Incorporación de la educación ambiental al currículo escolar.

1. Nuevas formas de ver el mundo

La necesidad de actualización en el área ambiental, considerando que la tarea que cumplen distintos profesionales está relacionada con la protección y con el manejo sustentable de los recursos, junto con una optimización de la producción exige una permanente adecuación y revisión de los conocimientos. La respuesta a todas estas nuevas demandas debe ser concreta, lo cual requiere de herramientas técnicas que permitan efectuar diagnósticos de impacto y de manejo de gestión en el área (Ratto y Giuffré, 2001).

Se sabe que hay sustancias nuevas en el ambiente, cambios profundos en los sistemas de producción de los alimentos, en las cadenas de distribución, aumento impensable en el volumen de residuos, problemas a solucionar con el manejo de los mismos, y nuevas reglas en el comercio mundial. La comprensión de los problemas ambientales lleva a reconocer que son muy complejos y que no pueden darse explicaciones simplistas. No puede haber una sola causa, y sí muchas que se relacionan entre sí. Además, éstas

Cuadro 1. Los cambios en la educación ambiental.

	Antes de los años 50	En los años 50	En los años 70	En los años 90
	Aprender pautas de comportamiento	Aprender a conocer el medio	Aprender a conservar el medio	Aprender a actuar para un desarrollo sustentable
Contenidos	Normas de buena urbanidad, normas de conducta, respeto la naturaleza	Conceptos necesarios para describir un medio determinado	Conceptos relacionados con los factores bióticos y abióticos, con la gestión económica y con la política del medio	Conceptos: Desarrollo viable, sustentable o duradero. Sistema, equilibrio, reversibilidad, variabilidad, cadena Espacio y tiempo Visión de los problemas medio ambientales a nivel planetario Estudio de las causas sociales, políticas y económicas de los problemas medioambientales
Metodología	Estímulo / respuesta	Trabajo de campo Comprender el funcionamiento del medio, sobre todo del medio natural Estudio de los animales, las plantas y la ecología	Trabajo interdisciplinario en el aula o en el trabajo de campo Comprensión y toma de conciencia de los problemas de la contaminación y agotamiento de recursos naturales	Trabajo específico en el campo de las actitudes y de la acción, paralelamente al de los conceptos
Objetivos actitudinales	Aprender a respetar el medio Desarrollo de buenos hábitos	Desarrollo de aspectos afectivos y estéticos	Desarrollo de una visión naturalista opuesta a la progresista Desarrollo de una ética conservadora y de regreso a la sociedad rural	Incidencia de la dimensión cognitiva de las actitudes Importancia de la acción

Fuente: Pujol y Villanueva (1998).

pueden ser lejanas en el tiempo y en el espacio, y también sus consecuencias. Así, de la deforestación de los bosques para obtener combustibles en el siglo pasado hemos heredado terrenos yermos y erosionados.

Tampoco hay soluciones buenas o malas, sino óptimas en función de un lugar y de un momento determinado y hay que considerar, además, que los problemas están interrelacionados; por ejemplo, el problema de la energía, se puede analizar cómo se relacionó con la tala de árboles, con la contaminación producida por los humos provenientes de la quema de carbón primero y del petróleo en la actualidad, con la consabida formación de óxidos de azufre y de lluvia ácida; o la explotación masiva del petróleo, que ha afectado el comercio, la riqueza y pobreza entre los pueblos y, por lo tanto, su convivencia.

Cambiar ideas es más difícil que cambiar hábitos. Cuando se analiza un problema, se tiende a buscar argumentos para confirmar la propia manera de pensar y resulta más difícil aceptar otras maneras de verlo. Se puede incluso llegar a pensar que la educación para la sustentabilidad del medio ambiente puede llegar a ser

subversiva, ya que no persigue sólo pequeños cambios de comportamiento, sino también nuevas formas de pensar y de actuar incompatibles con los modelos socio-económico-culturales dominantes en el orden político actual.

Estas consideraciones implican iniciar la educación sobre la ciencia del suelo en particular y la educación ambiental en general, en edad muy temprana; para esto es necesario contar con profesores capaces de transmitir estos enfoques, para tener en el futuro ciudadanos dotados, tanto de argumentos, como de una actitud reflexiva y decidida para impulsar y realizar las acciones conducentes a la solución de los grandes problemas ambientales que se van a enfrentar (Reyes-Sánchez, 2001).

2. Formación de profesores y actualización del profesorado

La educación ambiental como actividad pedagógica es bastante reciente, puede decirse en un sentido amplio, que surgió cuando el hombre comprendió su relación con la biosfera y empezó a

cuestionarse cómo transmitir esa preocupación a sus conciudadanos y a las nuevas generaciones.

La educación, en general ha evolucionado profundamente en el siglo XX. Han aparecido paradigmas epistemológicos promovidos por los cambios que ha sufrido la sociedad (Gómez y Sanmartí, 1996) y, por lo tanto, el modelo de profesor ha cambiado desde ser un expositor de lecciones magistrales de acuerdo con un listado de contenidos conceptuales (currículo), a un profesor investigador, práctico y reflexivo que promueve los cambios conceptuales mediante un programa de actividades y el control del aprendizaje por el propio alumno (autorregulación).

En conferencias y congresos internacionales, realizados en Estocolmo, en Tbilisi y en Río, y promovidos por la UNESCO, se ha hecho hincapié en la importancia de la formación de un profesorado cuyas actividades y decisiones influyan con especial significación en la calidad del medio ambiente. Siendo entonces conveniente, preparar a los profesores que van a impartir educación ambiental en el modelo constructivista (Corriente pedagógica que propone que el conocimiento se construya, proporcionando al individuo información, experiencias y trabajo organizado, para que adquiera los conocimientos y conceptos de forma permanente) y en las reflexiones antes mencionadas, debido a que han mostrado mayor probabilidad de conseguir un cambio conceptual con respecto a los conceptos heredados del "hombre, rey de la creación", como depredador y saqueador de la Tierra, al hombre, rey de la creación como protector y conservador del orden natural.

La labor del profesor puede, entonces, continuar con la profundización, tanto de las concepciones alternativas de los alumnos y sus cambios conceptuales, como sobre las reacciones que los provocan. Este tipo de educación proporciona una gran riqueza de experiencias educativas y convierte al profesor en un investigador de lo que pasa en el aula.

En cuanto a la educación ambiental de adultos, ésta es la labor de toda una sociedad, con los medios de comunicación de que dispone, la que puede influir en la sustitución de ideas fuertemente arraigadas, o esperar la sustitución de las actuales generaciones para poder sustituir las ideas.

En este sentido, los elementos que ayudarían a una educación para la sustentabilidad se podrían resumir en:

- Diseñar proyectos de trabajo para ser aplicados, lo cual posibilita aprender a planificar la acción y a

tomar decisiones. Los proyectos han de ser relevantes, complejos y transformadores, en lugar de reproducir modelos y prácticas propias de la sociedad de consumo. Un intento es el Proyecto "Agroquímica para la Enseñanza Básica, Media y Media Superior", registrado en Fundación UNAM por la "Cátedra de Ecología, Contaminación y Salud Pública" de la FES-Cuautitlán (Reyes-Sánchez, 1994), el cual, a la fecha, ha recibido reconocimientos nacionales e internacionales.

- Organizarse, anticipar obstáculos, elaborar planes de trabajo, lo cual posibilitará aprender a trabajar con los demás. Estas actividades deben realizarse sin excluir a nadie y valorando las aportaciones de cada miembro del grupo, aunque éstas sean pequeñas (Carbonell, 1980).

- Experimentar formas de vida alternativas, alejadas de las habituales y menos orientadas al consumo de recursos innecesarios, lo cual conlleva vivenciar nuevas emociones y placeres. Éstas no se deben percibir como algo que sólo es aplicable en el contexto escolar. Algunas experiencias, desarrolladas por O. N. G's., son verdaderos ejemplos de ello.

- Tomar y ejercer responsabilidades, es decir, aprender a comprometerse y a actuar en consecuencia, sin circunscribirse al ámbito escolar, sino extendiéndose también a la comunidad a la que pertenece el grupo. Tal es el caso de la Granja "Huerto Alegre: Centro de innovación educativa" en Almuñeqar, España, que "tratando de potenciar una nueva sensibilidad respecto a las relaciones de la persona con el entorno, integrando profesionalmente educación y medio ambiente, superando la separación habitual entre la teoría y la práctica", ha logrado conformar un proyecto pionero en la zona, que fue merecedor del Premio Andalucía de Medio Ambiente en 1993 (Caivano, 1994).

- Actuar, es decir, aprender a poner en práctica los proyectos, a llevarlos hasta el final, ya que el objetivo educativo no es tanto resolver un problema concreto, sino favorecer la reflexión y la adopción de nuevos puntos de vista sobre las causas y soluciones de los problemas.

Una experiencia al respecto es la evolución del antes citado Proyecto "Agroquímica para la Enseñanza Básica, Media y Media Superior" que, intentando trascender a la comunidad edafológica nacional, ha conformado con el apoyo de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. un espacio educativo propio y propicio para niños, jóvenes, docentes e investigadores con interés en la educación

e investigación educativa: primero, a través de la apertura del "Simposio de innovaciones educativas en la enseñanza de la ciencia del suelo", durante la realización de los Congresos Mexicanos de la Ciencia del Suelo, y ahora, consolidándose mediante la conformación del Proyecto "Así son los Suelos de mi Nación" y la formación de la "Red Nacional de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo": RENAECS, que se desarrolla en colaboración con la antes citada Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. (Reyes-Sánchez, 1994, 2003a).

3. Incorporación de la educación ambiental al currículo escolar

Estas acciones pueden emprenderse en cualquier nivel de la enseñanza, incorporándolas a las materias del currículo. Existen varias formas de incorporar un nuevo tema a un currículo, entre ellas la de "eje transversal" y la de "permeabilización", que son los más conocidos (Pujol y Villanueva, 1998).

En el modelo de "eje transversal", las distintas partes del currículo se trabajan impregnadas de este tema, sin embargo, éste no asegura que la educación ambiental sea tratada en todos los temas (por ejemplo, matemáticas). Por eso, se prefiere el modelo de "permeabilización", es decir, que se distribuya la educación ambiental en todo el currículo como si éste fuera un líquido, formando una disolución homogénea. Para poder aplicar cualquiera de estos modelos, es preciso reestructurar los planes de estudio y que el tema de protección ambiental sea tratado desde los primeros años de estudio hasta los niveles de formación profesional.

