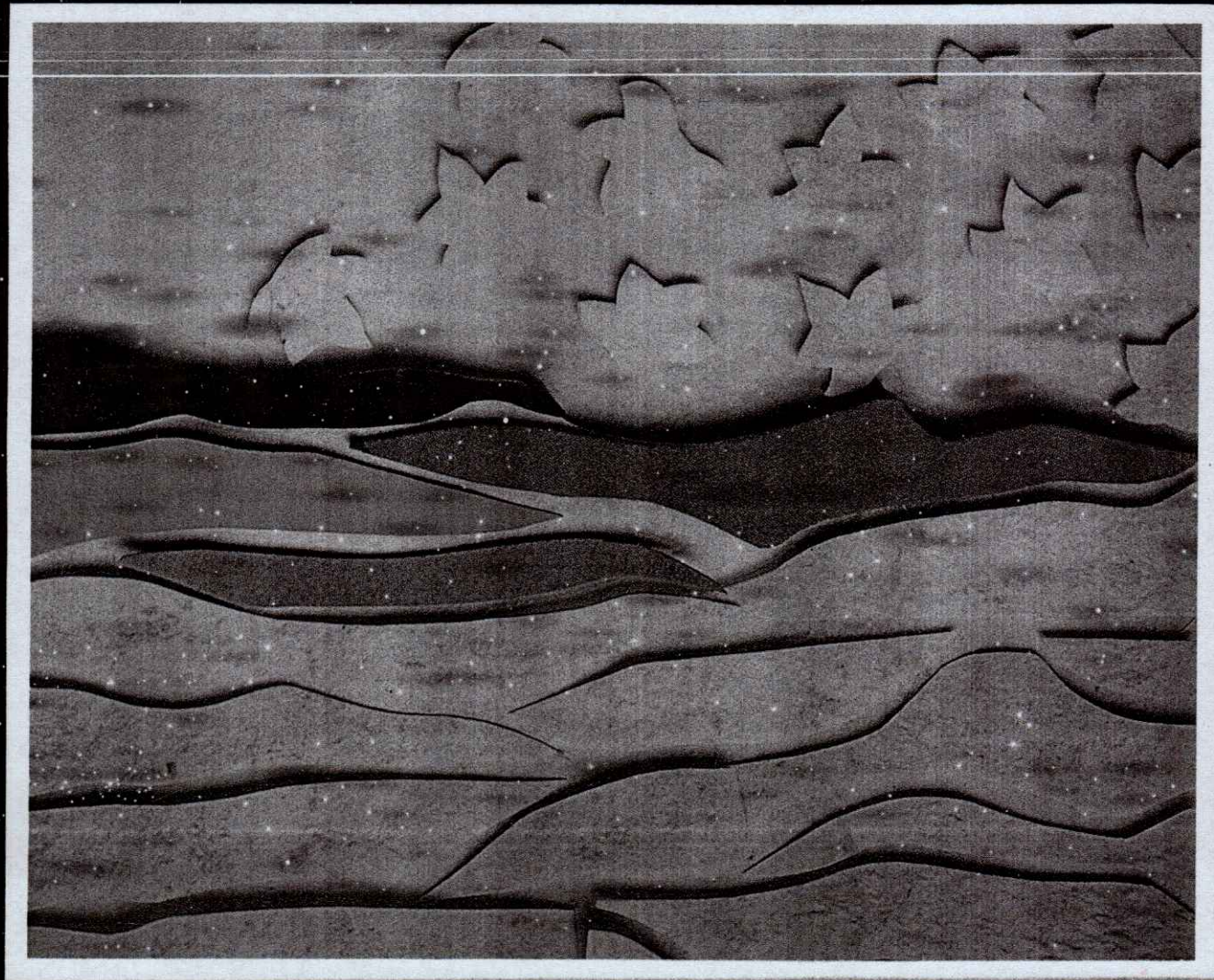


ISSN 0187-5779

TERRA

JULIO - SEPTIEMBRE DE 2000 • VOLUMEN 18 • NUMERO 3



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

TERRA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 1997-1999

Presidente	Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro
Vicepresidente	M.C. José Cisneros Domínguez
Secretario General	Dr. Prometeo Sánchez García
Tesorero	Dr. Fernando de León González
Secretario Técnico	Dra. Edna Álvarez Sánchez
Secretario de Relaciones Públicas	M.C. Ricardo Torres Cossío
Secretario de Eventos Nacionales e Internacionales	Dr. Francisco Gavi Reyes
Vocal	Biól. Rogelio Oliver Guadarrama
Vocal	M.C. Gaspar Romero Hernández

DIVISIONES Y DISCIPLINAS

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

- Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos
- Física de Suelos
- Química de Suelos
- Contaminación

División II: Relación Suelo - Clima - Biota

- Nutrición Vegetal
- Relación Agua - Suelo - Planta - Atmósfera
- Biología del Suelo
- Tecnología y Uso de Fertilizantes
- Uso y Manejo del Agua

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

- Conservación del Suelo
- Drenaje y Recuperación
- Fertilidad
- Productividad de Agrosistemas

División IV: Educación y Asistencia Técnica

- Educación
- Crédito y Asistencia Técnica

TERRA registro en trámite.

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Julio - Septiembre de 2000 Volumen 18 Número 3

ISSN 0187 - 5779

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

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

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

EDITOR EN JEFE

EDITOR ADJUNTO

EDITORES TECNICOS

EDITORES DE ESTILO

EDITORA DE ESTILO

EN INGLES

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

Diseño de portada

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

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

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

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

Dr. Antonio Vázquez Alarcón

Dr. Javier Z. Castellanos

Dr. Gabriel Alcántar González

Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro

Dr. Juan José Peña Cabriaes

Dr. Xavier X. Uvalle Bueno

Dra. Edna Álvarez Sánchez

Dr. Mateo Vargas Hernández

Dra. Carmen Gutiérrez Castorena

Dr. David Espinosa Victoria

M.C. Jorge Alvarado López

M.C. Langen Corlay Chee

Sra. Ina Aalmers de Aguilar

Profa. Diane Fumiko Miyoshi Udo

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

TERRA

JULIO - SEPTIEMBRE DE 2000 • VOLUMEN 18 • NUMERO 3

DIVISION I

- 179 Propiedades físicas, químicas y mineralógicas en el encostramiento de suelos de México y Louisiana, EU.
M. A. Martínez-Gamiño y P. M. Walthall
- 187 Cambios morfológicos durante el encostramiento de la superficie en suelos de México y Louisiana, EU.
M. A. Martínez-Gamiño y P. M. Walthall
- 199 Agentes cementantes en el encostramiento de la superficie de suelos de México y Louisiana, EU.
M. A. Martínez-Gamiño y P. M. Walthall

DIVISION II

- 211 Hongos micorrízicos arbusculares en la dinámica de aparición de estolones y nutrición de plantas de fresa cv. Fern obtenidas por cultivo *in vitro*.
A. Alarcón, R. Ferrera-Cerrato, M. C. González-Chávez y A. Villegas-Monter
- 219 Alta y baja humedad con riego por goteo en vid para mesa y su efecto en las yemas florales.
Adán -fimbres Fontes, Gerardo Martínez Díaz y Manuel de Jesús Valenzuela Ruiz
- 225 Efecto de cubiertas, riego y fertilización foliar en el desarrollo radical de manzano.
Armando Ibáñez Martínez, A. Enrique Becerril Román, Alberto Castillo Morales, Rafael A. Parra Quezada y Cándido López Castañeda

DIVISION III

- 239 Aspersiones foliares de zinc en nogal pecanero en suelos alcalinos.
Esteban Favela Chávez, José I. Cortés Flores, Gabriel Alcántar González, Jorge D. Etchevers Barra, Gustavo A. Baca Castillo y Jorge Rodríguez Alcázar
- 247 Escorrentía superficial, erosión edáfica y uso del suelo en el noreste de México.
José Návar y Timmothy J. Synnott
- 255 Infiltración y uso del suelo en Linares, N. L., México.
José Návar y Timmothy J. Synnott
- 263 Pérdidas de suelo y potencial hidrológico en parcelas con coberturas vegetativas de especies forrajeras.
Pedro Betancourt Yanez, José Luis Oropeza Mota, Benjamín Figueroa Sandoval, Víctor Ordaz Chaparro, Carlos Ortiz Solorio y Alfonso Hernández Garay

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

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

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

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

EDITOR-IN-CHIEF
ASSOCIATE EDITOR
TECHNICAL EDITORS

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

STYLE EDITORS

ENGLISH EDITOR

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- Education
- Credit and Technical Assistance

TERRA Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
July - September, 2000 Volume 18 Num. 3

ISSN 0187 - 5779

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

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

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

EDITORIAL STAFF

Cover design

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

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

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

TERRA

JULY - SEPTEMBER, 2000 • VOLUME 18 • NUMBER 3

DIVISION I

- 179 Physical, chemical, and mineralogical properties affecting soil crust formation in soils of Mexico and Louisiana, USA.
M. A. Martínez-Gamiño and P. M. Walthall
- 187 Morphological changes during crust formation in soils of Mexico and Louisiana, USA.
M. A. Martínez-Gamiño and P. M. Walthall
- 199 Cementing agents in crust formation in soils of Mexico and Louisiana, USA.
M. A. Martínez-Gamiño and P. M. Walthall

DIVISION II

- 211 Arbuscular mycorrhizal fungi in runner dynamics and nutrition of strawberry plants cv. Fern obtained for *in vitro* culture.
A. Alarcón, R. Ferrera-Cerrato, M. C. González-Chávez, and A. Villegas-Monter
- 219 Regular and high application of water with drip irrigation and its effects on the floral buds of table grapes.
Adán-fimbres Fontes, Gerardo Martínez Díaz, and Manuel de Jesús Valenzuela Ruiz
- 225 Effect of mulching, irrigation and foliar fertilization upon apple root development.
Armando Ibáñez Martínez, A. Enrique Becerril Román, Alberto Castillo Morales, Rafael A. Parra Quezada, and Cándido López Castañeda

DIVISION III

- 239 Foliar spray applications of zinc on pecan trees in alkaline soils.
Esteban Favela Chávez, José I. Cortés Flores, Gabriel Alcántar González, Jorge D. Etchevers Barra, Gustavo A. Baca Castillo, and Jorge Rodríguez Alcázar
- 247 Surface runoff, soil erosion, and land use in Northeastern Mexico.
José Návar and Timmothy J. Synnott
- 255 Soil infiltration and land use in Linares, N. L., Mexico.
José Návar y Timmothy J. Synnott
- 263 Soil loss and hydrologic potential in plots with vegetative cover of fodder species.
Pedro Betancourt Yanez, José Luis Oropeza Mota, Benjamín Figueroa Sandoval, Víctor Ordaz Chaparro, Carlos Ortiz Solorio, and Alfonso Hernández Garay

PROPIEDADES FISICAS, QUIMICAS Y MINERALOGICAS EN EL ENCOSTRAMIENTO DE SUELOS DE MEXICO Y LOUISIANA, EU

Physical, Chemical, and Mineralogical Properties Affecting Soil Crust Formation in Soils of Mexico and Louisiana, USA.

M.A. Martínez-Gamiño¹ y P.M. Walthall²

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue caracterizar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas en relación con el encostramiento superficial de suelos de México y de Louisiana, EU. Las diferencias en el material parental determinaron la textura en los suelos de México y Louisiana, EU. Aun cuando la esmectita fue el principal componente del complejo arcilloso en los seis suelos, el mayor índice de arcilla dispersada por agua (IADA) en los suelos de México (0.79 a 0.83), que el obtenido en los suelos de Louisiana (0.18 a 0.5), se relacionó con los valores más altos de la relación de adsorción de sodio (3.81 a 4.57) en los suelos de México. En los de Louisiana, el alto valor del IADA en Gigger (0.5), con relación a Olivier y Coteau (0.18 y 0.21, respectivamente), fue atribuido al bajo contenido de carbón orgánico (CO) (0.27%). El contenido de CO en Olivier y Coteau fue 1.02 y 1.19%, respectivamente. El contenido de óxidos de hierro fue mayor en los suelos de Louisiana (0.19 a 0.49%), que en los de México (0.02 a 0.08%). El contenido de materiales amorfos de sílice y aluminio fue tres y cuatro veces mayor en los suelos de México que en los de Louisiana. La calcita estuvo presente sólo en Asogueros y Reforma, 3.9 y 11.4%, respectivamente, y únicamente en Sandoval se detectó yeso con 0.33%. Basándose en estos resultados, los suelos de México tienen una mayor probabilidad de desarrollar costras más densas debido a su mayor dispersabilidad que los suelos de Louisiana. La calcita, yeso y materiales amorfos de sílice y aluminio juegan un importante papel en la cementación de los suelos de México en este estudio,

mientras que los óxidos de hierro son los agentes cementantes en los suelos de Louisiana, EU.

Palabras clave: Textura, calcita, yeso, sílice y aluminio amorfo, carbón orgánico.

SUMMARY

The objective of this study was to characterize the physical, chemical and mineralogical properties of the soils of Mexico and Louisiana, USA, as related to crust formation. Parent material determined differences in soil texture in the Mexican and Louisiana soils. Although smectite was present in all six soils as a major component, the higher indices of water dispersible clay in Mexican soils (0.79 to 0.83), as compared with those in Louisiana soils (0.18 to 0.5), were attributed to relatively high SAR values in the Mexican soils. In the Louisiana soils, the higher dispersibility of the Gigger (0.5), with respect to that in the Olivier and Coteau (0.18 and 0.21, respectively), was related to its low organic carbon (OC) content (0.27%). The OC content in the Olivier and Coteau was 1.02 and 1.19%, respectively. The free iron content was higher in the Louisiana soils (0.19 to 0.49%) than that in the Mexican soils (0.02 to 0.08%). Amorphous silica and aluminum content were three and four times higher in the Mexican soils than those in Louisiana soils. Calcite was present only in the Asogueros and Reforma with 3.9 and 11.4%, respectively, while gypsum was detected only in the Sandoval with 0.33%. Based on these results, the Mexican soils have a higher probability of developing dense crusts because of higher dispersibility than the Louisiana soils. Calcite and native gypsum play an important role in the cementation of Mexican soils, while free iron oxides are present as a cementing agent in the Louisiana crusts.

¹ INIFAP, Santos Degollado 1015-A, Col. Cuauhtémoc, 78270 San Luis Potosí, S.L.P. México.

² Agronomy Department, Louisiana State University, 134 Sturgis Hall, Baton Rouge, 78380 LA, USA.

Recibido: Marzo de 1996.
Aceptado: Enero de 2001.

Index words: Crusting, calcite, gypsum, amorphous silica and aluminum, organic carbon.

INTRODUCCION

Los factores, asociados con la formación del suelo, son: clima, topografía, tiempo, material de origen y organismos vivos (Jenny, 1941; Simonson, 1959; Baver *et al.*, 1990). La intensidad e interacción de estos factores han provocado una gran variabilidad en las propiedades del suelo en el mundo. Por ejemplo, los principales factores responsables de las diferencias entre los suelos de Louisiana, EU, y los del Altiplano Potosino-Zacatecano en el norte-centro de México, son el contrastante clima y material de origen. Los loess de Louisiana están constituidos principalmente por partículas de limo, depositadas por el viento de las riberas del río-Mississippi durante los periodos de glaciación (Miller *et al.*, 1988). En contraste, los suelos del norte-centro de México se formaron a partir de depósitos aluviales y rocas sedimentarias de origen volcánico (CETENAL, 1971a,b).

Los suelos de Louisiana han estado sujetos a un mayor efecto de intemperismo, ocasionado por una precipitación media anual de 1340 mm, mientras que en la parte norte-centro de México ésta es de sólo 450 mm. En Louisiana, las abundantes lluvias han ocasionado la lixiviación de las bases intercambiables, tales como calcio y magnesio, mientras que en México, la escasez de agua ha ayudado no sólo a la acumulación de dichas bases, sino también a la formación de carbonatos y, en algunos casos, de yeso. A pesar de estos contrastes ambientales y de material parental, existe un problema común en ambas áreas: la tendencia al encostramiento de la superficie del suelo, la cual restringe la emergencia de las plantas, impide una rápida infiltración del agua en el suelo, así como incrementa el peligro de erosión hídrica del suelo.

En general, la propensión de los suelos al encostramiento superficial se ha atribuido a la presencia de los siguientes factores: 1) altas concentraciones de sodio intercambiable y electrolitos, 2) arcillas altamente dispersantes como las esmectitas y 3) las características de la lluvia (Shainberg y Letey, 1984; Agassi *et al.*, 1985; Stern *et al.*, 1991). El conocimiento de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos del centro-norte de México y los loess de Louisiana es una necesidad para el entendimiento del proceso de su encostramiento.

El objetivo de este estudio fue: caracterizar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas y su relación con el encostramiento de suelos del Altiplano Potosino-Zacatecano en el centro-norte de México y de Louisiana, EU.

MATERIALES Y METODOS

Se hizo un muestreo del horizonte superficial (0 a 20 cm) de suelos de la región norte-centro de México y de Louisiana, EU. Los suelos de México se clasificaron de acuerdo con el Soil Survey Staff (1996) como: Asogueros (Nadurargid vértico: franco mixto e hipotérmico), Sandoval (Durustoll arídico: franco, mixto e hipotérmico) y Reforma (Calciorthid lítico: franco, mixto e hipotérmico); los de Louisiana, EU, como: Gigger (Fragiudalf típico: limoso fino, mixto y térmico), Olivier (Fragiudalf áquico: limoso fino, mixto y térmico) y Coteau (Hapludalf glossáquico: limoso fino, mixto y térmico).

La textura se determinó después de dispersar el suelo con hexametáfosfato de sodio y las muestras se agitaron mecánicamente por 16 h. La arcilla se cuantificó por el método de la pipeta, descrito por Gee y Bauder (1986), y la arena por tamizado y pesado. El contenido de limo se obtuvo por diferencia. La humedad del suelo se estimó por el método gravimétrico. La reacción del suelo se midió en soluciones suelo:agua 1:1 y suelo:1M KCl 1:1 en un medidor de pH tipo Beckman Zeromatic, de acuerdo con el método descrito por el Soil Survey Staff (1984). El carbono orgánico se realizó por una modificación al método de Walkley-Black, descrito por Prince (1955).

El yeso equivalente se evaluó por el método de conductividad eléctrica y el carbonato de calcio por neutralización ácida, usando en ambos casos los métodos del US Salinity Laboratory Staff (1969). Los materiales amorfos de aluminio y sílice se extrajeron por el método de ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), descrito por Mehra y Jackson (1960). Se obtuvieron extractos de suelo después de 24 h de saturación, según el método descrito por el US Salinity Laboratory Staff (1969). El calcio, magnesio, potasio y sodio solubles fueron identificados de los extractos de saturación, usando un espectrómetro de inducción plásmica (ICP). Los sulfatos, cloro y nitratos se reconocieron por cromatografía de iones. El contenido de bicarbonatos fue el resultado de la diferencia entre aniones con respecto a los iones totales. Para la conductividad eléctrica de los extractos se empleó un

conductímetro tipo YSI modelo 35 (US Salinity Laboratory Staff, 1969).

Se generó un índice de arcilla dispersada por agua (IADA) al dividir el porcentaje de arcilla cuantificada, usando sólo agua destilada y sin dispersante químico, entre el porcentaje de arcilla usando hexametáfosfato de sodio (Stern *et al.*, 1991). En la relación de adsorción de sodio (RAS) se implementó la siguiente fórmula, citada por el US Salinity Laboratory Staff (1969):

$$\text{RAS} = \text{Na}^+ / [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{1/2}$$

Donde las concentraciones de iones están expresados en cmol L^{-1} .

La materia orgánica, carbonatos, óxidos de hierro y materiales amorfos de aluminio y sílice se eliminaron antes de la caracterización mineralógica del suelo. La materia orgánica se destruyó con peróxido de hidrógeno (Kunze y Dixon, 1986). Los carbonatos se removieron por el método del ácido acético (HOAc), citado por Jackson (1985). Los óxidos de hierro se excluyeron usando ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), según el método citado por Mehra y Jackson (1960).

La fracción arcillosa ($<2.0 \mu\text{m}$) se separó por sedimentación, para luego obtener las arcillas finas ($<0.2 \mu\text{m}$) y gruesas (2.0 a $0.2 \mu\text{m}$) por centrifugación (Jackson, 1985). Después de remover las arcillas, se eliminaron los materiales amorfos de aluminio y sílice, usando 1M NaOH (Alexiades y Jackson, 1967). Para obtener el porcentaje del peso de arcillas gruesas y finas, se empleó el método gravimétrico; posteriormente, las arcillas se saturaron con cloruro de potasio 0.33N y cloruro de magnesio 0.33N antes de ser analizadas con rayos-X. Los tratamientos con KCl se lavaron con agua destilada. Las arcillas tratadas con cloruro de magnesio se saturaron con etilen-glicol y glicerol.

Se prepararon portaobjetos con arcillas orientadas y se analizaron en un difractorómetro de rayos-X tipo Philips con radiación Cu-K α . Los tratamientos saturados con magnesio y etilen-glicol se corrieron de 2° a 30° 2 θ y los demás tratamientos de 2° a 15° 2 θ usando 40 KV y 25 ma. La identificación de otros minerales se realizó con muestras de suelo finamente tamizadas y empacadas en contenedores para suelo seco. Se tuvo cuidado en evitar darles una orientación a las partículas edáficas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Características Físicas

Tamaño de partículas. La costra del suelo puede ser formada en casi todas las texturas de suelo, excepto en suelos muy arenosos con poco contenido de limo y arcilla (Lemos y Lutz, 1957; Singer y Warrington, 1991). Los resultados del tamaño de las partículas del suelo, con y sin agente dispersante, se presentan en el Cuadro 1. El contenido de limo fue mayor al usar hexametáfosfato de sodio en los suelos de Louisiana, EU, con un rango desde 72 a 87%. En los de México, la arena fue la fracción dominante con un rango de 42 a 52%. La cantidad de arcilla en los seis suelos fue similar, de 11 a 24%.

Las diferencias en la composición mecánica del suelo, entre los suelos de México y Louisiana, EU, pueden atribuirse al contrastante material de origen. Por una parte, el alto contenido de limo es típico en suelos transportados por el viento, como es el caso de los de Louisiana, EU (Miller *et al.*, 1984). En contraste, la textura más gruesa en los suelos de México es un resultado del alto contenido de arena en sus respectivos materiales de origen. Es importante señalar que el contenido de 12% de arena, obtenido en Gigger, no es típico del horizonte superficial de estos suelos. Este efecto anormal fue explicado por Miller

Cuadro 1. Distribución del tamaño de partículas con dispersante químico (DQ) y con agua destilada (AD) e índice de arcillas dispersa con agua (IADA) en suelos de México y Louisiana, EU.

Suelo	Dispersante químico			Textura para DQ	Agua destilada			IADA
	Arena	Limo	Arcilla		Arena	Limo	Arcilla	
Gigger	12	72	16	Migajón limoso	13	79	8	0.50
Olivier	2	87	11	Limo	8	90	2	0.18
Coteau	4	82	14	Migajón limoso	10	87	3	0.21
Asogueros	46	31	23	Franco	45	36	19	0.83
Sandoval	52	29	19	Franco	57	28	15	0.79
Reforma	42	34	24	Franco	43	38	19	0.79

et al. (1988), quienes destacaron la presencia de una zona basal en los loess de Louisiana, EU. Esta zona basal es definida como una zona donde una capa delgada de loess está contaminada con el material aluvial adyacente.

Índice de arcilla dispersada en agua. Cuando la distribución de partículas se determinó, usando agua destilada, el contenido de arcilla decreció cerca de 80% en Olivier y Coteau, mientras que en los suelos de México fue de aproximadamente 5.5% (Cuadro 1). En los suelos de México, se observaron mayores índices de arcilla dispersada por agua (IADA) (0.79 a 0.83) en relación con los de Louisiana, EU (0.18 a 0.50). Estos resultados sugieren claramente que los suelos de México son más dispersables que los de Louisiana, EU.

Los valores del IADA en los suelos de México manifiestan que este factor es un componente sustancial en el encostramiento de estos suelos. Los valores de IADA en los suelos de Louisiana, EU, sugieren, por otra parte, que la dispersión de arcillas en estos suelos puede no ser un factor determinante en la formación de la costra superficial. Una razón de por que los suelos de México son más dispersantes, es el alto valor de la relación de adsorción de sodio (RAS) (3.81 a 4.57) en estos suelos en relación con el detectado en los de Louisiana, EU (0.29 a 0.33) (Cuadro 2). El mayor valor relativo de IADA en Gigger (0.5), con respecto a Olivier y Coteau (0.18 y 0.21, respectivamente), está más relacionado al bajo contenido de carbono orgánico (CO) (0.27) en este suelo (Cuadro 3).

Características Químicas

Agentes cementantes potenciales. La cantidad de los óxidos de hierro, materiales amorfos de sílice y

Cuadro 2. Propiedades químicas de suelos de México y Louisiana, EU.

Suelo	pH _k	pH _w	CE [†] dS m ⁻¹	RAS [‡]
Gigger	5.48	6.05	0.74	0.53
Olivier	5.30	5.27	0.39	0.73
Coteau	6.75	7.25	0.79	0.29
Asogueros	7.29	7.89	2.83	3.98
Sandovalés	5.00	5.74	3.06	4.57
Reforma	7.27	8.11	2.23	3.81

[†] = Conductividad eléctrica.

[‡] = Relación de adsorción de sodio.

pH_k = 1:1, suelo:1M KCl.

pH_w = 1:1, suelo:agua destilada.

Cuadro 3. Cuantificación de agentes cementantes en suelos de México y Louisiana, EU.

Suelo	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaCO ₃	CaSO ₄	CO [†]
	----- % -----					
Gigger	0.49	0.57	1.09	-	-	0.27
Olivier	0.28	0.49	1.09	-	-	1.02
Coteau	0.19	0.50	1.18	-	-	1.19
Asogueros	0.07	1.46	4.38	3.90	-	1.15
Sandovalés	0.08	1.42	4.51	-	0.33	0.33
Reforma	0.02	1.15	4.02	11.40	-	1.76

[†] = Carbono orgánico.

aluminio, carbonato de calcio, yeso y carbón orgánico, que actúan como agentes cementantes, se dan en el Cuadro 3. Los óxidos de hierro, materiales amorfos de sílice y aluminio tienden a acumularse en el suelo en lugar de ser lixiviados. El porcentaje de los óxidos de hierro fue mayor en los suelos de Louisiana, EU (0.19 a 0.49%) en relación con los de México (0.02 a 0.08%). En contraste, los materiales amorfos de sílice y aluminio fueron tres a cuatro veces mayores en los suelos de México que en los de Louisiana, EU. Estas diferencias en la cantidad de estos agentes cementantes potenciales sugieren, que el clima más cálido y húmedo en Louisiana provocó mayor acumulación de óxidos de hierro a través de la hidrólisis y oxidación de este elemento, y que el clima semiárido en la región norte-centro de México promovió una mayor acumulación de los materiales amorfos de sílice y aluminio en el suelo.

La presencia de carbonato de calcio y yeso en los suelos de México es otra resultante del contrastante clima con el de Louisiana, EU. El alto contenido de calcio en los suelos de México favorece la precipitación de calcita y yeso. Únicamente en Asogueros y Reforma, de los suelos de México, se registró la presencia de carbonatos de calcio con 3.9 y 11.4%, respectivamente, mientras que sólo en Sandovalés se detectó yeso (0.33%) (Cuadro 3).

Oades (1989) reportó que un incremento del carbono orgánico (CO) entre 1% y 1.5% generó un incremento en la estabilidad de agregados. Al considerar la importancia del CO en la formación de agregados más estables en el suelo, se observó una relación entre el CO y el IADA en los suelos de Louisiana, EU. Como se presentó anteriormente, el valor del IADA en Gigger fue de 0.5, mientras que en Olivier y Coteau, el IADA fue de 0.18 y 0.21, respectivamente. El mayor valor del IADA, encontrado en Gigger, coincide con su bajo contenido de CO (0.27), indicando que la presencia de CO podría ser responsable de un incremento del IADA.

En el caso de los suelos de México, el CO fue de 1.15, 0.33 y 1.76%, en Asogueros, Sandoval y Reforma, respectivamente. Aunque los suelos de México tienen un contenido de CO muy similar al registrado en los suelos de Louisiana, EU, no se detectó ninguna correlación entre el CO y el IADA. Esto sugiere que otros factores, tal vez el alto valor de RAS en los suelos de México, tienen una mayor influencia en la dispersión de los suelos analizados que cualquier efecto cementante ligado al CO.

Factores Dispersantes

La concentración de cationes y aniones en el extracto de pastas saturadas ejemplifica el contraste de las condiciones de intemperismo y material de origen entre los suelos de México y Louisiana, EU (Cuadro 4). Los suelos de México están sujetos a una insuficiente lluvia para lavar las bases catiónicas (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+}). A su vez, los suelos de Louisiana están sujetos a una precipitación más abundante y, en consecuencia, a un mejor lavado de

bases. Como un resultado de la acumulación de sodio en los suelos de México, los valores de RAS en estos suelos son mayores (3.81 a 4.57) que en los de Louisiana, EU (0.29 a 0.73) (Cuadro 2).

Al comparar los valores de RAS con los del IADA en cada suelo, se tiene una relación positiva, es decir, que los suelos de Louisiana, EU, se caracterizan por tener valores bajos de RAS e IADA, mientras que a los de México los evidencian los valores altos de RAS e IADA. Similar relación se encontró entre la conductividad eléctrica (CE) y el IADA en ambos tipos de suelos.

Otra consecuencia del contraste en las condiciones de intemperismo prevalecientes en los suelos de México y Louisiana, EU, y relacionada a la dispersión del suelo, es el pH (Cuadro 2). El pH en los suelos de Louisiana y Sandoval es más ácido que en Asogueros y Reforma. La acidez del suelo en Louisiana, EU, resultó más por la pérdida de cationes del suelo que por lixiviación. En Sandoval, la acidez del suelo puede ser un efecto de la continua aplicación de fertilizantes amoniacales. Se ha reportado que,

Cuadro 4. Concentración de cationes y aniones en extractos de pastas saturadas en suelos de México y Louisiana, EU.

Suelo	Na^{+}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	K^{+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	NO_3^{-}	HCO_3^{-}
mmol L ⁻¹								
Gigger	0.96	1.00	2.30	0.83	1.68	0.63	0.73	4.72
Olivier	1.00	0.51	1.41	1.00	1.04	0.83	0.04	3.08
Coteau	0.69	0.84	4.96	0.62	0.66	0.45	0.05	11.30
Asogueros	14.47	1.70	9.86	2.72	2.77	10.53	2.61	13.84
Sandoval	17.65	3.04	8.83	3.73	3.37	19.55	0.05	2.44
Reforma	11.90	0.71	8.36	1.10	4.40	8.71	0.21	9.52

[†] Calculada como la diferencia de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+}) - (\text{Cl}^{-} + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^{-})$.