Sin embargo, la idea no es que se le contemple como una materia más, sino como una dimensión constante: permeándose horizontal y verticalmente a lo largo de toda el currículum educativo presente en cada una de las teorías, planteamientos, discusiones y razonamientos; conformando en el largo plazo una concepción y percepción diferente, tanto del medio ambiente, como de nuestra inserción en él (Reyes-Sánchez, 1994), pero más importante aún, construyendo en los hechos una vida diferente en la que el valor del medio ambiente en que existimos y de los recursos naturales que poseemos, forme parte real e indisoluble de nuestro diario quehacer, expresándose, por lo tanto, congruente y cotidianamente como un inseparable binomio: pensamiento y acción (Reyes-Sánchez, 1996, 2003b).

CONCLUSIONES

- Crear un ámbito para el funcionamiento del conjunto de planteamientos descritos -incorporar la educación ambiental al currículo general, formar y actualizar profesores para ello, capacitar al ciudadano para la acción, experimentar nuevas formas de vida, generar alternativas, actuar, organizarse para anticipar obstáculos y elaborar planes de trabajo- con la finalidad de crear y obtener una educación para la sustentabilidad, es una tarea colectiva y consensuada porque, sin la cooperación de la dirección, del personal administrativo y de servicios, alumnos y profesores, no es viable. Los alumnos tienen que ver cómo los cambios son posibles y, por lo tanto, que existe una posibilidad real de modificar modelos sociales y su futura actividad laboral; los profesores, que son los responsables del modelo de cambio, tienen que aceptar que la estructura de la materia que imparten va a ser modificada; y para el centro de estudios significa un enfoque nuevo en su estructura y en su imagen.

- Se debe fomentar la actualización del profesorado o la adquisición de profesores con una formación ambiental. Nada de esto es fácil.

- La idea de la regeneración espontánea del suelo, al igual que de todos nuestros recursos naturales y del ambiente, está todavía muy arraigada en el subconsciente de muchos directivos y constituye un grave obstáculo para la toma de decisiones. El cambio de creencias es más difícil que el cambio de declaraciones y de legislación, y sólo una educación ambiental en todo el Planeta, desde la infancia, puede conseguir cambios determinantes.

LITERATURA CITADA

- Álvarez-Martín, J.B. 1994. Contribución a la educación ambiental. Cuadernos del ICE, 11. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid, España.
- Caivano, F. 1994. Huerto Alegre, Centro de Innovación Educativa. Crónica de una Ilusión. Cuadernos de Pedagogía 228: 28-36.
- Carbonell, J. 1980. La Pedagogía entra a la granja y El trabajo manual en la escuela. Cuadernos de Pedagogía 62: 12-15 y 6-11.
- Gómez-Moliné, M.R. y N. Sanmartí. 1996. La didáctica de las ciencias: Una necesidad. Educación Química 7-3: 156-168.
- Pujol, R.M. y M. Villanueva. 1998. Un proces metodologic per l'ambientació curricular. pp. 31-43. In: Seminaris d'ambientalització curricular. Generalitat de Catalunya. Barcelona, España.

- Ratto, S. y L. Giuffré. 2001. Especialización en gestión ambiental en sistemas agroalimentarios. pp. 214. *In: Memorias XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo*. Varadero, Cuba.
- Reyes-Sánchez L.B. 1994. Agroquímica para la Enseñanza Básica, Media y Media Superior. Registrado en Fundación UNAM y en el Catálogo de Cátedras FES-Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Reyes-Sánchez L.B. 1996. Agroquímica para la Enseñanza Básica: Un Proyecto de Iniciación Temprana a la Docencia y la Investigación de Fundación UNAM. pp. 124-125. *In: Memorias del XVI Congreso Nacional de Educación Química*. Guanajuato, México.
- Reyes-Sánchez L.B. 2001. Soil, support and provision for the plants. pp. 1831-1 a 1831-10. *In: Proceedings 17th World Congress on Soil Science*. Bangkok, Thailand.
- Reyes-Sánchez L.B. 2003a. Red Nacional de Educación y Enseñanza de la Ciencia del Suelo: RENAECS: ¡Vamos todos juntos en la Cruzada Nacional por la Preservación del Recurso Suelo! <http://www.smcs.org.mx>
- Reyes-Sánchez, L.B. 2003b. "Así son los Suelos de mi Nación". pp. 152-155. *In: Memorias del III Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental*. Atlihuetzia, Tlaxcala, México.
- Sanmartí, N. 1998. De que parlem, quan parlem d'educar i d'educar ambientalment? pp. 1-8. *In: Memorias del Seminario sobre educación ambiental*. Facultad de Ciencias de la Educación. Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona, España.
- UNESCO. 1987. International Congress on Environmental Education and Training. Moscú/Paris.

CUARENTA Y CINCO AÑOS DE LA CIENCIA DEL SUELO EN EL COLEGIO DE POSTGRADUADOS-MÉXICO

Forty-five years of Soil Science at the Colegio de Postgraduados-Mexico

D. Espinosa-Victoria

Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Programa de Postgrado en Edafología. Carretera México-Texcoco, km. 36.5, 56230 Montecillo, Estado de México. (despinos@colpos.mx)

INTRODUCCIÓN

Debido a que la Rama de Suelos fue una de las fundadoras del Colegio de Postgraduados (CP), el pasado 22 febrero de 2004 el Programa de Postgrado en Edafología cumplió cuarenta y cinco años de vida académica y científica.

Es pertinente puntualizar que el Colegio de Postgraduados tuvo su origen en la Ley de Enseñanza Agrícola Superior, expedida el 6 de mayo de 1946 por el Ejecutivo Federal. Sin embargo, el Colegio de Postgraduados inicia sus actividades el 22 de febrero de 1959, en la otrora Escuela Nacional de Agricultura (ENA), hoy Universidad Autónoma Chapingo, ubicada en el estado de México, a una distancia de 38.5 km de la Ciudad de México. Más tarde, el 4 de enero de 1979, el Colegio de Postgraduados se convirtió en un organismo descentralizado del gobierno federal, con personalidad jurídica y patrimonio propios, y cambió, en 1982, su sede a Montecillo, municipio de Texcoco, estado de México. Si bien en 1982, la administración del Colegio de Postgraduados se cambió a Montecillo, no fue sino hasta 1987 cuando los Programas de Edafología e Hidrociencias hicieron lo propio.

La Rama de Suelos inició sus funciones únicamente con un Programa de Maestría en Ciencias; sin embargo, el 15 de febrero de 1971 dio inicio a su Programa de Doctorado. Con el cambio del Colegio de Postgraduados a un organismo público descentralizado, en 1979, la Rama de Suelos se transformó en el Centro de Edafología. En 1994, con la reestructuración del Colegio de Postgraduados en cuatro institutos, el Centro de Edafología pasó a conformar una de las especialidades del Instituto de Recursos Naturales (IRENAT): la Especialidad de Edafología. El 8 de agosto de 2001, el Colegio de Postgraduados se convirtió en un Centro Público de Investigación (CPI), dentro del Programa Nacional de Fomento a la Investigación Científica y, de acuerdo con su Reglamento General (2002), se le asignó nuevamente la categoría de Programa a la Especialidad de Edafología. Finalmente, el 21 de agosto de 2002, los programas de Maestría y Doctorado en Edafología se incluyeron en el Programa Nacional de Postgrados (PNP) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), obteniendo así el reconocimiento de Postgrados de Alto Nivel Nacional.

ORIGEN DEL PROGRAMA DE POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

Con la llegada a México de los doctores George Harrar y Edwin J. Wellhausen, en 1943, inician las actividades de la Oficina de Estudios Especiales (OEE), con un programa agrícola cooperativo entre la Secretaría de Agricultura y Ganadería y la Fundación Rockefeller. La parte de investigación del programa se centró en el mejoramiento de cultivos básicos y en la Ciencia del Suelo, como disciplina de apoyo (Laird, 1989). Tres años después, se creó el Instituto de Investigaciones Agrícolas (IIA) que, al igual que la OEE, hizo énfasis en el uso de fertilizantes y otras prácticas de producción. Durante esa época, la Comisión Nacional de Irrigación, que a finales de 1946 se transformó en la Secretaría de Recursos Hidráulicos, también contribuyó con la Ciencia del Suelo a través de los estudios agrológicos y análisis de suelos.

Durante mucho tiempo, la degradación de los suelos debida a la erosión hídrica preocupó a científicos, académicos y productores. Con base en la necesidad de proteger el recurso suelo, el 25 de marzo de 1942, a través de un decreto presidencial, se creó el Departamento de Conservación de Suelo y Agua de la Comisión Nacional de Irrigación.

Dentro de este marco, la enseñanza agrícola superior enfatizó la importancia de la Ciencia del Suelo durante las décadas de los treinta y cuarentas. Así, con el nombramiento del Ing. Manuel Meza Andraca, en 1929, como Director de la Escuela Nacional de Agricultura (ENA), se pretendió establecer la Especialidad de Suelos, intento que no fructificó debido a la falta de profesores especializados en esta área. No es sino hasta noviembre de 1954 cuando se crea el Departamento de Enseñanza e Investigación en Suelos, y cuatro años después la carrera de Ingeniero Agrónomo especialista en Suelos, siendo su primer jefe el profesor Mariano Villegas Soto (Tovar, 1986).

Un año después de establecida la Especialidad de Suelos de la ENA, se crea el Colegio de Postgraduados, con su Rama de Suelos, con la encomienda de formar postgraduados en esta disciplina. Así, la Rama de Suelos comenzó, en 1959, con cuatro alumnos y una plantilla de cuatro profesores; dos de éstos fueron el M.Sc. Nicolás Aguilera Herrera y el Dr. Gabriel Baldovinos de la Peña (Laird, 1989).

En 1959, el M.Sc. Nicolás Aguilera fue nombrado segundo jefe del Departamento de Suelos de la ENA y, por ende, primer presidente de la Rama de Suelos del naciente Colegio de Postgraduados. Así, de 1959 a 1970, el Departamento de Suelos de la ENA y la Rama de Suelos del CP trabajaron conjuntamente, de tal forma que los profesores fungían indistintamente como instructores, tanto de licenciatura, como de postgrado (Núñez, 2000).