Cuadro 5. Composición de arcillas en suelos de México y Louisiana, EU.

Suelo	Kaolinita	Ilita	Vermiculita	Esmectita	Interestratificadas
Arcilla gruesa					
Gigger	XXX	XXX	X	XX	X
Olivier	XXX	XXX	X	XX	X
Coteau	XXX	XXX	X	XX	X
Asogueros	X	XXXX	X	X	X
Sandoval	XXX	XX	X	XX	X
Reforma	X	XXX	X	XX	X
Arcilla fina					
Gigger	XX	XX	X	XXX	X
Olivier	XX	XX	X	XXX	X
Coteau	XX	XX	-	XXXX	X
Asogueros	X	XX	-	XXX	XX
Sandoval	XXXX	X	-	X	X
Reforma	X	XXX	-	XXXX	XX

Composición relativa: XXXX >40%, XXX 25 a 40%, XX 10 a 25%, X <10%.

Cuadro 6. Minerales identificados por difracción de rayos-X en suelos de México y Louisiana, EU.

Suelo	Cuarzo	Oligoclasa	Ortoclasea	Calcita	Yeso	Cristobalita
Gigger	X	X	X	-	-	-
Olivier	X	X	X	-	-	-
Coteau	X	X	X	-	-	-
Asogueros	X	X	X	X	-	X
Sandovalés	X	X	X	-	X	X
Reforma	X	X	X	X	-	X

después de continuas aplicaciones por años de este tipo de fertilizantes, el pH del suelo en el horizonte superficial se ha acidificado (Brown y Mahler, 1988).

Características Mineralógicas

Composición mineral de arcillas. Los tipos de arcillas kaolinita, esmectita e illita fueron identificados en las fracciones de arcilla fina y gruesa en los seis suelos en estudio (Cuadro 5). La vermiculita se detectó en todas las muestras de la fracción gruesa y fina de Gigger y Olivier. En la fracción fina de Reforma se identificaron arcillas interestratificadas correspondientes a illita/esmectita e illita/vermiculita, respectivamente.

La composición de arcillas ha sido señalada como un importante factor que afecta el encostramiento de los suelos, especialmente por la presencia de las esmectitas (Stern *et al.*, 1991). En los seis suelos analizados en este estudio, se detectó esta arcilla (Cuadro 5); sin embargo, su cantidad relativa no presentó ninguna relación con el IADA de cada suelo. Por ejemplo, Reforma tuvo un IADA de 0.79, el cual fue similar al de Sandovalés; sin embargo, la cantidad de esmectita en Sandovalés fue aproximadamente un tercio del contenido en Reforma. Estos resultados sugieren que otras características diferentes a la mineralogía de la arcilla son las causantes más directas del encostramiento del suelo en México y Louisiana, EU.

Otros minerales en el suelo. Los minerales, identificados en los suelos analizados y diferentes a las arcillas, se presentan en el Cuadro 6. En Asogueros y Reforma se identificó calcita, mientras que sólo en Sandovalés se detectó yeso. Estos resultados concuerdan con la identificación química de calcita y yeso, descritos anteriormente como agentes cementantes en los suelos de México. Por otra parte, en todos los suelos de México se detectó cristobalita. Otros minerales, presentes en los seis suelos, fueron: cuarzo, feldespatos potásicos y

plagioclastos sódicos. La identificación de cristobalita en los suelos de México es un factor relacionado con el alto contenido de materiales amorfos de sílice en estos suelos. Aún más, la solubilidad de cristobalita es mayor que la del cuarzo (Lindsay, 1979), por lo que es un factor importante como agente cementante en los suelos de México.

CONCLUSIONES

1. Basado en los resultados de este trabajo, se concluye que los suelos estudiados de México tienen una mayor probabilidad de encostramiento que los de Louisiana, EU.
2. Aunque el tipo de arcilla esmectita fue un componente principal en los seis suelos, los valores del IADA en los de México (0.79 a 0.83), comparados con los de Louisiana (0.18 a 0.5), son atribuidos a un mayor valor del RAS en los suelos de México.
3. En los suelos de Louisiana, el alto valor del IADA en Gigger (0.5), con respecto a el de Olivier y Coteau (0.18 y 0.21, respectivamente), es atribuido al bajo contenido de CO (0.27%).
4. El contenido y tipo de posibles agentes cementantes están relacionados a las condiciones contrastantes de clima, intemperismo y material parental en los suelos de México y Louisiana.
5. La calcita, yeso y materiales amorfos de sílice y aluminio son los agentes cementantes en el encostramiento de los suelos de México, mientras que en Louisiana, EU, los óxidos de hierro son los principales agentes cementantes.

LITERATURA CITADA

- Agassi, M., J. Morin e I. Shainberg. 1985. Effect of raindrop impact energy and water salinity on rates of sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 186-190.
- Alexiades, C.A. y M.L. Jackson. 1967. Quantitative clay mineralogical analysis of soils and sediments. *Clays and Clay Minerals* 14: 35-52.
- Baver, L.D., W.H. Gardner y W.R. Gardner. 1972. *Soil physics*. John Wiley, New York.

- Brown, T.H. y R.L. Mahler. 1988. Effects of phosphorous and acidity levels of silica extracted from a Palouse silt loam. *Soil Sci. Am. J.* 51: 674-677.
- CETENAL. 1971a. Carta edafológica 1:50 000, Aguascalientes, F13-D-19. Mexico, DF.
- CETENAL. 1971b. Carta edafológica 1:50 000, Salinas de Hidalgo, F14-A-61. Mexico, DF.
- Gee, G.M. y J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. pp. 383-411. *In: A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties.* 2nd ed. Agronomy 9. Am. Soc. Agron. Madison, WI.
- Jackson, M.L. 1985. *Soil chemical analysis. Advanced Course.* 2nd ed. Published by the author. Madison, WI.
- Jenny, H. 1941. *Factors of soil formation. A system of quantitative pedology.* McGraw-Hill, NY.
- Kunze, G.W. y J.B. Dixon. 1986. Pretreatment for mineralogical analysis. pp. 383-411. *In: A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties.* 2nd ed. Agronomy 9. Am. Soc. Agron. Madison, WI.
- Lemos, P. y J.F. Lutz. 1957. Soil and some factors affecting it. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 21: 485-491.
- Lindsay, W.L. 1979. *Chemical equilibria in soils.* Wiley-Interscience, New York. USA.
- Mehra, O.P. y M.L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7: 317-327.
- Miller, B.J., G.C. Lewis, J.J. Alford y W.J. Day. 1984. Loesses in Louisiana and at Vicksburg, Mississippi. Guidebook for the friends of the Pleistocene field trip. Dept. of Agronomy, Louisiana State Univ., Baton Rouge, LA.
- Miller, B.J., B.A. Schumacher, G.C. Lewis, J.A. Rehage y B.E. Spicer. 1988. Basal mixing zones in loesses of Louisiana and Idaho: II. Formation, spatial distribution, and stratigraphic implications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 759-764.
- Oades, J.M. 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. *In: J.B. Dixon y S.B. Weed. (eds.) Minerals in soil environments.* 2nd ed. Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI.
- Prince, A.L. 1955. *Methods in soil analysis.* *In: F.E. Bear (ed.) Chemistry of the soil.* Reinhold Publ. Co., New York.
- Shainberg, I. y J. Letey. 1984. Effect of electrolyte concentration on the hydraulic properties of depositional crust. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1260-1263.
- Simonson, R.W. 1959. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23: 152-156.
- Singer, M.J. y D.N. Warrington. 1991. Crusting in the Western United States. pp. 179-204. *In: M.E. Sumner y B.A. Stewart (eds.) Soil crusting-chemical and physical processes.* Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Soil Survey Staff. 1984. Procedure for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey. *Soil Survey Investigations Report 1.* US Gov. Printing Off., Washington, DC.
- Soil Survey Staff. 1996. *Keys to soil taxonomy.* 7th ed. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. US Gov. Printing Off., Washington, DC.
- Stern, R., M. Ben-Hur e I. Shainberg. 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Sci.* 152: 455-462.
- US Salinity Laboratory Staff. 1969. *Saline and alkali soils.* Agriculture Handbook 60. US Gov. Printing Off., Washington, DC.

CAMBIOS MORFOLOGICOS DURANTE EL ENCOSTRAMIENTO DE LA SUPERFICIE EN SUELOS DE MEXICO Y LOUISIANA, EU

Morphological Changes During Crust Formation in Soils of Mexico and Louisiana, USA

M.A. Martínez-Gamiño¹ y P.M. Walthall²

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue: identificar los cambios morfológicos de la superficie del suelo durante el proceso de formación de costras en suelos de México y de Louisiana, EU. Se evaluaron las siguientes prácticas de manejo al suelo: 1) suelo desnudo, 2) suelo protegido y 3) adición de yeso agrícola. De cada suelo, se elaboraron secciones delgadas para su análisis en el microscopio electrónico. Dada la similitud en la morfología de los tres suelos de Louisiana y el de Sandoval, se describen sólo las características de la costra del suelo Gigger. De igual forma, sólo se señala la morfología de Asogueros por su similitud con Reforma. En el tratamiento con suelo desnudo del tipo Gigger, los microagregados de la superficie del suelo se destruyeron por el impacto directo de las gotas de lluvia. Su característica principal fue: una capa de 0.1 a 0.2 mm de espesor con granos gruesos limpios de material fino. En cambio, cuando la superficie del suelo se protegió de la lluvia, ésta no presentó dichas características. La adición de yeso incrementó la agregación de las partículas de este suelo. En las costras del suelo tipo Asogueros, la morfología de la costra fue de tipo masivo y disperso en suelos sin protección. En el tratamiento con suelo protegido, fue evidente el hecho de que partículas finas sellaron los poros superficiales. La adición de yeso promovió la agregación en la superficie del suelo.

Palabras clave: Porosidad, microagregados, micromorfología, dispersión, agregación.

SUMMARY

The objective of this study was to identify changes in the morphology of the soil surface during crust

¹ INIFAP, Santos Degollado 1015-A, Col. Cuauhtémoc, 78270 San Luis Potosí, S.L.P., México.

² Agronomy Department, Louisiana State University, 134 Sturgis Hall, Baton Rouge, 78380 LA, USA.

Recibido: Marzo de 1996.

Aceptado: Enero de 2001.

formation in three soils of Mexico and three soils of Louisiana, USA. Three soil management techniques were evaluated: 1) bare soil, 2) protected soil, and 3) gypsum-amended soil. From each soil, thin sections were prepared for SEM analysis. Given the similarity in the morphological features in the three soils of Louisiana and Sandoval soil, only the morphology of the Gigger crust is described. For the same reason, only the Asogueros crusts are presented due to their similarity with those of Reforma. In the Gigger bare soil, microaggregates of the soil surface were destroyed by the direct impact of raindrops. The principal feature was a 0.1 to 0.2-mm upper layer, with single clean grains without fine particles. In contrast, in the protected soil, this layer did not develop. An improvement in aggregation was observed in this soil for the gypsum-amended treatment. In the crusts of Asogueros, the morphology was massive in bare soils. In the protected soil, it was evident that fine particles sealed surface porosity, while the addition of gypsum promoted soil aggregation.

Index words: Porosity, micromorphology, microaggregates, dispersion, aggregation.

INTRODUCCION

La dispersión de agregados de los suelos por factores físicos o químicos, durante el encostramiento del suelo, es el resultado de una alteración de la morfología de la superficie del suelo. La porosidad, distribución del tamaño de las partículas y su orientación son reportadas como las características morfológicas más afectadas en la formación de costras (Chen *et al.*, 1980; Gal *et al.*, 1984; Onofriok y Singer, 1984; Ramley y Bradford, 1989; Bresson y Boiffin, 1990).

Este endurecimiento ocurre como una consecuencia de la dispersión de las partículas edáficas (McIntyre, 1958; Morin *et al.*, 1981; Stern *et al.*, 1991). El uso de acondicionadores del suelo, tales como: yeso, yeso fosfórico y polímeros orgánicos, se ha evaluado en un intento para estabilizar los agregados y prevenir la

destrucción de su estructura (Gal *et al.*, 1984; Shainberg *et al.*, 1989; Ben-Hur *et al.*, 1990). El uso de coberturas vegetales u orgánicas son también reportadas como un efectivo medio para prevenir la dispersión del suelo, causada por el impacto de las lluvias (Wilson *et al.*, 1982; McVay *et al.*, 1989; Bruce *et al.*, 1990; Smith *et al.*, 1990.).

El impacto de estas prácticas se ha evaluado en términos de parámetros de física del suelo, tales como: infiltración (Morin y Benjamini, 1977; Miller y Scifres, 1987; Smith *et al.*, 1990), dureza de la costra (Bradford y Grossman, 1982; Le Bissonnais *et al.*, 1989) y emergencia de plantas (Goyal *et al.*, 1981; Aujula *et al.*, 1986). Sin embargo, existe una marcada falta de información en el estudio del encostramiento del suelo, relacionado con el uso de diferentes prácticas de manejo. Al respecto, el uso del microscopio electrónico (SEM), para describir la morfología de las costras del suelo, se ha reportado como más efectiva en comparación al uso del microscopio petrográfico (Chen *et al.*, 1980; Onofriok y Singer, 1984). El objetivo de este estudio fue: identificar los cambios morfológicos de la superficie del suelo durante la formación de costra en suelos del Altiplano Potosino-Zacatecano, en el centro-norte de México, y del tipo Loess, en Louisiana, EU.

MATERIALES Y METODOS

Los suelos de México se clasificaron de acuerdo con el Soil Survey Staff (1996) como: Asogueros (Nadurargid vértico: franco, mixto e hipotérmico), Sandovalés (Durustoll arídico: franco, mixto e hipotérmico) y Reforma (Calciorthid lítico: franco, mixto e hipotérmico) y los de Louisiana, EU, como: Gigger (Fragiudalf típico: limoso fino, mixto y térmico), Olivier (Fragiudalf áquico: limoso fino, mixto y térmico) y Coteau (Hapludalf glossáquico: limoso fino, mixto y térmico).

Se colectaron muestras de la capa superficial (0 a 20 cm) de cada suelo, se secaron al aire, se tamizaron con una malla de 2 mm y se empacaron en cajas de madera (30 x 30 x 7 cm). La parte baja de éstas se perforaron y se cubrieron con 1 cm de arena gruesa para evitar problemas de drenaje. El suelo seco se empacó en dichos recipientes y éstos se agitaron ligeramente para obtener densidades homogéneas en todos los tratamientos y, posteriormente, colocarlos con una pendiente de 0.2% para permitir los

escurrimientos superficiales durante la simulación de lluvia.

Las muestras de suelo se situaron bajo un simulador de lluvia, modificado al descrito por Morin *et al.* (1966). La velocidad terminal de las gotas con un diámetro de 2.0 mm fue de 8.4 m s^{-1} , de acuerdo con una relación entre la velocidad terminal (m s^{-1}) y diámetro de gota (mm), reportado por Laws (1941). La intensidad de la lluvia fue de 54 mm h^{-1} y la energía cinética fue de $26.97 \text{ J m}^{-2}\text{-mm}$, obtenida por el método descrito por Wischmeier y Smith (1978). Para estandarizar el efecto químico de la calidad del agua, se utilizó agua destilada en las simulaciones de lluvia.

Después de la simulación de lluvia, el suelo se secó con bulbos de luz infrarroja, colocados a 100 cm sobre la superficie del suelo. Se simuló períodos diurnos y nocturnos al apagar y encender las luces cada 12 h por siete días. Las prácticas de manejo evaluadas fueron: 1) suelo desnudo, 2) suelo protegido y 3) adición de yeso agrícola. El suelo protegido se cubrió con malla de 2 mm. Al suelo con adición de yeso, se le aplicaron el equivalente a 5 t ha^{-1} en la superficie, de acuerdo con los resultados reportados por Ben-Hur *et al.* (1992).