El primer graduado de la Rama de Suelos, y del Colegio de Postgraduados, fue el Ing. Jesús Moncada de la Fuente, quien defendió, en enero de 1961, la tesis de maestría intitulada: "Estudio fisico-químico de algunos suelos de origen volcánico del estado de Michoacán, México". El segundo y tercer graduados de la Rama Suelos fueron el QBP Alfredo Echegaray Alemán y el Ing. Antonio Turrent Fernández, quienes defendieron las tesis de maestría intituladas: "Movimiento y nitrificación de fertilizantes nitrogenados en algunos suelos de México" y "Estudios de la forma de eliminar el atraso del crecimiento en lechugas, cuando se transplantan en invernadero, sobre suelos de la sierra Tarasca", en enero y agosto de 1962, respectivamente.

El año de 1970 es especialmente significativo para la comunidad "suelera", ya que al darse la separación del CP de la ENA, la Rama de Suelos comenzó su vida académica independiente e inició, en ese mismo año, su programa doctoral. Así, correspondió al Dr. Adán Alvarado Benítez ser el primer doctor del programa, quien se graduó en 1975 con la tesis intitulada "Influencia de algunos factores ambientales en la respuesta del rendimiento de grano de maíz de temporal a diferentes niveles de nitrógeno, fósforo y densidad de población, en la zona oriental del Valle de México."

ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA DE POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

El Programa de Postgrado en Edafología tiene como objetivo fundamental formar Maestros y Doctores en Ciencias del más alto nivel, con competencias académicas, científicas y técnicas en el campo de la Ciencia del Suelo, para involucrarse y contribuir en la solución de problemas en las áreas agrícola, pecuaria, forestal, económica, social y política, bajo la filosofía del trabajo transdisciplinario, con la finalidad de usar y conservar el recurso suelo en el marco del manejo integrado de ecosistemas.

El logotipo que identifica al Programa de Edafología (Figura 1), diseñado y aprobado por el Comité Académico del Programa, en 1999, consiste de un perfil de suelo con tres horizontes de color café, que representan sus tres tareas sustantivas (investigación, docencia y vinculación); una planta que surge de éste con seis hojas verdes, cada una de las cuales representa a una de las seis áreas que conforman el programa, y un tallo de color café, que representa a su Comité Académico.

El Programa de Edafología cuenta con un Comité Docente, que coordina las actividades académicas (Reglamento General del CP, 2002), el cual está conformado por un coordinador y dos vocales. Tradicionalmente, se ha invitado a un profesor por cada área a las reuniones del Comité Académico, con la finalidad de que este último tenga la información necesaria para tomar los acuerdos que mejor favorezcan el desarrollo y funcionamiento de la comunidad académica.

El Programa de Edafología ha estado constituido históricamente por seis áreas de investigación y docencia, cada una de las cuales cuenta con un coordinador, personal académico y de apoyo, así como con objetivos y líneas de investigación definidos (Triptico de la Especialidad de Edafología, 1997).



Figura 1. Logotipo del Programa de Postgrado en Edafología del Colegio de Postgraduados.

Área de Fertilidad de Suelos. Esta área lleva a cabo investigaciones sobre temas relacionados con el diagnóstico y la fertilidad de los suelos, fenómenos relacionados con la nutrición de cultivos, eficiencia de los fertilizantes y abonos orgánicos, uso y manejo de enmiendas minerales en suelos ácidos y alcalinos, así como desarrollo de nuevas tecnologías para la productividad agrícola.

Área de Física de Suelos. Son temas de investigación en esta área los procesos físicos que tienen lugar en el sistema agua-suelo-aire, relacionados con la producción de cultivos agrícolas y la vegetación natural, los procesos de degradación física del suelo, el uso de prácticas adecuadas para la conservación del suelo y el agua, la recuperación de suelos degradados y el manejo de cuencas hidrográficas.

Área de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos. Esta área centra su quehacer científico en los procesos de formación y morfología de los suelos, para explicar su comportamiento en relación con su uso y manejo, la clasificación de suelos con el propósito de establecer un marco de referencia para planear la investigación, la transferencia de tecnología, el uso del suelo y, finalmente, las metodologías para clasificar e inventariar el recurso suelo.

Área de Microbiología de Suelos. Esta área realiza investigaciones sobre el proceso de fijación biológica del nitrógeno por microorganismos que establecen tanto relaciones simbiótico mutualistas como asociativas; las relaciones hongo-planta (endo y ectomicorrízicas) de importancia agrícola, frutícola, ornamental y forestal; el papel de la macrofauna en el reciclaje de desechos agrícolas; la actividad microbiológica en suelos contaminados con hidrocarburos, pesticidas y metales potencialmente tóxicos; las interacciones moleculares que se establecen entre las plantas y los microorganismos; así como la diversidad genética de las poblaciones microbianas.

Área de Nutrición Vegetal. Esta área enfoca sus investigaciones en los procesos fisiológicos de la nutrición de los cultivos, los procesos que las plantas utilizan para adaptarse a condiciones de escasez o toxicidad de nutrimentos, tanto en condiciones de suelo, hidroponía y fertirrigación, así como en el desarrollo de sistemas de producción más eficientes e intensivos.

Área de Química de Suelos. Esta área lleva a cabo investigaciones sobre aspectos relacionados con el desarrollo de metodologías de análisis de suelos; la composición química del suelo, sus propiedades y regímenes químicos; los procesos que contribuyen a su degradación y, finalmente, la remediación de suelos contaminados por causas naturales y antropogénicas.

En el Cuadro 1, se presentan las 41 líneas de investigación formales que actualmente desarrollan los profesores investigadores adscritos al Programa de Postgrado en Edafología. Es importante anotar que esta relación de líneas de investigación es el resultado de una depuración y actualización realizada en el seno de cada una de las seis áreas de investigación.

Cuadro 1. Líneas de investigación que actualmente abordan las seis áreas del Programa de Postgrado en Edafología del Instituto de Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados.

Fertilidad de suelos

1. Tecnología y manejo de fertilizantes y abonos orgánicos.
2. Hidroponía orgánica y fertirrigación.
3. Nutrición de cultivos en suelos con problemas de suministro nutrimental.
4. Respuesta de los cultivos a los fertilizantes químicos y abonos orgánicos.
5. Fertilización de suelos y nutrición de cultivos.
6. Diagnóstico y manejo de la fertilidad del suelo y estado nutrimental de los cultivos.
7. Uso del suelo y captura de carbono.
8. Fertilidad del suelo y mineralogía de arcillas.
9. Estudio y optimización de la interacción entre genotipo, manejo y la calidad en sistemas de cultivos simples y compuestos.
10. Diagnóstico y mejoramiento de la productividad de agrosistemas de cultivos básicos.
11. Desarrollo de sistemas agrícolas compuestos sostenibles para la reconversión de pequeñas unidades de producción.
12. Desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles en suelos de ladera.
13. Diagnóstico y manejo de suelos agrícolas.

Física de suelos

14. Captación y aprovechamiento del agua de lluvia.
15. Evaluación de los procesos físicos del suelo.
16. Evaluación de los sistemas de labranza.
17. Variabilidad espacial y temporal de las propiedades físicas del suelo.
18. Recuperación de suelos degradados.
19. Conservación del suelo y el agua.

Génesis y clasificación de suelos

20. Percepción remota.
21. Evaluación y cartografía de tierras.
22. Génesis y clasificación de suelos.
23. Mineralogía y micromorfología de suelos.
24. Etnoedafología.

Microbiología de suelos

25. Fijación biológica de nitrógeno atmosférico.
26. Simbiosis micorrízica.
27. Biorremediación de acuíferos y suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo.
28. Interacción molecular planta-microorganismo.
29. Materia orgánica y reciclaje de residuos orgánicos.
30. Simbiosis ectomicorrízica y ecofisiología forestal.
31. Control biológico de fitopatógenos y micoparasitismo.

Nutrición vegetal

32. Fertirriego.
33. Sustratos e hidroponía.
34. Fertilización foliar.
35. Diagnóstico nutrimental.
36. Fisiología de la nutrición.
37. Relación nutrición-fitopatógeno.
38. Modelos matemáticos en la nutrición de cultivos

Química de suelos

39. Contaminación.
40. Metodología de análisis de suelos, aguas, plantas y materiales afines.
41. Materia orgánica.

En la actualidad, el Programa de Edafología cuenta con una planta académica conformada por 31 Philosophy Doctors (Ph. D's) y Doctores en Ciencias (Cuadro 2), 14 investigadores con nivel de Maestría en Ciencias que apoyan en las actividades de docencia e investigación y seis Maestros en Ciencias en el Programa de Formación de Profesores, quienes realizan estudios doctorales en universidades de Estados Unidos, Canadá, Alemania y Australia. Es pertinente enfatizar que 72% de la planta académica doctoral del Programa es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Espinosa-Victoria, 2002).

Desde la creación del CP, han sido doce los profesores investigadores que han tenido el honor de presidir a la comunidad de Edafología (Cuadro 3). Es interesante observar el cambio de nombre del cargo a través del devenir del Colegio de Postgraduados.

LOGROS DEL PROGRAMA DE POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

Con la creación del CONACyT, en 1970, se propició el crecimiento de la matrícula de estudiantes y graduados de los Programas de Maestría y Doctorado en Edafología, gracias al otorgamiento de becas para manutención. A la fecha, el Programa de Postgrado en Edafología ha graduado 578 Maestros en Ciencias y 66 Doctores en Ciencias.

El Programa de Edafología está considerado por muchas instituciones de enseñanza superior, públicas y privadas, y dependencias del gobierno federal, como el Programa de Postgrado idóneo para preparar a sus académicos, investigadores y técnicos en las distintas áreas de la Ciencia del Suelo. Tradicionalmente, el Programa de Edafología ha otorgado los grados de Maestría y Doctorado en Ciencias a egresados de distintas universidades e institutos tecnológicos agropecuarios del país, entre otros. El impacto de esta actividad se cristaliza en el sinnúmero de proyectos de investigación y colaboración establecidos entre las instituciones de procedencia de los egresados del Colegio de Postgraduados y los investigadores de este último. Como resultado de esta presencia nacional, es justo mencionar que, en 1962, algunos investigadores del Programa de Edafología participaron en la fundación de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. En diferentes ocasiones, miembros del Programa han presidido y participado en el Comité Directivo de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, así como en las actividades propias de la revista científica *Terra Latinoamericana*, órgano oficial de dicha sociedad.