Se tomaron muestras en bloques de los primeros 2 cm y se secaron al aire. Los especímenes se colectaron en dos etapas: 1) antes del inicio de los escurrimientos y 2) al final del período de secado. De cada terrón se elaboraron secciones delgadas. Otra parte fue montada en seco, para su observación directa en el microscopio electrónico (SEM). Posteriormente, se cubrieron con una capa de carbón y oro para su análisis en el microscopio electrónico. Se usó un atomizador, tipo Denton Vacuum DV-502A, y otro, tipo Sputter, para cubrir los ejemplares con carbón y oro, respectivamente. Para el análisis micromorfológico de las costras, se empleó un SEM tipo JEOL T-300.

RESULTADOS Y DISCUSION

Debido a la similitud en la morfología presente en las costras de los suelos de Louisiana, EU, y la del suelo de México, Sandovalés, sólo la morfología de Gigger será descrita. De igual forma, sólo se analizará la morfología de Asogueros, dado su parecido con la de Reforma.

Costras en el Tipo de Suelo Gigger

Durante la etapa de formación de la costra, antes del inicio de los escurrimientos, la principal característica morfológica en el tratamiento con suelo desnudo fue la alteración en la superficie del suelo por el impacto directo de las gotas de lluvia (Figura 1). Esta modificación es un claro ejemplo de lo que ocurre en el campo, cuando el suelo no tiene ninguna protección contra el golpeteo de las gotas de lluvia, principalmente, después de la preparación del terreno para sembrar. Las gotas de agua actúan como pequeñas bombas que salpican las partículas del suelo, formando estructuras parecidas a pequeños cráteres (Figura 1). Debido a la continua destrucción de la superficie, no hubo acumulación de material fino en los primeros milímetros. Cualitativamente, se observó que no se presentó compactación; en consecuencia, la porosidad fue similar en la superficie y en el resto del perfil de la costra. No se distinguió tampoco una orientación de partículas en la superficie de la costra en esta etapa antes del inicio de los escurrimientos.

Al final del período de secado, la superficie del suelo no presentó la heterogeneidad observada antes del inicio de los escurrimientos. En esta etapa final, se formó una delgada capa compacta, compuesta de partículas de suelo sin material fino, tamaño uniforme, sin estructura y una moderada orientación de partículas. Esta delgada capa fue la principal característica observada al final del período de secado con relación al muestreo realizado antes del inicio de los escurrimientos. La formación de esta delgada capa durante el encostramiento reportaron McIntyre (1958), Onofiok y Singer (1984) y Tarchitzky *et al.* (1984), la cual, se asume, es el resultado del continuo golpeteo de las gotas de lluvia en la superficie del suelo, ocasionando la remoción de material fino del suelo en los escurrimientos e infiltración. Debajo de la superficie, el contenido aparente de partículas finas fue mayor que el observado en la capa superior (Figura 2). Debido a la compactación por las gotas de lluvia, la porosidad relativa en la superficie de la costra fue más reducida, en comparación con los macroporos observados debajo de ésta (Figura 2).

La principal característica morfológica en el suelo protegido, antes del inicio del escurrimiento, fue una superficie plana y sin alteraciones por las gotas de lluvia (Figura 3). Al final del encostramiento, en este tratamiento no se presentó la capa superficial de granos gruesos como en el caso del suelo desnudo; en

el estrato inmediato a la superficie se apreció mayor porosidad que arriba de esta zona (Figura 4). Estas observaciones sugieren que la dispersión química es un factor de importancia en el encostramiento, dado que, en el suelo protegido, los agregados se destruyeron por la energía cinética de la lluvia, por lo que la dispersión ocurrida fue un resultado de las características químicas y mineralógicas del suelo.

La morfología de la costra en el suelo con adición de yeso presentó un incremento en la agregación de partículas en la etapa previa al inicio de los escurrimientos (Figura 5). Este efecto se atribuye a la cualidad floculante del calcio, proveniente del yeso agrícola aplicado al suelo. Aun cuando el suelo se expuso al golpeteo de la lluvia, se observó que la agregación redujo la acción dispersante de las gotas de lluvia. Como resultado, la superficie en este tratamiento no presentó la transformación observada en la capa superficial del suelo desnudo. La porosidad y tamaño de partículas fueron más uniformes en la capa superficial (0.4 mm) de la costra del suelo y la agregación se incrementó relativamente en relación con la observada en el suelo desnudo y protegido, respectivamente.

Al final del período de secado, se detectó una capa de 0.1 mm de espesor, compuesta de granos gruesos y tamaño uniforme, sin estructura y moderada orientación de partículas (Figura 6). Debajo de esta capa libre de partículas finas, se observó una zona con mayor cantidad de material fino adherido a fragmentos gruesos, actuando como agregados del suelo. Como se discutió previamente, el material fino del suelo se removió por la acción dispersante de la lluvia y se desplazó por el escurrimiento (Figura 6).

Costras en el Tipo de Suelo Asogueros

La superficie del suelo en Asogueros se alteró fuertemente por las gotas de lluvia antes del inicio de los escurrimientos (Figura 7), sellándola por completo con porciones finas, las cuales cubrieron totalmente al material edáfico más grande. Aun cuando la textura de este sitio es más gruesa que la de los suelos de Louisiana, EU, no se observaron granos de arena, debido a la formación de una estructura masiva. Cualitativamente, se manifestó que debajo de la capa de 0.1 mm de espesor, los macroporos fueron más abundantes que en la superficie (Figura 8).

Al final del período de secado, la morfología de la costra fue muy similar a la descrita en el muestreo

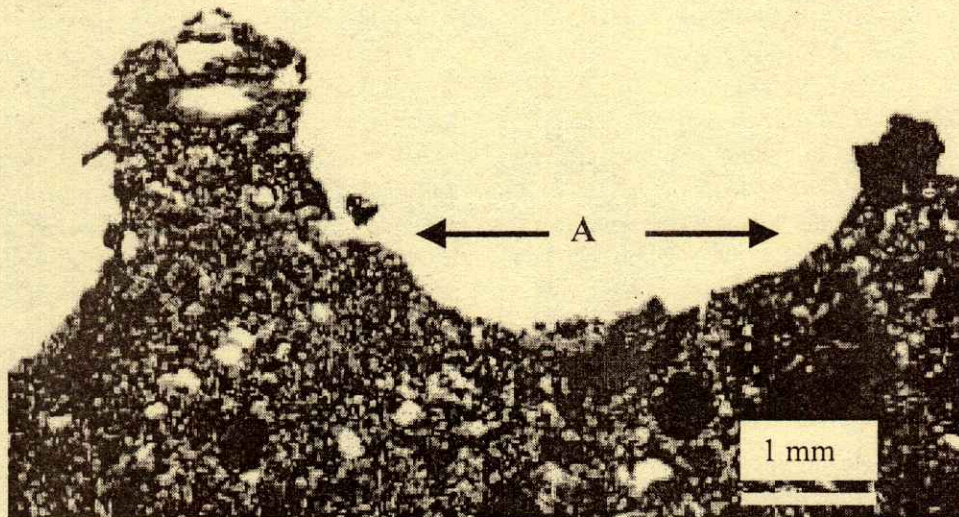


Figura 1. Fotografía en microscopio petrográfico mostrando la alteración de la superficie del suelo (A) por el impacto directo de las gotas de lluvia antes del inicio del escurrimiento en el suelo desnudo Gigger.

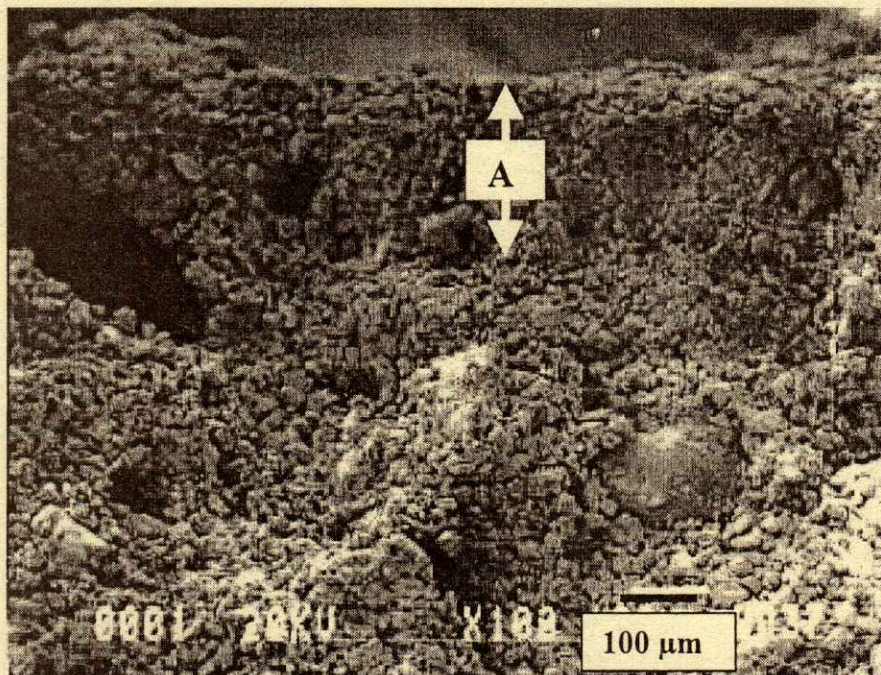


Figura 2. Fotografía en microscopio electrónico mostrando la formación de una capa compacta de 0.1 mm en la superficie del suelo (A), formada por granos sin partículas finas de suelo al final del periodo de secado en el suelo desnudo Gigger.

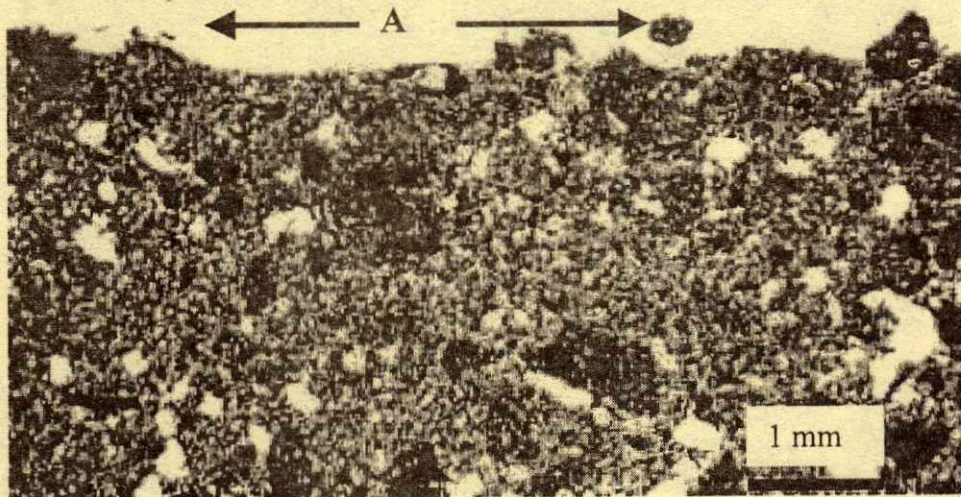


Figura 3. Fotografía en microscopio petrográfico mostrando la superficie del suelo (A) sin disturbar por las gotas de lluvia antes del inicio de los escurrimientos en el suelo protegido Gigger.

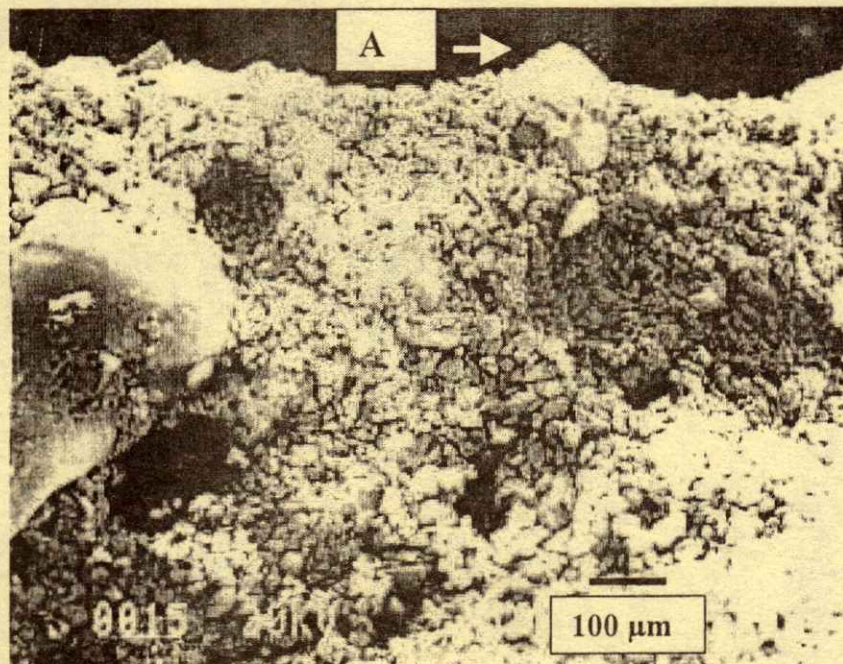


Figura 4. Fotografía en microscopio electrónico mostrando agregados del suelo en la superficie (A) antes del inicio del escurrimiento en el suelo protegido Gigger.

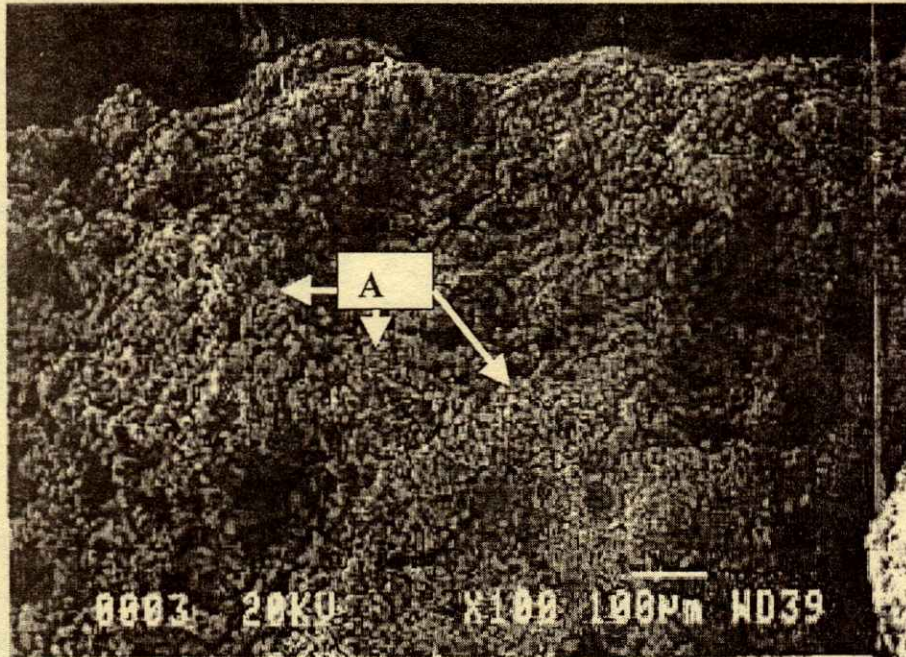


Figura 5. Fotografía en microscopio electrónico mostrando el efecto de agregación del yeso (A) antes del escurrimiento en el suelo con adición de yeso agrícola Gigger.

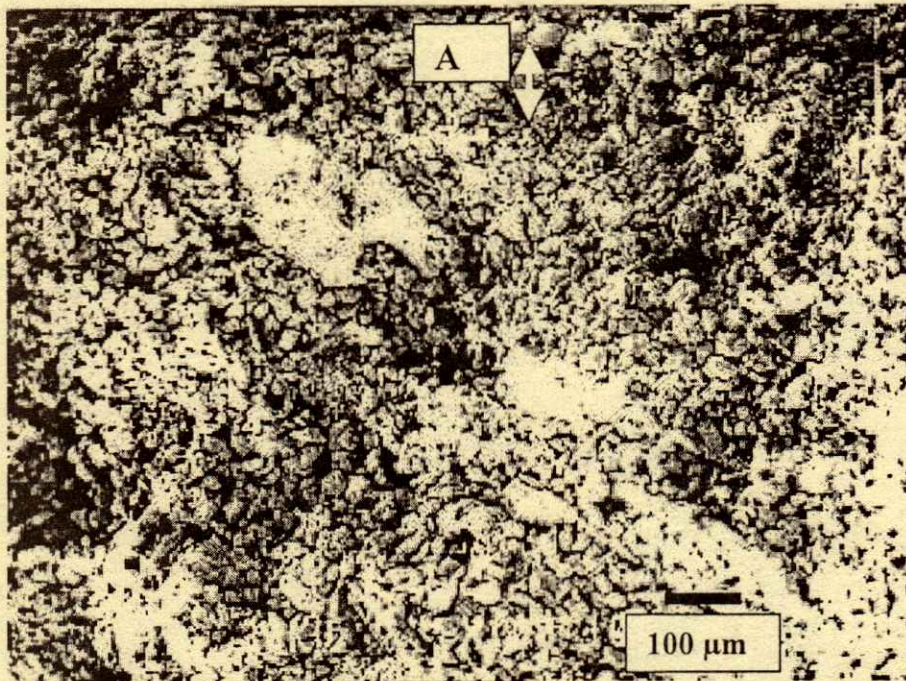


Figura 6. Fotografía en microscopio electrónico mostrando la capa superficial de 0.1 mm (A) formada por granos sin material fino de suelo y sin estructura al final del periodo de secado en el suelo con adición de yeso agrícola Gigger.

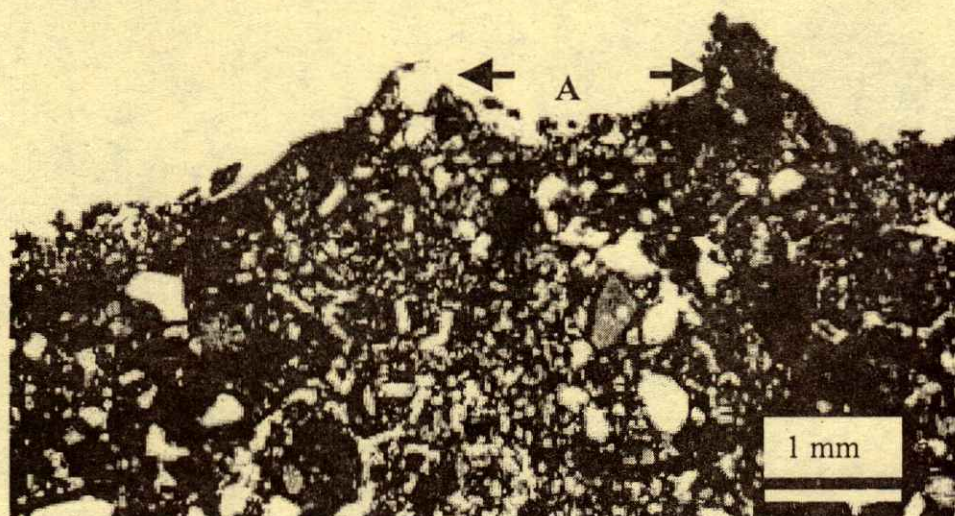


Figura 7. Fotografía en microscopio petrográfico mostrando la alteración de la superficie del suelo (A) causada por el impacto de las gotas de lluvia antes del inicio del escurrimiento en el suelo desnudo Asogueros.

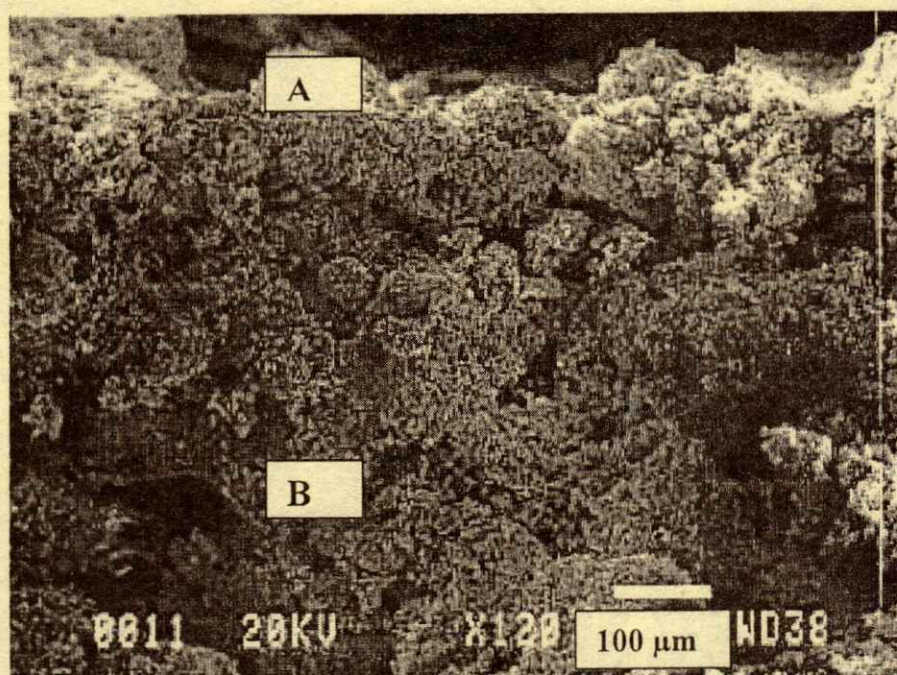


Figura 8. Fotografía en microscopio electrónico mostrando una distribución homogénea de las partículas de suelo en la superficie (A) y zona adyacente (B) antes del inicio del escurrimiento en el suelo desnudo Asogueros.

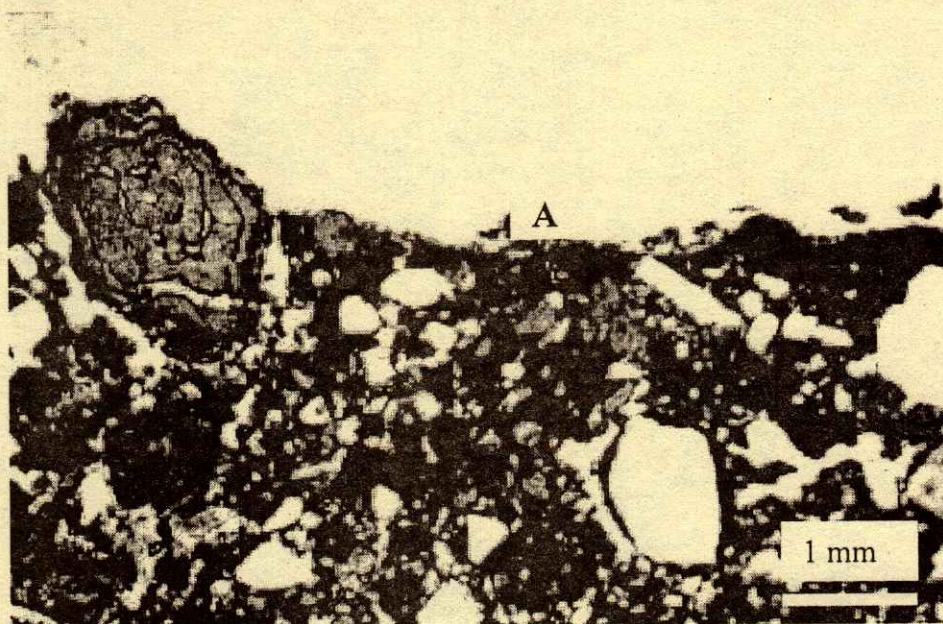


Figura 9. Fotografía en microscopio petrográfico mostrando la superficie del suelo (A) sin alterar por las gotas de lluvia antes del inicio del escurrimiento en el suelo protegido Asogueros.

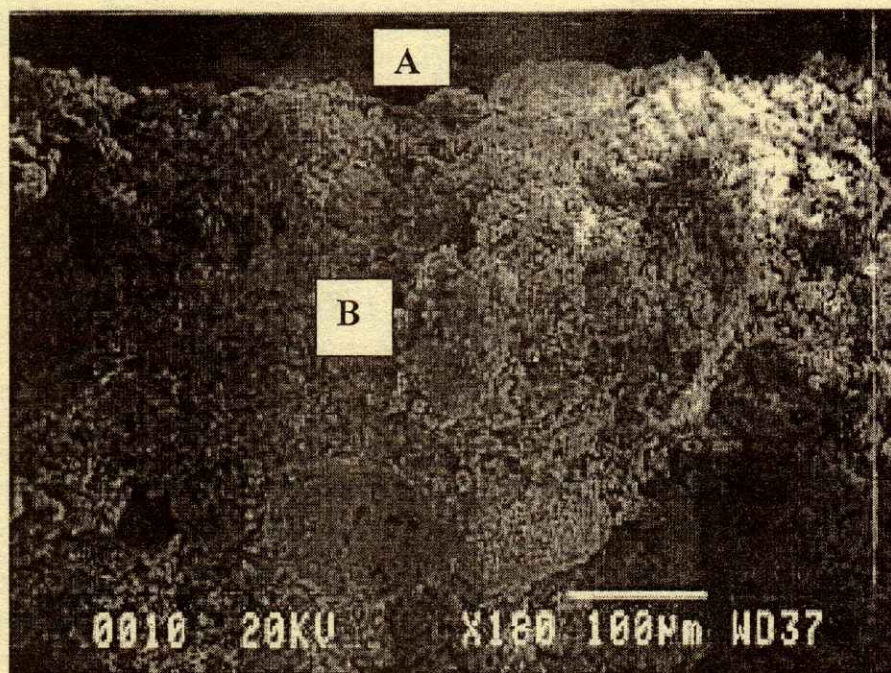


Figura 10. Fotografía en microscopio electrónico mostrando una distribución homogénea en la superficie del suelo (A) y zona adyacente (B) antes del inicio del escurrimiento en el suelo protegido Asogueros.

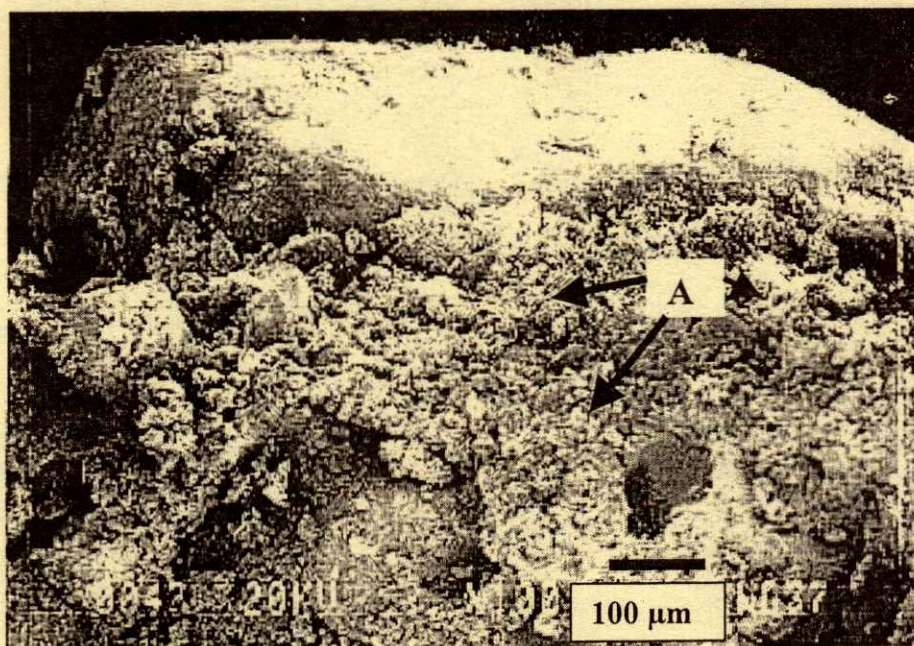


Figura 11. Fotografía en microscopio electrónico mostrando el sellado de la superficie del suelo por partículas finas (A) al final del periodo de secado en el suelo protegido Asogueros.

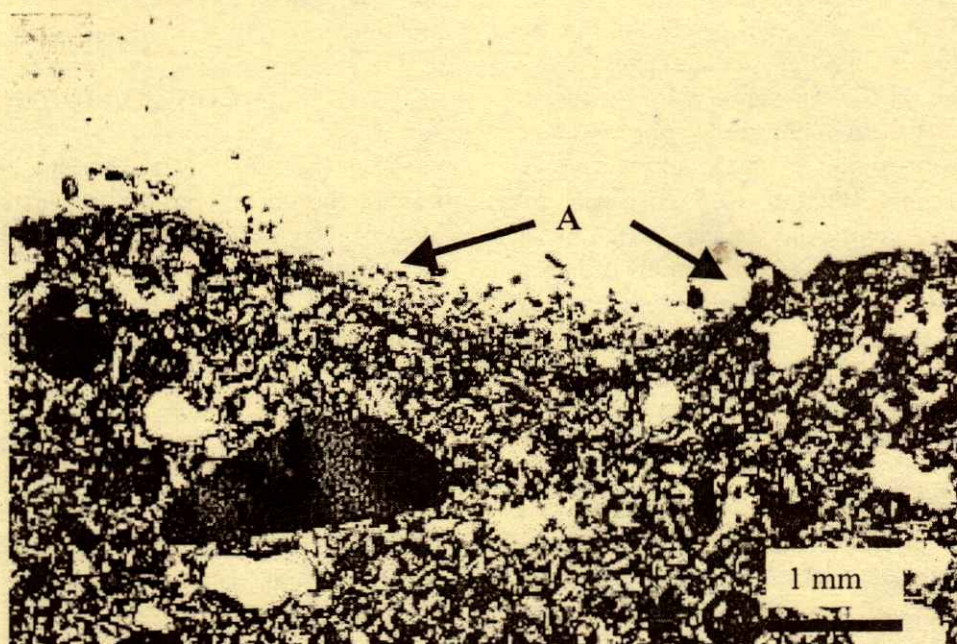


Figura 12. Fotografía en microscopio petrográfico mostrando el impacto de las gotas de lluvia en la superficie del suelo (A) antes del inicio del escurrimiento en el suelo con adición de yeso agrícola Asogueros.