El Programa de Edafología también tiene presencia internacional, en particular en América Central, América del Sur y el Caribe. Es interesante notar que el mayor número de estudiantes latinoamericanos graduados provienen de Colombia, Ecuador, Bolivia, Guatemala, Venezuela y República Dominicana (Base de datos del Programa de Edafología, 2003). No menos interesante resulta notar que el Programa de Edafología también ha graduado estudiantes provenientes de Europa (Inglaterra e Italia) y Nueva Guinea. Actualmente, el Programa de Maestría tiene un estudiante de Angola y el Programa de Doctorado cuenta con dos estudiantes de Pakistán y uno de Lesoto. A la fecha, el Programa de Edafología ofrece un total de 39 cursos regulares (Espinosa-Victoria, 2003), a través de los cuatrimestres de primavera, verano y otoño. En el año 2003, el programa curricular se revisó y se eliminaron aquellos cursos que en los últimos cinco años no tuvieron demanda y se añadieron, al mismo tiempo, nuevos cursos. En un estudio realizado en el mismo año (Núñez, 2003), cuyo propósito fue analizar el contenido de los cursos regulares impartidos en el Programa, se observaron los siguientes casos: un solo traslape de 50%, otro de 40%, cinco de 30%, once de 20%, y cincuenta y cuatro de 10%. En la mayoría de los cursos (87.5%), el traslape fue prácticamente inexistente, estimándose que un traslape de 20% es pertinente para enseñar conceptos similares desde diferentes enfoques. Por otro lado, con base en la reglamentación vigente (Reglamento de Actividades Académicas, 2002), el Programa de Edafología ofrece durante el año académico diferentes cursos bajo la

modalidad de Problema Especial, en los que se discuten temas que no se abordan en los cursos regulares y que sirven de apoyo a los estudiantes en su investigación.

Probablemente, uno de los logros más significativos del Programa de Edafología fue su ingreso, el 21 de agosto de 2002, al Programa Nacional de Postgrados (PNP) del CONACyT, por cinco años, en la categoría de Postgrado de Alto Nivel Nacional. Esta distinción, además de asegurar el otorgamiento de becas para los estudiantes, proporciona fondos adicionales para el desarrollo de sus Programas de Maestría y Doctorado.

Un análisis retrospectivo del Programa de Edafología, en los últimos seis años (1998-2003), permite observar el comportamiento de su matrícula. Tradicionalmente, ha ingresado un mayor número de estudiantes de maestría que de doctorado, en una proporción promedio de 1.7:1 (21.8 de maestría:12.1 de doctorado), con excepción del año 2002, en el que el ingreso de estudiantes doctorales fue superior (Figura 2). Durante los años 2000 y 2001 se registró la matrícula más alta de estudiantes totales; en este periodo se aceptaron 131 estudiantes de maestría y 73 de doctorado.

En relación con el rubro de graduación (Figura 3), como un reflejo del ingreso de estudiantes, se graduó por año un mayor número de estudiantes de maestría que de doctorado, en una proporción de 2.4:1 (17.3 de maestría: 7.2 de doctorado). Es importante puntualizar que los datos presentados en la Figura 3 corresponden a estudiantes que terminaron sus postgrados en los tiempos reglamentarios y a estudiantes rezagados. En total, dentro del periodo de análisis, se graduaron 147 estudiantes, con una ligera fluctuación en el número de estudiantes graduados por año (en promedio 24.5); el mayor número se registró en 1999, año en el que se graduaron 29 estudiantes.

Cuadro 2. Profesores Investigadores, con grado doctoral, adscritos al Programa de Postgrado en Edafología.

Área: Fertilidad de Suelos

Dr. José Isabel Cortés Flores
 Dr. Roberto Núñez Escobar
 Dr. Antonio Trinidad Santos
 Dr. Víctor H. Volke Haller
 Dr. Antonio Turrent Fernández[§]
 Dr. Jorge D. Etchevers Barra
 Dra. Claudia M. Isabel Hidalgo Moreno
 Dr. Vicente Espinosa Hernández
 Dr. Jesús M. González Ríos

Área: Génesis y Clasificación de Suelos

Dr. Carlos A. Ortiz Solorio
 Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena
 Dr. Enrique Ojeda Trejo

Área: Nutrición Vegetal

Dr. Gabriel Alcántar González
 Dr. Manuel Sandoval Villa
 Dr. Gustavo A. Castillo Baca
 Dr. Prometeo Sánchez García
 Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez
 Dr. Juan Luis Tirado Torres
 Dr. Arturo Galvis Spinola

Área: Física de Suelos

Dr. Gerardo S. Benedicto Valdés
 Dr. Manuel Anaya Garduño
 Dr. Benjamín Figueroa Sandoval
 Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro
 Dr. Jorge L. Tovar Salinas

Área: Microbiología de Suelos

Dr. Ronald Ferrera-Cerrato
 Dr. David Espinosa-Victoria
 Dra. Ma. del Carmen A. González
 Dr. Jesús Pérez Moreno
 Dr. Roberto Quintero Lizaola

Área: Química de Suelos

Dr. Lenom J. Cajuste
 Dr. Rogelio Carrillo González

[§] Profesor de Tiempo Liberado

Cuadro 3. Profesores investigadores que han presidido a la comunidad de Edafología del Colegio de Postgraduados de 1959 a 2004.

Profesor investigador	Nombre del cargo	Periodo
Ing. Mariano Villegas Soto ⁺	Jefe del Departamento de Suelos (ENA)	1954-1959
M. Sc. Nicolás Aguilera Herrera [#]	Jefe del Departamento de Suelos (ENA)/ Presidente de la Rama de Suelos (CP)	1959-1965
Ing. Donaciano Ojeda Ortega ^δ	Jefe del Departamento de Suelos (ENA)	1962-1963
Dr. Ramón Fernández González	Jefe del Departamento de Suelos (ENA)/ Presidente de la Rama de Suelos (CP)	1965-1967
Dr. Roberto Núñez Escobar	Jefe del Departamento de Suelos (ENA)/ Presidente de la Rama de Suelos (CP)	1967-1970
Dr. Roberto Núñez Escobar	Presidente de la Rama de Suelos (CP)	1970-1974
Dr. Heriberto Cuanalo de la Cerda	Director del Centro de Edafología	1974-1978
Dr. Manuel Anaya Garduño	Director del Centro de Edafología	1978-1986
M. C. Carlos A. Ortiz Solorio	Director del Centro de Edafología	1986-1989
M. C. Jorge L. Tovar Salinas	Director del Centro de Edafología/ Director del Instituto de Recursos Naturales	1989-1994
Dr. Gabriel Alcántar González	Coordinador de la Especialidad de Edafología	1994-1997
Dr. Víctor H. Volke Haller	Coordinador de la Especialidad de Edafología	1997-2000
Dr. David Espinosa Victoria	Coordinador del Programa de Edafología	2000-2003
Dr. Manuel Sandoval Villa	Coordinador del Programa de Edafología	2003-2006

⁺ Primer Jefe del Departamento de Suelos de la Escuela Nacional de Agricultura (ENA).

[#] Desde la creación del CP (1959), hasta su separación de la ENA (1970), una misma persona presidió el Departamento de Suelos de la ENA y la Rama de Suelos del CP, excepto en el periodo 1962-1963.

^δ Nombramiento por el Director de la ENA, Ing. Enrique Espinoza Vicente.

Tal vez el indicador que más preocupa a las instituciones de educación superior es la eficiencia terminal; el Programa de Postgrado en Edafología no es la excepción. Los datos de eficiencia terminal que se presentan en la Figura 4, se analizan en función del Reglamento General del Colegio de Postgraduados de 1998, que estableció 36 y 48 meses como periodos reglamentarios para culminar los Programas de Maestría y Doctorado, respectivamente. El número de meses que los estudiantes de maestría y doctorado emplearon para culminar sus programas de postgrado osciló de 30.9 a 32.9 y de 48.8 a 56.8, respectivamente. Es necesario aclarar que para la obtención de estos datos no se consideraron los casos excepcionales de estudiantes rezagados que emplearon más del doble de meses reglamentarios para culminar sus programas de postgrado. En resumen, considerando la observación anterior, durante el periodo analizado, los estudiantes obtuvieron sus grados de maestría y doctorado en Edafología en 32.06 y 56.06 meses, respectivamente. Así, la eficiencia terminal para el Programa de Maestría se encuentra dentro del límite permisible, no así el de doctorado, cuya eficiencia terminal se encuentra por arriba de 48 meses y con tendencia al incremento dentro del periodo evaluado. Por último, otros logros conseguidos por el Programa de Postgrado en Edafología, en el año 2000, fueron el establecimiento de las nuevas oficinas de la Coordinación del Programa, en el segundo nivel del edificio de Edafología e Hidrociencias, así como la inauguración de su propio laboratorio de cómputo.

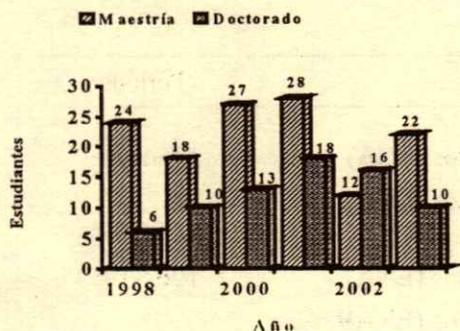


Figura 2. Ingreso de estudiantes a los Programas de Maestría y Doctorado en Edafología de 1998 a 2003.

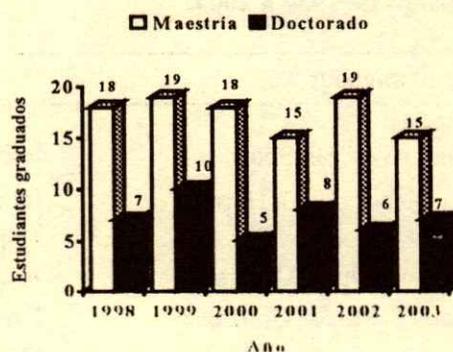


Figura 3. Estudiantes graduados en los Programas de Maestría y Doctorado en Edafología de 1998 a 2003.