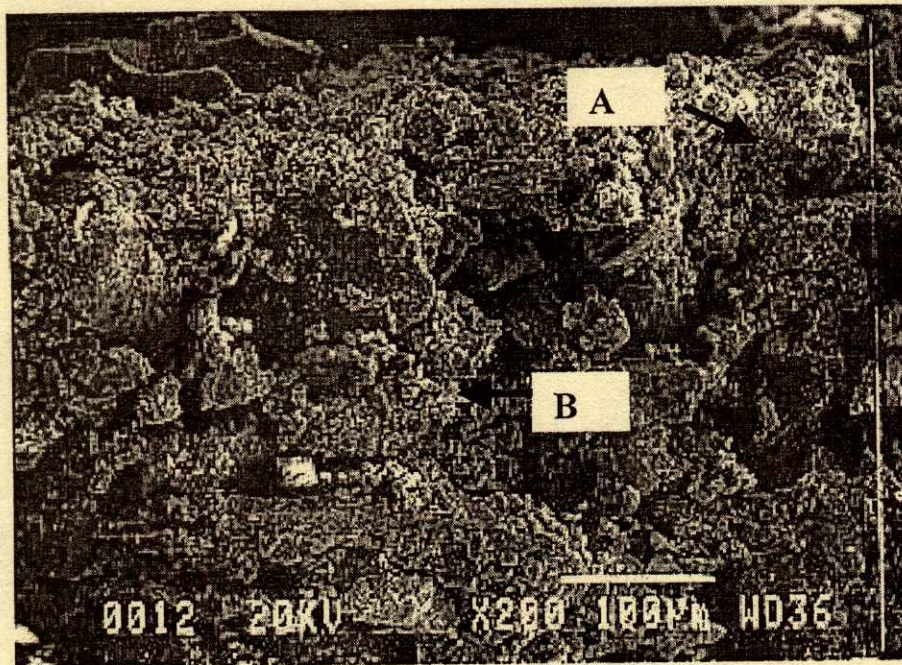


Figura 13. Fotografía en microscopio electrónico mostrando el efecto de agregación en la superficie del suelo (A) y en la zona adyacente (B) antes del inicio del escurrimiento en el suelo con adición de yeso agrícola Asogueros.

anterior al escurrimiento. No se observaron granos limpios de material fino en la superficie, debido al alto grado de dispersión de este suelo.

En el tratamiento con suelo protegido, no se detectó alteración en su superficie por el impacto de las gotas de lluvia (Figura 9); el material fino y disperso selló la superficie del suelo al obturar los poros y no se detectaron macroporos en la capa superficial de 0.1 mm de la costra (Figura 10). Al final del encostramiento, las partículas finas sellaron la superficie y no se observaron granos limpios debajo o en la superficie de la costra, por lo que se generó una estructura masiva (Figura 11). Al igual que en los resultados discutidos anteriormente en el suelo Gigger, el tratamiento con protección manifestó una acumulación de partículas finas en la superficie por dispersión química.

Finalmente, la superficie del tratamiento con adición de yeso se alteró por las gotas de lluvia antes del inicio de los escurrimientos (Figura 12). Al final del encostramiento y antes del inicio de los escurrimientos, las partículas finas cubrieron a las más gruesas. Fue clara la evidencia de agregación de partículas en la superficie y debajo de ésta a causa del

yeso aplicado al suelo (Figura 13). La porosidad relativa fue mayor debajo de la superficie que en la capa superficial de la costra, en ambas etapas de muestreo.

CONCLUSIONES

Como se señaló anteriormente, el objetivo de este trabajo fue: identificar las principales características morfológicas durante el encostramiento del suelo.

1. En el tratamiento con suelo protegido en las muestras de México y Louisiana, la energía cinética de la lluvia se redujo, al evitar el golpeteo directo de las gotas de lluvia en la superficie del suelo. Dicha protección previno la dispersión de los agregados en la superficie del suelo, la suspensión de las partículas y la consecuente segregación del material fino. Esta interpretación es basada en una morfología general consistente en una superficie sin disturbar y una matriz del suelo dominada por una homogénea distribución de las partículas.

2. Los agregados del suelo se destruyeron por el impacto de las gotas de lluvia en los tratamientos sin protección. La arcilla dispersada se perdió, tanto en el

escurrimiento, como en la infiltración. En consecuencia, se formó una capa de 0.1 a 0.2 mm de espesor con granos libres de material fino.

3. La morfología de los suelos sin protección de Asogueños se distinguió por un sistema disperso y masivo. No se detectó ninguna capa compuesta de material fino en la superficie de la costra.

LITERATURA CITADA

- Aujala, T.S., B. Singh y B.S. Sandhu. 1986. Effect of pre-sowing and post-sowing irrigation treatment to wheat following rice in Punjab. *J. Ecology*. 13: 250-255.
- Ben-Hur, M., J. Letey e I. Shainberg. 1990. Effect of crust formation and polysaccharide on soil erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1092-1095.
- Ben-Hur, M., R. Stern, A. J. van der Merwe e I Shainberg. 1992. Slope and gypsum effect on infiltration and erodibility of dispersive and nondispersive soils. *Soil Sci. Am. J.* 56: 1571-1576.
- Bradford, J.M. y R.B. Grossman. 1982. *In situ* measurement of near-surface soil strength by the fall-cone device. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 685-688.
- Bresson, M.L. y J. Boiffin. 1990. Morphological characterization of soil crust development on an experimental field. *Geoderma* 47: 301-325.
- Bruce, R.R., G. W. Langdale y L.T. West. 1990. Modifications on soil characteristics of degraded soil surfaces by biomass input and tillage affecting soil water regime. *Trans. 14th Intern. Congr. Soil Science, Kyoto, Japan.*
- Chen, J., J. Tarchitzky, J. Morin y A. Banin. 1980. Scanning electron microscope observations on soil crust and their formation. *Soil Sci.* 130: 49-55.
- Gal, M., L. Arcan, I. Shainberg y R. Keren. 1984. The effect of exchangeable Na and phosphogypsum on the structure of soil crust-SEM observations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 872-878.
- Goyal, M.R., G.L. Nelson y L.O. Drew. 1981. Moisture and soybean seedling emergence. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 24: 1432-1435.
- Laws, J.O. 1941. Measurements of fall-velocity of water-drops and raindrops. *Trans. Am. Geog. Union* 22: 709.
- Le Bissonnais, Y., A. Bruand y M. Jamagne. 1989. Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *Catena* 16: 377-392.
- McIntyre, D.S. 1958. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Sci.* 85: 261-266.
- McVay, D.E. Radcliffe y W.L. Hargrove. 1989. Winter legume effects on soil properties and nitrogen fertilizer requirements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1856-1862.
- Miller, W.P. y J. Scifres. 1987. Effect of sodium nitrate and gypsum on infiltration and erosion of a highly weathered soil. *Soil Sci.* 148: 304-309.
- Morin, J. y Y. Benjamini. 1977. Rainfall infiltration into bare soils. *Water Resour. Res.* 13: 813-817.
- Morin, J., S. Goldberg e I. Seniger. 1966. A rainfall simulator with a rotating disk. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 10: 74-79.
- Morin, J., Y. Benjamini y A. Michaeli. 1981. The dynamics of soil crusting by rainfall impact and the water movement in the soil profile. *J. Hydrology* 52: 321-335.
- Onofiok, O. y M.J. Singer. 1984. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1137-1143.
- Ramley, P.A. y J.M. Bradford. 1989. Relationship of soil crust morphology to inter-rill erosion parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1215-1221.
- Shainberg, I., M.E. Sumner, W.P. Miller, M.P.W. Farina, M.A. Pavan y M.V. Fey. 1989. Use of gypsum on soils: a review. *Adv. Soil Sci.* 9: 1-111.
- Smith, H.J.C., G.J. Levy e I. Shainberg. 1990. Water-droplet energy and soil amendments: effect on infiltration and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1084-1087.
- Soil Survey Staff. 1996. *Keys to Soil Taxonomy*. 7th ed. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. US Gov. Printing Off., Washington, DC.
- Stern, R., M. Ben-Hur e I. Shainberg. 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Sci.* 152: 455-462.
- Tarchitzky, J., A. Bannin, J. Morin y Y. Chen. 1984. Nature, formation and effects of soil crusts formed by water drop impact. *Geoderma* 33: 135-155.
- Wilson, G.F., R. Lal y B.N. Okigbo. 1982. Effects of cover crops on soil structure and yield of subsequent arable crops grown under strip tillage on an eroded Alfisol. *Soil Tillage Res.* 2: 233-250.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. US Department of Agriculture, *Agricultural Handbook* 537.

AGENTES CEMENTANTES EN EL ENCOSTRAMIENTO DE LA SUPERFICIE DE SUELOS DE MEXICO Y LOUISIANA, EU

Cementing Agents in Crust Formation in Soils of Mexico and Louisiana, USA

M.A. Martínez-Gamiño¹ y P.M. Walthall²

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue: determinar la composición química de los agentes cementantes en la costra de suelos de México y de Louisiana, EU. Se evaluaron las siguientes prácticas de manejo al suelo: 1) suelo desnudo, 2) suelo protegido y 3) adición de yeso agrícola. La presencia de calcita fue identificada por el análisis de rayos-X en las costras de Coteau. En Olivier se detectó la cementación entre partículas por óxidos de hierro. En Gigger, la sílice formó filamentos para unir las partículas del suelo. En las costras de los tratamientos desnudo y protegido de Reforma y Asogueros, se observó que el yeso fue uno de los agentes cementantes del suelo. En el suelo de Reforma, se detectaron recubrimientos masivos de sílice y calcita. Además del yeso pedogénico, se encontraron recubrimientos masivos de hierro en las costras del suelo Sandoval.

Palabras clave: Yeso, sílice, hierro, agregados, dispersión.

SUMMARY

The objective in this study was to determine the chemical composition of cementing agents in the crust of soils of Mexico and Louisiana, USA. Three soil management techniques were evaluated: 1) bare soil, 2) protected soil, and 3) gypsum-amended soil. The presence of calcite was identified in the SEM micrograph of the Coteau crust by XRF. Iron bridges between particles were detected in the crust of the Olivier. Silica was detected as filaments between particles in the crust of Gigger. Gypsum was observed bridging particles in the non-gypsum-amended Reforma and Asogueros soils. Massive coatings of

silica and calcite were observed in the Reforma. In addition to pedogenic gypsum, massive iron coatings were detected in the Sandoval crust.

Index words: Gypsum, silica, iron, aggregates, dispersion.

INTRODUCCION

El encostramiento es un problema común en los suelos de Louisiana, EU, y en los del Altiplano Potosino Zacatecano en el norte-centro de México. La formación de esta costra superficial es ocasionada por mecanismos físicos o químicos que dispersan los agregados en partículas finas, las cuales pueden sellar la superficie del suelo, infiltrarse o ser removidos en los escurrimientos. Después de este proceso, se requiere un período cálido y seco para que los agentes cementantes se precipitan, formando una costra cuyo grosor varía de 0.1 mm a varios centímetros.

A la fecha, el mecanismo de cementación y el tipo de agentes cementantes en los suelos Loess de Louisiana, EU, y los del norte-centro de México no son claros. En ambas localidades, frecuentemente, se presentan lluvias de alta intensidad al inicio de la etapa de desarrollo de los cultivos. En dicho momento, los suelos carecen de una protección vegetal contra la acción de las gotas de lluvia. Conjuntamente a la dispersión física de los agregados, algunas propiedades químicas del suelo pueden afectar la pérdida de su estructura, como el sodio intercambiable, salinidad y la presencia de arcillas altamente dispersantes, como las esmectitas (Shainberg y Letey, 1984; Agassi *et al.*, 1985; Stern *et al.*, 1991).

Los principales agentes cementantes en las zonas semiáridas y subtropicales son la sílice y los sesquióxidos de hierro y aluminio, respectivamente. La información bibliográfica actual se enfoca más en el papel de estos elementos químicos durante el proceso de formación de los suelos, que en su precipitación temporal en las costras superficiales de suelos agrícolas (Chartres y Fitzgerald, 1990; Chartres *et al.*, 1990).

¹ INIFAP, Santos Degollado 1015-A, Col. Cuauhtémoc, 78270 San Luis Potosí, S.L.P., México.

² Agronomy Department, Louisiana State University, 134 Sturgis Hall, Baton Rouge, 78380 LA, USA.

Recibido: Marzo de 1996.

Aceptado: Enero de 2001.

La sílice es un agente cementante, relacionada más a las zonas áridas, debido a que las escasas precipitaciones en dichas áreas permiten su acumulación en el suelo. La sílice puede estar presente en el suelo en diferentes formas: soluble (ácido silicífico), coloidal (hidrosol), gel no rígido (hidrogel) y gel rígido (xerogel) (Hallmark *et al.*, 1982).

Chartres *et al.* (1990), en un estudio para determinar los agentes cementantes en suelos con problemas de encostramiento en Australia, reportaron a los materiales amorfos de sílice y aluminosilicatos, un feldespato mineral y complejos minerales de sílice y hierro como causantes del endurecimiento superficial. Chartres y Fitzgerald (1990) puntualizaron que la cementación en suelos con características de duripán ocurre como resultado de la impregnación de las arcillas y demás compuestos del suelo con sílice amorfa. Estos autores señalaron que la sílice amorfa y aluminosilicatos actuaron como cementantes temporales, debido a su precipitación durante períodos de secado del suelo.

Brown y Mahler (1988) sugirieron que la concentración de la sílice amorfa en el suelo se incrementa con el uso de fertilizantes amoniacales. Aducen que el uso de estos fertilizantes, por períodos largos, ocasiona una acidificación en la superficie del suelo. Cuando la concentración de sílice se aproxima al nivel de precipitación de la sílice amorfa, ésta actúa como un cementante al ser absorbido por la superficie de las partículas del suelo (Lindsay, 1979).

El uso de yeso agrícola, yeso fosfórico, compuestos orgánicos, sales polivalentes o polímeros sintéticos permiten mejorar la estructura, reduciendo el problema de encostramiento del suelo. Los principales beneficios de estos productos se ven reflejados en un mejoramiento en la emergencia de las plantas, infiltración, porosidad, drenaje, capacidad de retención de agua y conductividad hidráulica. Como resultado de lo anterior, el riesgo de erosión y pérdida de agua por escurrimientos y evaporación se reduce (Terry y Nelson, 1986; Wallace y Abouzamzam, 1986; Shaviv *et al.*, 1987; Ben-Hur y Letey, 1989).

La adición de yeso, en terrenos agrícolas con problemas de sodio, ha mejorado y reducido el problema de encostramiento del suelo según lo reportado por Awahwal y Thierstein (1986). De igual forma, Ben-Hur *et al.* (1992) reportaron que el yeso incrementó la concentración de electrolitos en la solución edáfica suelo previniendo la dispersión de las

arcillas e incrementando la tasa de infiltración final de un valor de 10.0 a 35.0 cm h⁻¹.

El uso de polímeros permite unir las partículas de arcilla y formar agregados más estables. El uso de estos productos ha permitido incrementar la emergencia de las plantas al reducir el encostramiento del suelo. Terry y Neson (1986) reportaron que la infiltración se incrementó al doble después de aplicar de 5 a 20 kg ha⁻¹ de polímeros (PAM).

El objetivo de este estudio fue: determinar la composición química de los agentes cementantes en el encostramiento superficial de suelos del Altiplano Potosino-Zacatecano en el centro-norte de México y Louisiana, EU.

MATERIALES Y METODOS

Los suelos de México se clasificaron de acuerdo con el Soil Survey Staff (1996) como: Asogueros (Nadurargid vértico: franco, mixto e hipotérmico), Sandovalés (Durustoll arídico: franco, mixto e hipotérmico) y Reforma (Calciorthid lítico: franco, mixto e hipotérmico) y los de Louisiana, EU, como: Gigger (Fragiudalf típico: limoso fino, mixto y térmico), Olivier (Fragiudalf áquico: limoso fino, mixto y térmico) y Coteau (Hapludalf glossáquico: limoso fino, mixto y térmico).

Se colectaron muestras de la capa superficial (0 a 20 cm) de cada suelo, se secaron al aire, se tamizaron con una malla de 2 mm y se empacaron en cajas de madera (30 x 30 x 7 cm). La parte baja de éstas se perforaron y se cubrieron con 1 cm de arena gruesa para evitar problemas de drenaje. El suelo seco se empacó en dichos recipientes y se agitaron ligeramente para obtener densidades homogéneas en todos los tratamientos y, posteriormente, colocarlos con una pendiente de 0.2%, para permitir el escurrimiento superficial durante la simulación de lluvia.

Las muestras de suelo se situaron bajo un simulador de lluvia, modificado al descrito por Morin *et al.* (1966). La velocidad terminal de las gotas con un diámetro de 2.0 mm fue de 8.4 m s⁻¹ de acuerdo con una relación entre la velocidad terminal (m s⁻¹) y diámetro de gota (mm), reportado por Laws (1941). La intensidad de la lluvia fue de 54 mm h⁻¹ y la energía cinética fue de 26.97 J m⁻²-mm, obtenida por el método descrito por Wischmeier y Smith (1978).

Después de la simulación de lluvia, el suelo se secó con bulbos de luz infrarroja colocados a 100 cm

sobre la superficie del suelo. Se simularon períodos diurnos y nocturnos al apagar y encender las luces cada 12 h por siete días. Las prácticas de manejo evaluados fueron: 1) suelo desnudo, 2) suelo protegido y 3) adición de yeso agrícola. El suelo protegido se cubrió con malla de 2 mm. Al suelo con adición de yeso se le aplicaron el equivalente a 5 t ha⁻¹ en la superficie, de acuerdo con los resultados reportados por Ben-Hur *et al.* (1992).

Se tomaron muestras en bloques de los primeros 2 cm al final del período de secado y se cubrieron con una capa de carbón y oro para su análisis en el microscopio electrónico. Se usó un atomizador, tipo Denton Vacuum DV-502A, y otro, tipo Sputter. Se empleó un microscopio electrónico, tipo JEOL T-300. La composición química de los agentes cementantes se obtuvo por dispersión de energía a través de rayos-X. Los criterios para interpretar la composición mineral de los agentes cementantes fueron los siguientes: 1) se asumió la presencia de material de sílice amorfa cuando sólo este elemento fue detectado por los rayos-X en cubiertas masivas de partículas de suelo, 2) la presencia de óxidos de hierro se asumió cuando sólo se detectó hierro, 3) se asumió la presencia de calcita cuando sólo se detectó calcio (carbono o carbonatos no pudieron ser detectados por la baja emisión de energía de estos elementos) y 4) la presencia de yeso se asumió por la identificación de calcio y azufre en el mismo punto de análisis.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el tratamiento con suelo desnudo de Asogueros, se detectaron calcio y azufre como los únicos componentes químicos en las uniones de las partículas de suelo (Figura 1). Además, estos elementos se identificaron en el análisis de rayos-X (Figura 2), lo que sugiere la presencia de yeso como agente cementante. Las uniones de yeso también se detectaron en el tratamiento con suelo protegido en Asogueros. Una evidencia de que las partículas de suelo están unidas por yeso pedogénico, lo representa el hecho de que éstas presentaron picos de sílice y aluminio (Figura 3), los cuales son típicos en la composición mineralógica de las partículas del suelo. Es importante recalcar que este suelo no contiene yeso pedogénico (Cuadro 1), por lo que las uniones de yeso detectadas fueron precipitaciones de este mineral durante el período de secado de la costra. Esta precipitación fue causada por la acumulación de

calcio y sulfatos en la superficie del suelo durante la evaporación del agua.

En los tratamientos de suelo desnudo y protegido en Reforma, también se detectó la presencia de yeso como cementante en las costras. Al igual que en el caso de Asogueros, el suelo de Reforma no contenía yeso en el análisis químico inicial (Cuadro 1). Se asume que, en ambos casos, el yeso se formó debido al incremento de calcio y sulfatos en la superficie durante el secado del suelo.

En el tratamiento de suelo desnudo en Sandoval, se identificaron recubrimientos de hierro en las partículas del suelo (Figura 4). Aun cuando no se cuantificó, fue evidente que las partículas, cubiertas con uniones de hierro, redujeron la porosidad del suelo en comparación con las áreas sin recubrimientos (Figura 5). En adición a la presencia de óxidos de hierro, el yeso también se determinó como agente cementante, en los tratamientos de suelo desnudo y protegido, respectivamente. La morfología de esas uniones de yeso fue similar a la de las discutidas anteriormente para Asogueros. Debido a que el suelo Sandoval contiene yeso (Cuadro 1), este mineral actuó como agente cementante en casi todas las muestras de suelo analizadas por los rayos-X. En el tratamiento con suelo desnudo en el Reforma, sólo se presentó el pico característico de la sílice en estructuras masivas rodeando las partículas del suelo (Figuras 6 y 7).

En el caso de los suelos de Louisiana, EU, se observó la presencia de calcita en el tratamiento con suelo desnudo del Gigger. Dicho mineral cubrió y unió partículas de suelo en la costra (Figura 8). La presencia de calcita se reconoció, cuando el análisis de rayos-X identificó como elemento dominante al calcio sin ningún otro elemento (Figura 9). La presencia de calcio, sin embargo, sólo se localizó en pequeñas áreas de la costra superficial.

En el tratamiento con suelo desnudo del Olivier, el hierro fue el agente cementante de las partículas de suelo (Figuras 10 y 11). Sílice y aluminio estuvieron presentes en las partículas unidas por los filamentos con hierro. En el tratamiento con suelo desnudo de Coteau, se determinó la presencia de sílice en filamentos conectando partículas de suelo (Figuras 12 y 13). Al igual que en las demás partículas de suelo analizadas, sílice y aluminio se determinaron por los rayos-X. La forma masiva de la sílice sugiere que este elemento, al solubilizarse en períodos de lluvia, se precipita durante el secado del suelo.

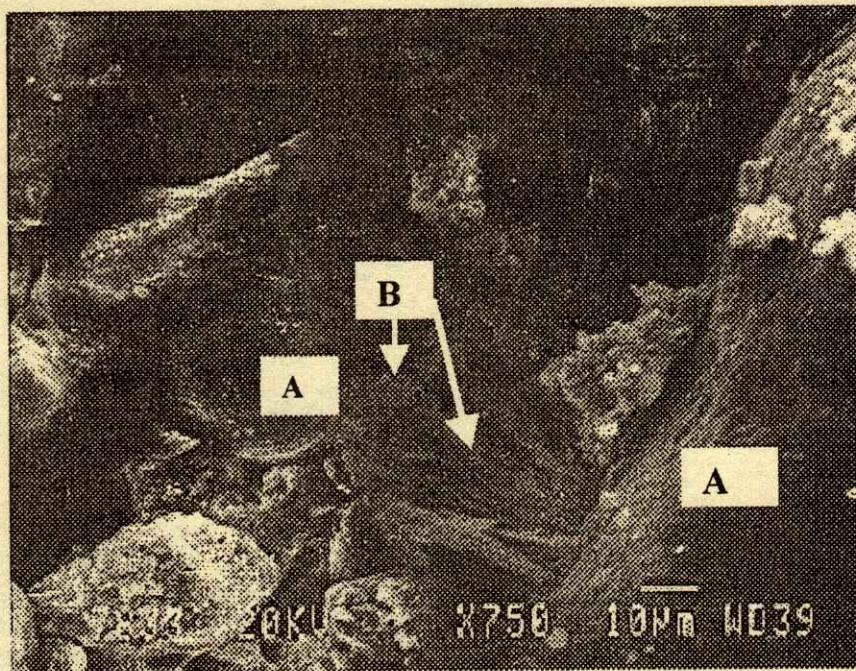


Figura 1. Fotografía en microscopio electrónico mostrando partículas de suelo (A) unidas por yeso (B) en el suelo desnudo Asogueros.

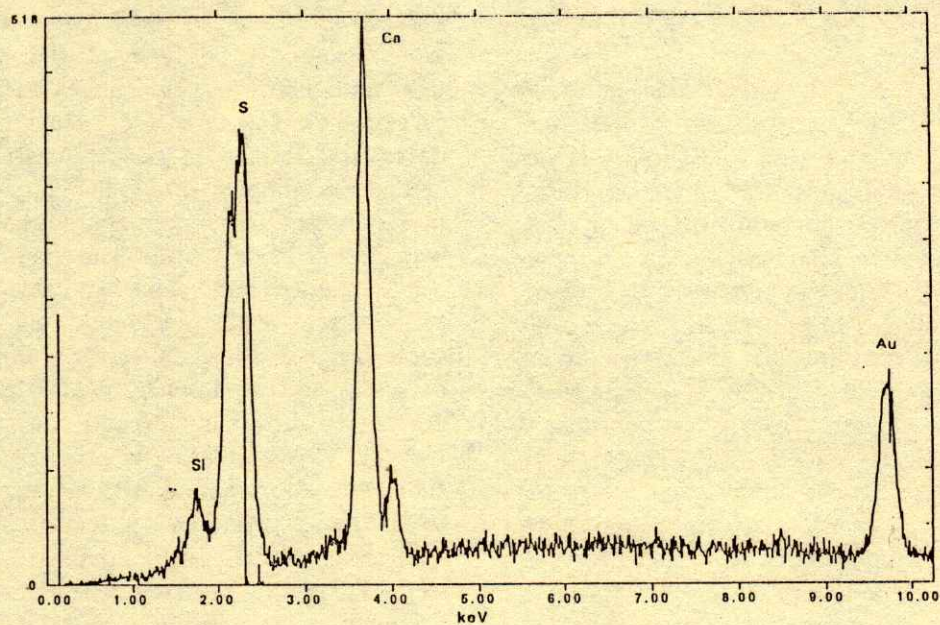


Figura 2. Detección de calcio y sílice por rayos-X en el punto (A) de la Figura 1, confirmando la presencia de yeso como agente cementante en la costra del suelo desnudo Asogueros.

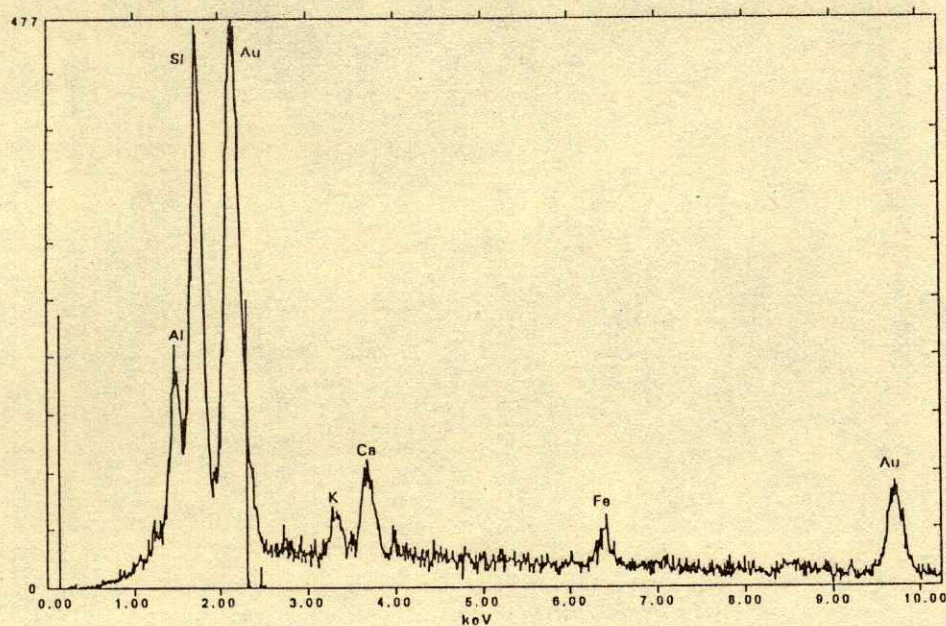


Figura 3. Detección de aluminio y sílice por rayos-X en las partículas de suelo, unidas por yeso en la costra del suelo desnudo Asogueros.

Cuadro 1. Principales características físicas y químicas en los suelos de México y Louisiana, EU.

Suelos	Textura	pH _w	CE [†]	RAS [‡]	CaCO ₃	CaSO ₄	CO [§]
			dS m ⁻¹		----- % -----		
Gigger	Migajón limoso	6.05	0.74	0.53	-	-	0.27
Olivier	Limo	5.27	0.39	0.73	-	-	1.02
Coteau	Migajón limoso	7.25	0.79	0.29	-	-	1.19
Asogueros	Franco	7.89	2.83	3.98	3.90	-	1.15
Sandoval	Franco	5.74	3.06	4.57	-	0.33	0.33
Reforma	Franco	8.11	2.23	3.81	11.40	-	1.76

† = Conductividad eléctrica. ‡ = Relación de adsorción de sodio. § = Carbono orgánico.
 pH_w = 1:1, suelo:agua destilada.

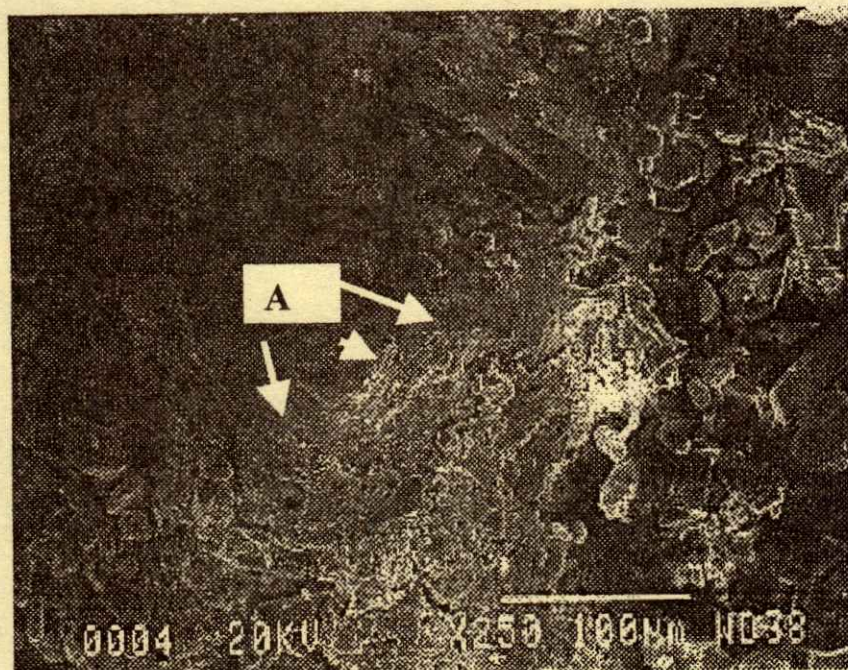


Figura 4. Fotografía en microscopio electrónico mostrando áreas de la costra con agregados masivos de hierro (a) en el suelo desnudo Sandoval.

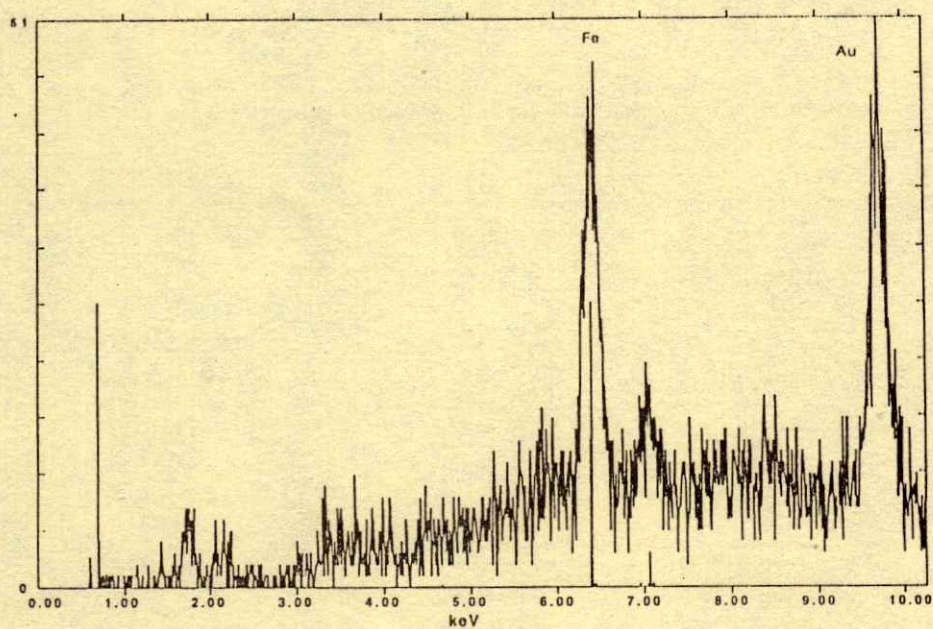


Figura 5. Detección de hierro por rayos-X, sugiriendo la presencia de óxido de hierro como agente cementante en la costra del suelo desnudo Sandoval.