Figura 4. Meses invertidos por los estudiantes para culminar su Programas de Maestría o Doctorado en Edafología de 1998 a 2003.

FUTURO DEL PROGRAMA DE POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

A manera de conclusión, se puede decir que, sin lugar a dudas, los logros del Programa de Postgrado en Edafología son el resultado de la actividad de su talentosa comunidad académica. No obstante, dado el contexto neoliberal, que en el rubro de educación persigue una menor participación del Estado y, por ende, la privatización de la educación superior en México, el Programa de Postgrado en Edafología debe afianzar su pertinencia como programa educativo clave en la formación de recursos humanos en las Ciencias Agrícolas, así como su permanencia en el Programa Nacional de Postgrados del CONACyT para contar con el beneficio de becas para todo aquel estudiante que desee realizar un postgrado en la Ciencia del Suelo.

Por otro lado, probablemente la realización de actividades de docencia e investigación en suelos, por el suelo mismo, no sea lo más recomendable dentro del entorno global, de ahí la necesidad de establecer los mecanismos que permitan llevar a cabo eficientemente el trabajo inter y transdisciplinario, como programas de postgrado y proyectos de investigación "sándwich" con instituciones nacionales e internacionales, por ejemplo. Así, es necesario cambiar el *modus operandi* del Programa, que durante 45 años ha promovido el surgimiento de individualidades exitosas, pero no el impacto, como comunidad, a nivel nacional e internacional.

Aunque durante el año 2003 se realizó una revisión del programa curricular con el propósito de eliminar cursos sin demanda e incluir nuevos, así como un estudio para conocer el grado de traslape en el contenido de éstos, será de vital importancia llevar a cabo la revisión del programa curricular por lo menos cada tres años, con la finalidad

de adecuarlo a las necesidades del entorno local, nacional e internacional. Sería muy recomendable incluir, en el futuro inmediato, asignaturas relacionadas con el manejo integrado del recurso suelo; el impacto social, económico y político; y la legislación del uso de este recurso. En este mismo renglón deberán iniciarse los trabajos tendientes a la creación de maestrías tecnológicas, que satisfagan las expectativas de instituciones educativas, instancias gubernamentales y organizaciones no gubernamentales, ya que, en muchos casos, éstas no requieren de la información de investigadores, sino del adiestramiento y de la actualización de sus académicos y técnicos.

Por otro lado, deberá considerarse, con toda seriedad, la recomendación del PNP-CONACyT en el sentido de incluir investigaciones y técnicas de frontera para el estudio del sistema suelo-planta, como las técnicas moleculares, entre otras.

De igual forma, es clara la necesidad de un programa agresivo de actualización de la planta académica del Programa de Postgrado de Edafología, tanto en áreas científicas de frontera, como en aspectos de didáctica, calidad educativa y competencias laborales, entre otras.

Por último, dada la calidad y capacidad de la planta académica del Programa de Postgrado en Edafología, deberán ponerse en marcha, en el futuro inmediato, las acciones pertinentes para solicitar su ingreso a los Programas de Alto Nivel Internacional del PNP-CONACyT.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece sinceramente las observaciones y sugerencias hechas al manuscrito por el Dr. Roberto Núñez Escobar, Profesor Investigador Emérito del Colegio de Postgraduados y profesor de muchas generaciones en el Programa de Edafología. Igualmente, el autor agradece al M.C. Jorge Alvarado López por la minuciosa revisión del manuscrito; al Sr. Ramiro Ramírez, encargado del Laboratorio de Cómputo del Programa de Edafología, por su apoyo con la información requerida de la Base de Datos del Programa; y a la Srita. Yolanda Díaz González, por su invaluable apoyo en la captura y en el procesamiento del manuscrito.

REFERENCIAS

- Base de Datos del Programa de Edafología. 2003. Base de Datos del Programa de Edafología. Programa PADRON versión 2003. CONACYT.
- Espinosa-Victoria, D. 2002. Informe Anual 2002 del Programa de Edafología al Padrón de Postgrados de Excelencia del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Espinosa-Victoria, D. 2003. La Ciencia del Suelo en el Colegio de Postgraduados. Breve Reseña Histórica, Planta Académica y Catálogo de Cursos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Laird, J. R. 1989. Evolución de la Ciencia del Suelo en México y los desafíos del futuro. *Terra* 7: 173-189.
- Núñez E., R. 2000. Academia de Ciencias Agrícolas en el Colegio de Postgraduados. Evolución de la investigación y la educación en suelos en el Colegio de Postgraduados. Inédito.
- Núñez E., R. 2003. Análisis del Contenido Analítico de Cursos del Programa de Edafología. Inédito.
- Reglamento de Actividades Académicas. 2002. Colegio de Postgraduados. Reglamento de Actividades Académicas aprobado por el H. Consejo Técnico el 21 de febrero del 2002.
- Reglamento General del Colegio de Postgraduados. 1998. Colegio de Postgraduados. Reglamento de Actividades Académicas aprobado por el H. Consejo Técnico el 18 de marzo de 1998.
- Reglamento General del Colegio de Postgraduados. 2002. Colegio de Postgraduados. Reglamento General aprobado por el H. Consejo Técnico el 21 de febrero del 2002.
- Tovar S., J. L. 1986. El Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. UACH, Chapingo, estado de México. México.
- Tríptico de la Especialidad de Edafología. 1997. Instituto de Recursos Naturales. Maestría y Doctorado en Ciencias. Especialidad de Edafología. Montecillo, estado de México, México.

Revisores de este número
Reviewers of this number

Adriano Anaya, Ma. de Lourdes	Tapachula, Chiapas, México
Alcantar González, Gabriel	Montecillo, estado de México
Benavides Mendoza, Adalberto	Saltillo, Coahuila, México
Blanco Vicente, Ma. del Carmen	Bahía Blanca, Argentina
Campos Cascaredo, Adolfo	Xalapa, Veracruz, México
Castellanos Ramos, Javier Z.	Celaya, Guanajuato, México
Estrada Avalos, Juan	Ciudad Lerdo, Durango, México
Etchevers Barra, Jorge D.	Montecillo, estado de México
Ferrera Cerrato, Ronald	Montecillo, estado de México
Figuroa Viramontes, Uriel	Torreón, Coahuila, México
García Mina Freire, José María	Orcoyen Navarra, España
García Préchac, Fernando	Montevideo, Uruguay
Gardezi, Abdul Khalil	Montecillo, estado de México
González, Norma Susana	Balcarce, Argentina
López de Rodríguez, Marisol L.	Aragua, Venezuela
Maldonado Torres, Ranferi	Chapingo, estado de México
Martínez, Gloria Cristina	Corrientes, Argentina
Namucho Vargas, Rodolfo	Jiutepec, Morelos, México
Oyarzún, Carlos	Valdivia, Chile
Palma Moreno, Germán	Jiutepec, Morelos, México
Parada Carrasco, Ana María	Santiago, Chile
Paredes González, Ma. Josefina	México, D.F.
Sánchez Carpintero, Ignacio	Pamplona, España
Saucedo Rojas, Heber	Jiutepec, Morelos, México
Serrano Covarrubias, Luis. M.	Chapingo, estado de México
Solleiro Rebolledo, Elizabeth	México, D.F.
Tijerina Chávez, Leonardo	Montecillo, estado de México
Torrent Castellet, José	Córdoba, España
Trinidad Santos, Antonio	Montecillo, estado de México
Valdes Ramírez, María	México, D.F.
Vergara Sánchez, Miguel Ángel	Chapingo, estado de México
Zárate Valdez, José Luis	Ciudad Obregón, Sonora, México

Editores Técnicos de este número
Technical Editors of this number

Alvarado López, Jorge	Montecillo, estado de México
Coras Merino, Pablo M.	Chapingo, estado de México
Cristóbal Acevedo, David	Chapingo, estado de México
González Chávez, Ma. del Carmen	Montecillo, estado de México
Gutiérrez Castorena, Carmen	Montecillo, estado de México
Rodríguez Mendoza, Ma. Nieves	Montecillo, estado de México
Sandoval Villa, Manuel	Montecillo, estado de México
Vargas Hernández, Mateo	Chapingo, estado de México

- Abraham-Gutiérrez, José Héctor 459
 Acevedo-Sandoval, Otilio 143, 485
 Acosta-Díaz, Efraín 49
 Acosta-Gallegos, Jorge A. 49
 Alcántar-González, Gabriel 91
 Almeida-Acosta, F.H. Eduardo 459
 Alva-Reséndiz, Mario H. 169
 Ángeles-Cervantes, Efraín 425
 Arreola-Enriquez, Jesús 351
 Arroyo-Vázquez, León 169
 Baca-Castillo, Gustavo A. 175, 401, 477
 Barea, J.M. 59
 Barron-Reyna, Horacio 35
 Bautista-Zúñiga, Francisco 243
 Becerril-Román, A. Enrique 469
 Benavides-Mendoza, Adalberto 41
 Bravo-Espinosa, Miguel 377
 Cadena-Zapata, Martín 161
 Camacho, Alejandro D. 207
 Camacho-Chiu, Wilder 351
 Campos-Magaña, Santos Gabriel 161
 Carreón-Hernández, Enrique 499
 Carrillo-González, R. 401, 477
 Castellanos Ramos, Javier Z. 91, 187
 Cayetano-Rodrigo, Abel 207
 Cruz-Chávez, Enrique 143, 485
 Cruz-Sánchez, Misael 143, 485
 Díaz-Ortega, Araceli C. 109
 Díaz-Padilla, Gabriel 267
 Dorantes, Ivonne 197
 Escalante Estrada, J. Alberto 109, 409
 Espinosa-Victoria, D. 225, 317, 523
 Espiricueta-Reyna, Tiburcio 169
 Estrada-Botello, M.A. 81
 Estrada-Medina, Héctor 243
 Etchevers-Barra, Jorge D. 81, 359
 Faz-Contreras, Rodolfo 299
 Fernández-Reynoso, Demetrio S. 437
 Ferrera-Cerrato, Ronald 197, 307
 Figueroa-Sandoval, B. 307
 Figueroa-Viramontes, Uriel 343
 Fimbres-Fontes, Adán 433
 Flores-Castro, Kinardo 143
 Flores-Román, David 1, 255, 389
 Flores-Sánchez, Diego 71
 Galindo-González, Guillermo 127, 369
 Gallegos-Sánchez, J. 307
 García-Arellano, David 279
 García-Calderón, Norma E. 289, 425
 García-Espinosa, R. 317
 Gavi-Reyes, F. 81
 Gaytán-Mascorro, Arturo 299
 Gil-Muñoz, Abel 459
 Gómez-Moliné, Margarita R. 515
 González-Cervantes, Guillermo 279
 González-Chávez, Ma. del Carmen 507
 González-Eguiarte, Diego 91, 335
 González-Iturbe, José A. 243
 González-Mendoza, D. 317
 Granados-Sánchez, Diódoro 117
 Guerrero-Peña, Armando 153
 Guillén-Pérez, Luis Alipio 451
 Gutiérrez, Mélida 499
 Gutiérrez-Castorena, Ma. del Carmen 1, 11, 135, 153, 507
 Gutiérrez-del Río, Emiliano 299
 Gutiérrez-Rodríguez, M. 409
 Guzmán, M. 187
 Hernández-Acosta, Elizabeth 217
 Hernández-Hernández, Juan 117
 Hidalgo-Moreno, Claudia 11
 Huber, Anton 417
 Ibáñez-Martínez, Armando 469
 Ikkonen, Elena 425
 Jácome-Maldonado, Sergio 161
 Jiménez-Osornio, Juan J. Ma. 243
 Juárez-López, J. Francisco 351
 Kohashi-Shibata, Josué 175, 401, 477
 Lacaze, Bernard 23
 Leyva, Marco A. 207
 Lopes, Vicente L. 377
 López-Ávila, Guillermo 1
 López-Martínez, José Dimas 35
 López-Pérez, Luis 91
 López-Reyes, L. 225
 López-Ríos, Georgina F. 117
 Loredó-Osti, C. 225
 Maiti, Ratikanta 41
 Mapes-Sánchez, Cristina 109
 Martínez-Damián, Miguel Ángel 217
 Martínez-Garza, Ángel 175, 401, 477
 Martínez-Moreno, David 109
 Martínez-Rubín de Celis, Enrique 35
 Maya, Yolanda 23
 Medina-Morales, Ma. del Consuelo 343, 445
 Mejía-Sáenz, Enrique 327, 437
 Mena-Covarrubias, Jaime 369
 Mendoza-Palacios, J.D. 81
 Mercado-Doménech, Serafín 451
 Miramontes-Flores, Benjamín 169
 Monteforte, Mario 23
 Morcno-Cáliz, Elvia, 153
 Muñoz-Ramos, J.J. 187
 Nájera-Rincón, Miguel B. 335
 Navarro-Garza, Hermilio 71
 Nikolskii-Gavrilov, I. 81
 Obrador-Olán, J. Jesús 351
 Oropeza-Mota, José Luis 327, 437
 Orozco-Romero, José 99
 Ortiz-García, Carlos F. 267
 Ortiz-Hernández, Enrique 143, 485
 Ortiz-Solorio, Carlos A. 1, 11, 135, 153, 267
 Osterkamp, Waite R. 377

- Padilla-Ramírez, J. Saúl 49
Palacios-Vélez, Enrique 217
Palacios-Vélez, Oscar L. 81
Palma-López, David J. 81, 153, 267, 351
Palomo-Gil, Arturo 299
Parra-Quezada, Rafael A. 469
Parra-Terraza, S. 401, 477
Passini, Marie-Françoise 23
Pastrana-Aponte, Laureano 351
Peña-Olvera, Benjamín V. 459
Pérez-Agis, Esperanza 335
Pérez-Olvera, Antonia 71
Pérez-Zamora, Octavio 99
Pimienta-Barrios, Enrique 335
Placencia-de la Parra, J. 317
Preciado-Rangel, Pablo 175
Ramírez-Godina, Francisca 41
Ramírez-Rodríguez, Homero 41
Ramos-Reyes, Rodimiro 267
Reta-Sánchez, David G. 299
Reyes-Ortigoza, Amada Laura 289
Reyes-Sánchez, Laura Bertha 515
Reynolds, Matthew P. 409
Reynolds-Chávez, Antonio 161
Robledo-Torres, Valentín 41
Robles, C. 59
Rodríguez-González, M. Teresa 409
Rodríguez-Tapia, Silvia 11
Rodríguez-Zaragoza, Salvador 197
Rubiños-Panta, Juan Enrique 217
Ruiz-Corral, José Ariel 91
Ruiz-Posadas, Lucero del Mar 49
Salazar-Torres, Alicia Marcelina 41
Salgado-García, Sergio 351
Sánchez-Cohen, Ignacio 279
Sánchez-García, Prometeo 109
Sánchez-Quintanar, Concepción 451
Sandoval-Castro, Engelberto 459
Santamaria-César, Jesús 343
Segura-Castruita, Miguel A. 1, 135
Tijerina Chávez, Leonardo 175
Tirado-Torres, Juan L. 175
Torres-Benites, Elibeth 437
Torres-Morán, Pablo 335
Trecaman, Ramiro 417
Trejo-López, Carlos 49, 401, 477
Trinidad-Santos, Antonio 109, 307
Uribe-Gómez, Sergio 161
Valdés, María 207
Valdez-Cepeda, Ricardo David 35
Valdivia-Alcalá, Ramón 217
Vargas-Hernández, Mateo 359
Vázquez-García, Marcelino 335
Vela-Correa, Gilberto 255, 389
Velasco-Velasco, Joel 197, 307
Vergara-Sánchez, Miguel Ángel 359
Villegas-Romero, Isidro 327
Wright, Sara 507
Zamudio-González, Benjamín 91

NORMAS PARA PUBLICAR EN TERRA *Latinoamericana*

TIPOS DE MANUSCRITOS PARA PUBLICACIÓN

La Revista *TERRA Latinoamericana* acepta trabajos en español, portugués e inglés, sobre temas relacionados con la ciencia del suelo y el agua. Éstos pueden ser artículos científicos, notas de investigación, ensayos, cartas al editor y reseñas de libros.

Se entiende por artículo científico aquél basado en un trabajo de investigación en el cual se ha aplicado en forma rigurosa el método científico y se ha estudiado el efecto que tienen diferentes tratamientos sobre la respuesta medible de un sistema, como metodología para comprobar o rechazar una hipótesis claramente establecida en el trabajo.

Las notas de investigación son artículos basados en trabajos experimentales que presentan aspectos metodológicos novedosos o resultados que el autor quisiera publicar antes de finalizar su investigación.

Los ensayos son artículos basados en una recopilación de artículos científicos o informes de investigación, en los que el autor aporta su opinión personal sobre el tema y establece conclusiones respecto al estado actual del conocimiento sobre el mismo.

TERRA Latinoamericana publicará en la sección cartas al editor, aquéllas que juzgue convenientes, las cuales deben contener opiniones o comentarios debidamente argumentados. Esta sección tiene por objeto fomentar la discusión sobre temas publicados en sus páginas o de interés para la comunidad científica.

La reseña de libros es una sección destinada a dar a conocer la obra, en particular de autores mexicanos e iberoamericanos, que sea de interés para los científicos del suelo.

Los trabajos que se envíen deberán ceñirse a estas normas para publicación y estarán sujetos a revisión por el Comité Editorial o por quien éste designe, antes de su publicación. No se aceptan trabajos ya publicados o que estén sometidos a la consideración de otras revistas.

CONTENIDO Y FORMATO DEL MANUSCRITO

Los artículos científicos y las notas científicas que se presenten deberán constar de las siguientes partes:

- 1) título, título en inglés;
- 2) autor(es);
- 3) institución(es) del trabajo y dirección de los autores;
- 4) Resumen;
- 5) Palabras clave;
- 6) Summary;
- 7) Index words;
- 8) Introducción;
- 9) Materiales y Métodos;
- 10) Resultados y Discusión;
- 11) Conclusiones y
- 12) Literatura Citada.

El Comité Editorial podrá aceptar algunas modificaciones a esta estructura, cuando el tenor del texto así lo aconseje.

Los ensayos deberán constar de las siguientes partes: 1) título, título en inglés; 2) autor(es) y dirección; 3) institución donde se desarrolló el trabajo y dirección de autores; 4) resumen; 5) Palabras clave; 6) Summary; 7) Index words; 8) Introducción; 9) Desarrollo del tema, con los subtítulos que se estimen convenientes; 10) Discusión, cuando proceda; 11) Conclusiones y 12) Literatura Citada.

Las cartas al editor y las reseñas de libros no tienen un formato definido, pero no deberán exceder de dos cuartillas a doble espacio.

Los trabajos deben enviarse con original y dos copias, en papel tamaño carta a doble espacio, dejando márgenes de 2.5 cm en los cuatro costados y con las líneas numeradas. Las páginas, incluyendo los cuadros y las figuras, se numerarán progresivamente. El texto no deberá exceder 15 páginas para un artículo científico y de ocho para una nota científica **incluidos cuadros y figuras**. En la primera versión, cada cuadro o figura deberá estar insertado en el texto.

Los cuadros y las figuras contendrán sólo la información esencial y en ningún caso repetirán los datos que se presenten en otra forma. Las unidades que se empleen serán las del Sistema Internacional de Unidades y Medidas, **por ejemplo para ppm usar mg kg^{-1} o mg L^{-1}** . Los manuscritos, figuras y cuadros deberán entregarse también en un disquete de 3.5" en procesador Word para Windows de la versión más reciente. Las figuras deberán estar en un formato que permita hacer modificaciones posteriores.

FORMATO PARA PUBLICACIÓN

En Terra *Latinoamericana*, los trabajos se publican con el formato que se describe a continuación; sin embargo, los manuscritos deben ser preparados por los autores como se indicó en la sección anterior y tomando en cuenta, hasta donde sea posible, las instrucciones en esta sección. El personal editorial de Terra *Latinoamericana* preparará la versión definitiva para su impresión en las páginas de la revista.

Título. El título se escribirá con mayúsculas, al inicio, centrado, con negritas y tipo de letra TIMES NEW ROMAN 14, se colocará su traducción al inglés debajo del título en español. El título en inglés se escribirá con minúsculas, excepto la primera letra de cada palabra, centrado, con negritas y tipo de letra TIMES NEW ROMAN 12. Para el encabezado de páginas se requiere un título corto con 60 caracteres o menos.

Autores. Se incluirá el nombre del autor o autores en la manera en que éstos acostumbren escribirlo en sus publicaciones. No se usarán títulos ni grados. La primera letra del nombre(s) y apellidos se escribirán con mayúsculas. Los nombres de los autores se separarán por comas, se centrarán, con negritas, tipo de letra TIMES NEW ROMAN 12, a un espacio después del título en inglés.

Institución(es) patrocinadora(s) y dirección de los autores. El objetivo de esta parte del artículo es dar el crédito respectivo a la institución que patrocinó el trabajo y que los lectores puedan contactar a los autores en caso necesario; la dirección postal y electrónica del autor responsable deberán quedar claramente especificadas. Para los otros autores, incluir sólo el nombre y dirección de la institución. Esta identificación se escribirá con minúsculas, excepto las siglas, debajo de los autores, centrado y con tipo de letra TIMES NEW ROMAN 11.

Notas al pie de página. Se podrán utilizar, cuando sea necesario para identificar información adicional; se numerarán progresivamente a través de todo el texto. **Deberán emplearse sólo cuando sea imprescindible.**

Forma de titular. Los títulos tienen diversos órdenes y señalan automáticamente la posición de una parte del artículo dentro de éste.

Título de primer orden. Es el título principal del artículo.

Título de segundo orden. A este tipo corresponden las diferentes partes del artículo; Resumen, Summary,

Introducción, etc. Se escriben con mayúsculas, centrados, con negritas (TIMES NEW ROMAN 11).

Títulos de tercer orden. Se escriben al margen izquierdo, con minúsculas, excepto la primera letra de las palabras, en negritas, con espacios sencillos después del último texto escrito y antes del que continúa.

Títulos de cuarto orden. Se escriben al margen izquierdo, con negritas, con minúsculas excepto la primera letra, con punto seguido de texto. Sin numeración.

Títulos de quinto orden. Se escriben al margen izquierdo, sin negritas, con minúsculas excepto la primera letra, con punto seguido de texto. Sin numeración.

Resumen. Esta sección debe sintetizar, con menos de 300 palabras, los aspectos más importantes del trabajo, esto es, su justificación, importancia, método experimental (cuando corresponda) y las conclusiones más importantes.

Palabras clave. Estas palabras no deben incluir los mismos términos contenidos en el título. Se colocan a un espacio debajo del resumen al margen izquierdo, con un máximo de cinco. El término "Palabras clave:" se escribe con letra TIMES NEW ROMAN 11, con cursivas, negritas y las palabras clave con el mismo tipo de letra, cursivas, sin negritas. Ejemplo:

Palabras clave: Rizósfera, agroquímicos.

Summary. Se siguen las mismas normas que para el Resumen en español.

Index words. Se seguirán las instrucciones dadas para palabras clave.

Introducción. En esta sección se indica la motivación, la importancia y los objetivos del trabajo que llevan implícitas las hipótesis del mismo. Contiene, además, los aspectos más relevantes del tema tratados por otros autores e identificados en la revisión de literatura. La Introducción no debe exceder tres cuartillas a doble espacio.

Materiales y Métodos. Esta sección debe describir las características relevantes de los materiales usados en el estudio y los métodos experimentales empleados. Se le debe dar particular importancia a la descripción del método experimental utilizado para lograr los objetivos planteados. Debe mostrar concordancia plena con las hipótesis.

Resultados y Discusión. Aquí se incluyen los resultados obtenidos en la investigación. Éstos se presentarán en forma de texto, cuadros, o figuras y **no deberán duplicar la información presentada.**

Además deben contener resultados que puedan ser fácilmente calculables.

En la Discusión se resaltarán los principios más importantes y las relaciones causa-efecto derivadas del análisis de los resultados. Además, se deberá explicar, en función de las observaciones hechas, el porqué de lo observado sin establecer suposiciones. Los resultados obtenidos se compararán con los de otros investigadores y se señalarán las divergencias y las semejanzas.

Conclusiones. Las primeras conclusiones que se presenten deben ser aquellas correspondientes a los objetivos planteados. Se pueden incluir, además, otras conclusiones relevantes y recomendaciones que emanen del trabajo.

Citas en el texto. Las citas en el texto se harán de acuerdo con la forma en que éstas participan en la oración. Se seguirán las siguientes reglas: 1) se citará el apellido principal del(los) autor(es) y el año, cuando se trate de uno o dos autores, y el apellido principal del primer autor seguido de *et al.* y el año cuando se trate de tres o más autores; 2) las citas, cuando más de una, se colocarán en orden cronológico; 3) cuando el nombre del(los) autor(es) participa en la oración se colocará el apellido principal seguido del año entre paréntesis, ejemplo: Martínez (1982) observó que..., Carrasco (1983) y Merino (1984) encontraron gran diferencia.; 4) cuando la cita se agrega al final de la oración los nombres de los autores y el año se colocarán entre paréntesis separados por una coma, ejemplo: al final de la cosecha (Martínez, 1982) o (Carrasco, 1983; Merino, 1984) o (Bravo *et al.*, 1979); 5) cuando el autor tiene más de una publicación en un año se adiciona a este a, b, c, ejemplo: (Moreno, 1984a), (Moreno, 1984b) o (Moreno 1984a,b); 6) Las referencias bibliográficas consultadas en internet, se redactarán de acuerdo con lo enunciado previamente, además de incluir la dirección electrónica y fecha en que se obtuvo la consulta.

Howell, A. T. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture.

<http://agron.sci-journals.org/cgi/content/abstract/93/2/281>

(28 mayo 2001).

Literatura Citada. Para confeccionar la lista de citas de literatura se seguirán las normas que se detallan con ejemplos a continuación.

1. Caso de artículos en revistas seriadas, ejemplo:
Contreras-Hinojosa, J. R., V. Volke-Haller, J. L. Oropeza-Mota, C. Rodríguez-Franco, T. Martínez-Saldaña y A. Martínez-Garza. 2003. Encalado y fertilización fosfatada en el cultivo de papa en un Andosol de la Sierra Veracruzana. *Terra* 21: 417 - 426.

Obsérvese que la inicial del nombre propio se ha trasladado al final de los apellidos sólo para el caso del primer autor, y que se escriben completos los apellidos ligados con guión. Se mantiene el nombre propio en el lugar que corresponde en el resto de los casos. Es común que los nombres ingleses se escriban con dos nombres personales y un apellido; ejemplo: L.J. Brown, el cual se redactará en caso de ser primer autor como Brown, L.J. y como L.J. Brown, si es coautor.

2. Caso de artículos en una publicación colectiva no periódica con o sin editor, ejemplo:

a) con editor

Turrent F., A. 1984. Los agrosistemas del trópico. pp. 315-328. *In*: E. Hernández X. (ed.). Los sistemas agrícolas de México. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

b) sin editor

Cortés F., J. I. 1984. El manejo de los frutales en zonas frías. pp. 181-192. *In*: La fruta y su perspectiva en México. CONAFRUT. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F.

3. Caso de los boletines técnicos u otras publicaciones seriadas no periódicas, ejemplo:

Hartemink, A. E. 2001. Publish or perish (6) - Soil science for pleasure. *Bull.* 100:50-56. International Union of Soil Science. Vienna, Austria.

4. Caso de los libros, ejemplo:

Martínez, G. A. 1995. Diseños Experimentales. Métodos y elementos de teoría. Trillas. México, D.F.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press. London, U.K.

No deben incluirse referencias de tesis ni de trabajos publicados en memorias y en proceedings. La lista de citas se confeccionará en orden alfabético, con sangría francesa de 0.6 cm, con tipo de letra TIMES NEW ROMAN 9, sólo se incluirá en ella los trabajos citados en el texto.

Otros Aspectos del Manuscrito

Para referir a plantas, animales u otros organismos, usar el nombre en latín binomial y con letras itálicas. A continuación se dan algunas indicaciones acerca de los cuidados y consideraciones

que hay que tomar en cuenta para la elaboración de las figuras, cuadros, mapas, etc. Los cuadros deben ser numerados en forma secuencial con números arábigos y en el mismo orden como aparecen en el texto. Los cuadros y las figuras se emplean para reemplazar al texto, cuando el contenido de éstos no puede expresarse claramente con palabras o su uso contribuye a un ahorro importante de espacio. Los cuadros y las figuras deben ser claros, simples y concisos. Para ello es necesario seleccionar los datos de modo que se presenten sólo aquellos que se emplearán para hacer énfasis en algún aspecto o que expliquen otros. Los datos deben ordenarse en una forma tal que sean fáciles de interpretar.

En el pie de cuadro se incluirán las llamadas que sean pertinentes. Los asteriscos se reservarán para indicar significación a 5% (*) y 1% (**), respectivamente; es recomendable incluir el error estándar promedio en las figuras. Otras notas serán señaladas con los siguientes símbolos en orden: †, ‡, §, ¶, #, ††, ‡‡, ..., †††.

Los cuadros deben tener tres líneas horizontales continuas: al inicio del cuadro, al inicio del campo del cuadro (no en el encabezado) y al final. El campo y el encabezado de las columnas se pueden dividir a conveniencia del autor. No se deben añadir líneas verticales. Los encabezados, de columnas y líneas, se describirán con minúsculas, excepto la primera letra de la oración. Las unidades se colocan debajo de la segunda línea horizontal. Se empleará sólo el número de cifras significativas necesarias para destacar el punto que se desee. Los cuadros no podrán ser mayores que una página tamaño carta, considerando los márgenes antes señalados.

Los mapas y las figuras incluido el título, no deben exceder las dimensiones de una página tamaño carta con márgenes especificados previamente. La leyenda debe ser con letras y números lo suficientemente grandes (con minúscula excepto la primera letra), como para que puedan leerse al ser reducidos, al igual que el grosor de los ejes y las líneas interiores. En una figura lo que interesa destacar es el contenido y no los ejes. En consecuencia, el grosor de estos últimos tiene que ser menor que el de las líneas interiores. Los puntos experimentales deben marcarse visiblemente con símbolos que puedan diferenciarse entre sí, sin color en el relleno y sin marco, por ejemplo: ○● □■ ▲▲. Para dividir los ejes se deben escoger intervalos constantes para cada uno.

Los mosaicos fotográficos deben entregarse montados en hojas de papel, totalmente terminados, con leyenda y numeración. El aumento de las microfotografías debe indicarse en la leyenda.

Agradecimientos. Podrán incluirse al final del texto, esto es, después de las Conclusiones y antes de la Literatura Citada.

Información Adicional

Para mayor información sobre la preparación de manuscritos se recomienda consultar el libro: Alvarado, L.J. 2000. Redacción y preparación del artículo científico. Segunda edición. Publicación Especial 11. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. y Colegio de Postgraduados, Agrociencia. Chapingo, México.

TERRA *Latinoamericana*

Journal of the Mexican Society of Soil Science

Instructions to Authors

SUBMISSION OF MANUSCRIPTS

Submission of manuscripts for publication should be sent in triplicate to:

Editorial Office of Terra *Latinoamericana*
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
Apartado Postal 45
56230 Chapingo, Edo. de Mexico, Mexico.
Phone and Fax: +52 (595) 9521721
e-mail: terra@correo.chapingo.mx

Upon receipt of a manuscript the authors will receive the file number of their paper. This number should be quoted in all correspondence. Papers already published, or under consideration elsewhere cannot be accepted.

TYPE OF MANUSCRIPT

The Journal welcomes concise papers presenting original research findings from authors throughout the world, making a significant contribution to the advancement of knowledge of existing soil science concepts. The Journal publishes papers of topics related to Soil Science, Water Management and Environmental Sciences. The contributions may be Scientific Papers, Research Notes and Critical Reviews. The Journal publishes also Letters to the Editor and Book Reviews.

Scientific Papers must be generated from original research in which the scientific method was implemented to accept or reject a given hypothesis.

Work based on limited experimentation will not generally be acceptable.

Work of local interest only is not considered appropriate for this International Journal.

Research Notes are articles based on experimental work that presents new methodological aspects or important results that the author wants to publish before the research project is completed.

Critical Reviews are articles in which the author reports the State of the Art about a given topic of interest to the scientific community, based on the published literature, establishing some conclusions regarding the analysis of the published data.

MANUSCRIPT

The manuscripts should be provided with a **title page**, containing the title typed in uppercase letters, centered, in English and Spanish; author(s) name(s) and affiliation(s) and including a complete address for correspondence (e-mail). A short title not exceeding 40 characters must be provided for the running headlines. Manuscripts should be typed in double space, with at least 2.5 cm margin on both side.

Scientific Papers and Research Notes should be divided into the following sections: 1) **Summary** in English and Spanish, not exceeding 300 words for scientific papers and 150 words for research notes; 2) **Index words**, include up to five; 3) **Introduction**, which should set the work in context, presenting the essential background and including a concise statement of the objectives; 4) **Material and Methods**, indicating relevant details of the experimental methods and design, the techniques and statistical methods used in the study, so that the results can be judged for validity and so

that previous experiments may serve as a basis for the design of future experiments. It is highly recommended to describe the soil type and characteristics in which the experiment was conducted; 5) **Results and Discussion**, indicating numerical results in tables or figures and should not be repeated in the text. All statements should be based on proof and not supposition, and should be supported with statistical analysis, i.e. Standard Error and Degrees of Freedom, Least Significant Difference, and Multiple Range Test. The level of significance should be indicated in the text and tables. Discussion should briefly relate the author's results of other works on the subject and give the author's conclusion; 6) **Acknowledgments** and 7) **References**.

STYLE

The acceptable languages are Spanish, English and Portuguese. For plants, insects and pathogens give the Latin binomial name (in Italics) at first mention and do not include them in the title, but in the summary. The International System of Units is required. Follow Chemical Abstracts and its indexes for chemical names. Give cation exchange capacity in mmol kg^{-1} . For ppm use mg kg^{-1} or mg L^{-1} . Use kg ha^{-1} or t ha^{-1} . For time units use min, h, d, month (abbreviate to three letters, i.e. Jan, Feb). A zero must always precede a decimal point e.g. 0.24. All abbreviations must be explained at first mention in the text. The use of asterisks is reserved to indicate statistical significance *($P < 0.05$), **($P < 0.01$), ***($P < 0.001$)

MANUSCRIPTS ON DISK

The original manuscript should always be sent on paper. After acceptance, the submission of the final version must be on disk, formatted for use on windows based computers. An accompanying printout should be provided. Word software is preferred.

Headings should be used in dividing and subdividing the paper e.g.

First-order headings: Centered, boldface type and uppercase letters Times New Roman 14. Reserved for the main title of the paper.

Second-order headings: Centered, boldface type and uppercase letters. Times New Roman 11. Used for the different parts of the manuscript i.e. Introduction.

Third-order headings: Against left margin, bold face type and first letter of each word in uppercase letter.

Fourth-order headings: In the paragraph. Lowercase letters except the first one, boldface type.

TABLES

These must be numbered consecutively with Arabic numerals, in the same order as they are mentioned in the text. Tables are always printed in a small letter type and should be provided with descriptive headings. All column headings should begin with a capital letter. Table notes should be referred to by superscript: †, ‡, §, ¶, #, ††, †††. When preparing the tables it should be considered that they could be printed in one column (85 mm) or two columns (180 mm). Tables must have three horizontal solid lines: one at the beginning of the table, the second at the beginning of the field and the last one at the end of the table. No vertical lines are allowed. All tables must present statistic parameters to do the appropriate comparisons.

FIGURES

These can be photographs, graphs, charts or diagrams. They must be included in the text. Figures may not reproduce the same matter as tables. Originals of figures must be provided of good quality, drawn or printed clearly in black on white. There should be no numbering or lettering on the originals but in the copies. Vertical axes should be labeled vertically. Keep in mind that the final reduced size is 9-point type for numbers on the axis scale, 10 to 11 points for the axis labels and 7 to 8 points for inside legends. A typewritten, double-spaced list of legends of all figures must be supplied. Each legend should contain sufficient explanation to be meaningful without cross-referencing, giving a key to all the symbols on it. The preferred symbols are ○● □■ ▲, Standard Errors of the means are strongly recommended to be included in the figures.

LITERATURE CITED

In the text the references should be quoted by the author's last name followed by the year and in date order, e.g. (Laird, 1990; Pratt and Adriano, 1993; Jensen *et al.*, 1995) or Follett (1991). The list of references should be provided at the end of the text, listing in alphabetical order, surname of first author and initials, initials and surname of following

authors, year of publication, title of the paper, name of the journal in abbreviation, volume, and first and last page, e.g.:

- Flach, K.W., W.D. Nettleton, and O.A. Chadwick. 1992. The criteria of duripans in the US soil taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize silica indurated soils. *Terra* 10: 34-45.
- Goijberg, G. and A. Aguilar-Santelises. 1985. pH del suelo y necesidades de cal. pp. 17-24. *In*: A. Aguilar-Santelises, J.D. Etchevers, J.Z. Castellanos (eds.). *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación Especial 1. Chapingo, México.
- Ryan, T.P. 1989. *Statistical methods for quality control*. John Wiley & Sons, New York.

Thompson, T.L. and T.A. Doerge. 1996. Nitrogen and water interactions in subsurface trickle irrigated leaf lettuce. II. Agronomic, economic, and environmental outcomes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 168-173.

Smith, P. G., and T. Jones. Title of article (abstract). *JASH* 4(3):54-59, <http://asac.frymulti.com> Aug. 9 2000.

The list of references should be typed in double space throughout.

PROOFS

The proofs will be sent to the authors to enable them to check correctness of the typesetting. They should be handled promptly and returned to the editorial office. No changes other than corrections should be made.

September 2004



TERRA *Latinoamericana*

FORMATO PARA LA SUSCRIPCIÓN ELECTRÓNICA A LA REVISTA TERRA *Latinoamericana*

Para el envío de todos los números de un año (a partir de 2003), el costo de suscripción electrónica es de \$200.00 pesos o su equivalente en dólares.

a) Pago con de tarjeta de crédito

Envíe su solicitud con los siguientes datos:

Nombre: _____

Dirección: _____

Numero de
tarjeta: _____

Fecha: _____

Monto (pesos): _____

Ciudad: _____

Estado: _____

País: _____

e-mail¹: _____

Teléfono: _____

Fax: _____

¹ A esta dirección le enviaremos su pedido.

b) Pago con deposito en la cuenta de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

Usted deberá depositar el monto correspondiente en la cuenta bancaria que se describe a continuación.

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,
A.C.
Cuenta 044 657115
BBVA-Bancomer Plaza 001, sucursal 3441
Texcoco, Estado de México

Universidad Autónoma Chapingo Departamento
de Suelos
km 38.5 Carr. México -Texcoco Chapingo, Méx.
Apartado Postal 45 y Código Postal 56230
Tel. y Fax: 01 595 95 2 17 21
e-mail: terra@correo.chapingo.mx



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

FRUTICULTURA



FISIOLOGÍA VEGETAL



EL INSTITUTO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD



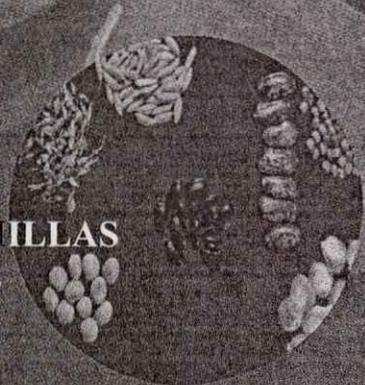
GANADERÍA

OFRECE sus Programas de Maestría en Ciencias de alto nivel nacional y de Doctorado en Ciencias competente a nivel internacional en Recursos Genéticos y Productividad reconocidos por el Padrón Nacional de Posgrado del CONACYT.

GENÉTICA



SEMILLAS



Distrito: Miguel Ángel

INFORMES:

PÁGINA ELECTRÓNICA: www.colpos.mx

DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ACADÉMICOS

TEL: 01(55)58 04 59 29, 01(595)952 02 29

FAX: 01(595)952 02 30

CORREO ELECTRÓNICO: servacad@colpos.mx

SUBDIRECCIÓN DEL INSTITUTO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

TEL: 01(55)58 04 59 72

01(595)952 02 72

CORREO ELECTRÓNICO: subirg@colpos.mx



CONACYT

IREGEP