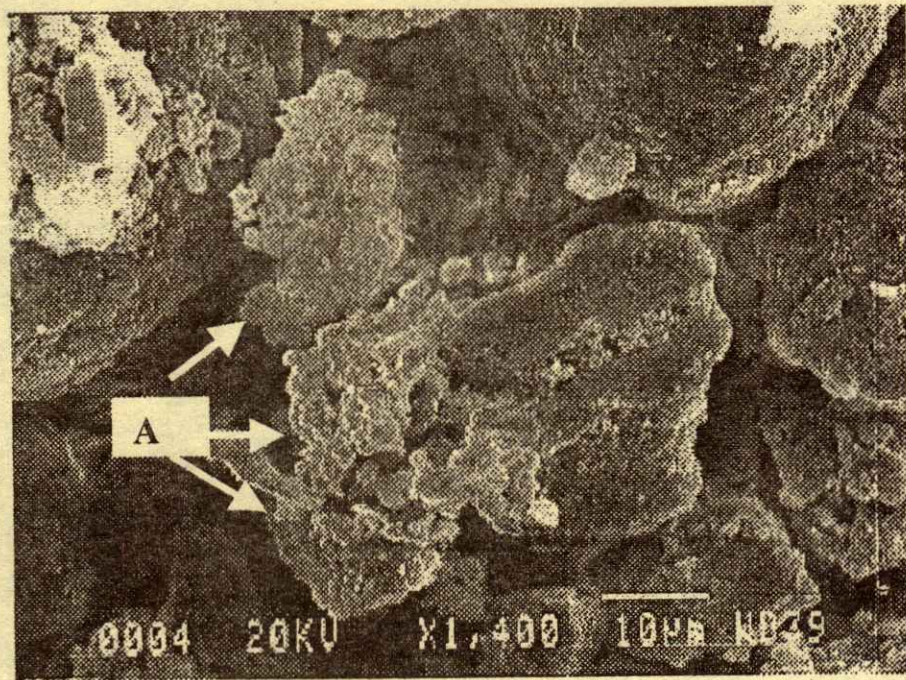


Figura 6. Fotografía en microscopio electrónico mostrando agregados masivos de sílice (A) en la costra del suelo desnudo Reforma.

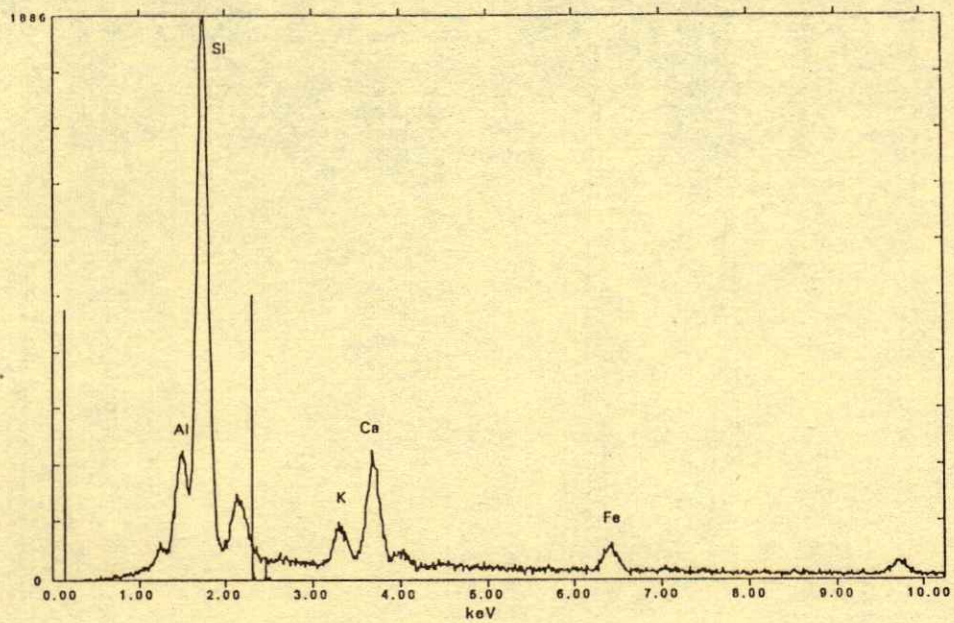


Figura 7. Detección de sílice por rayos-X, sugiriendo la presencia de sílice como agente cementante en la costra del suelo desnudo Reforma.

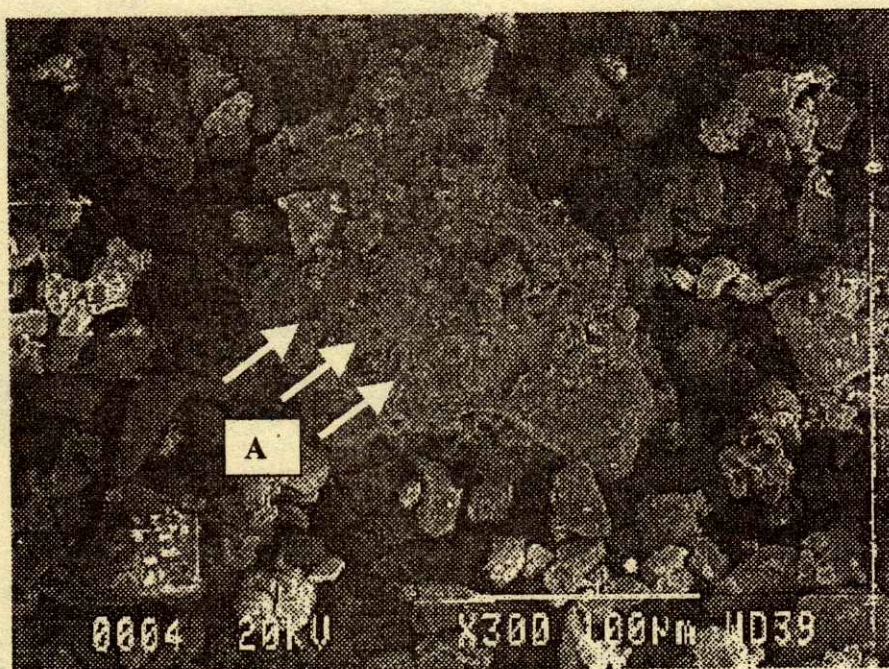


Figura 8. Fotografía en microscopio electrónico mostrando agregados de carbonato de calcio (A) en la costra del suelo desnudo Gigger.

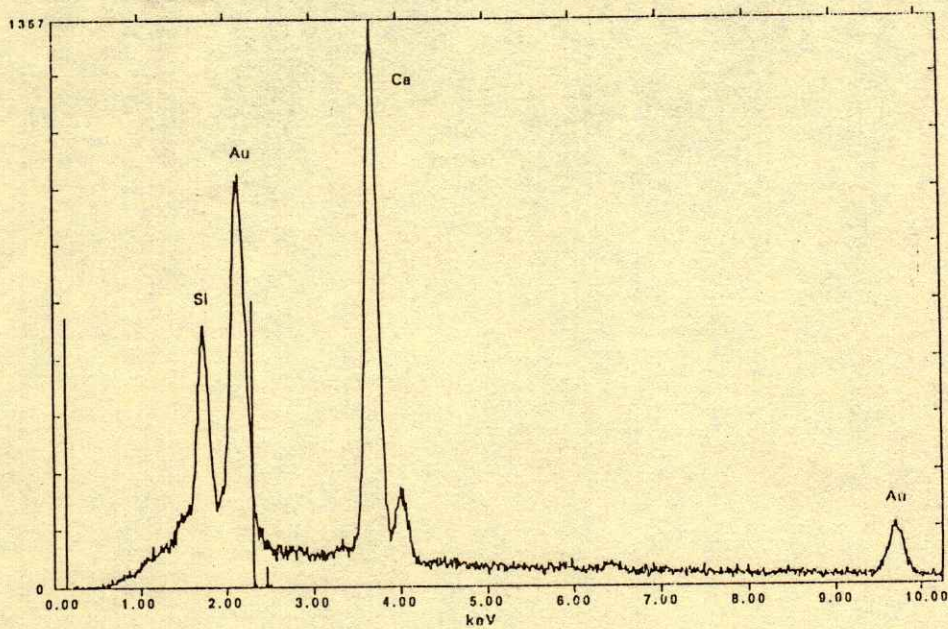


Figura 9. Detección de calcio por rayos-X, sugiriendo la presencia de calcita como agente cementante en la costra del suelo desnudo Gigger.

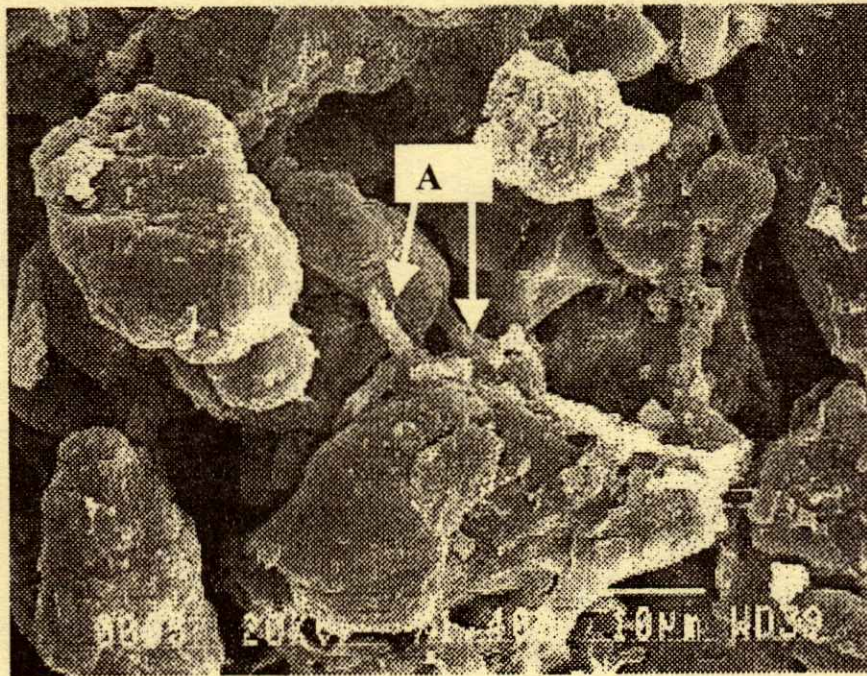


Figura 10. Fotografía en microscopio electrónico mostrando filamentos compuestos de hierro (A) uniendo partículas de suelo en la costra del suelo desnudo Olivier.

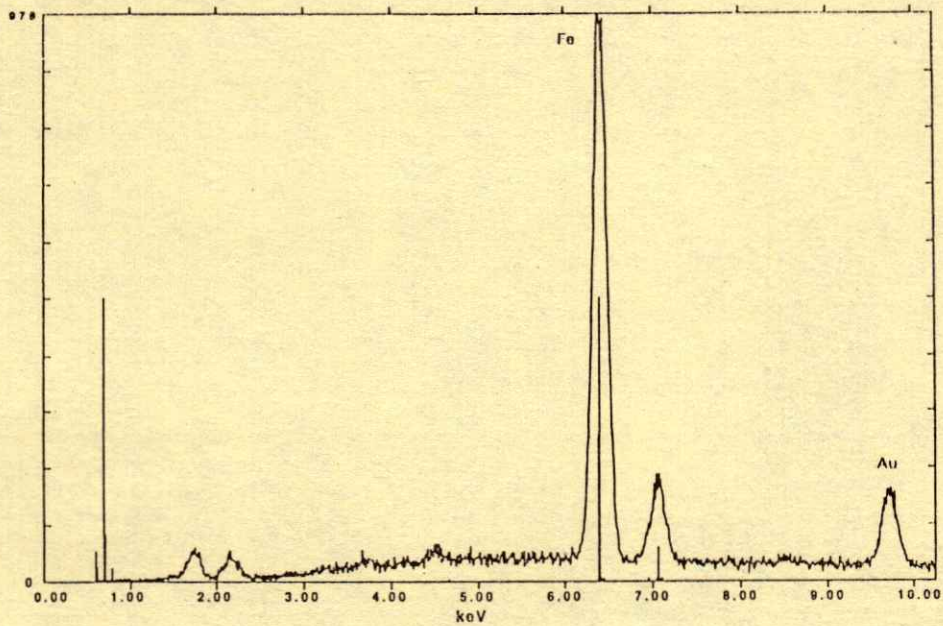


Figura 11. Detección de hierro por rayos-X, sugiriendo la presencia de óxidos de hierro como agente cementante en la costra del suelo desnudo Olivier.

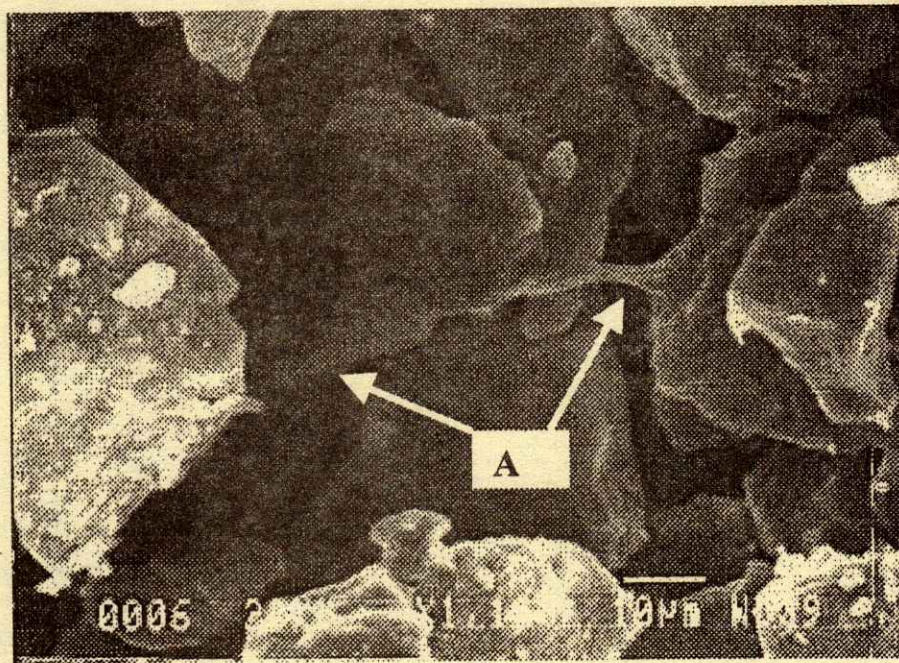


Figura 12. Fotografía en microscopio electrónico mostrando filamentos compuestos por sílice (A) uniendo partículas de suelo en la costra del suelo desnudo Coteau.

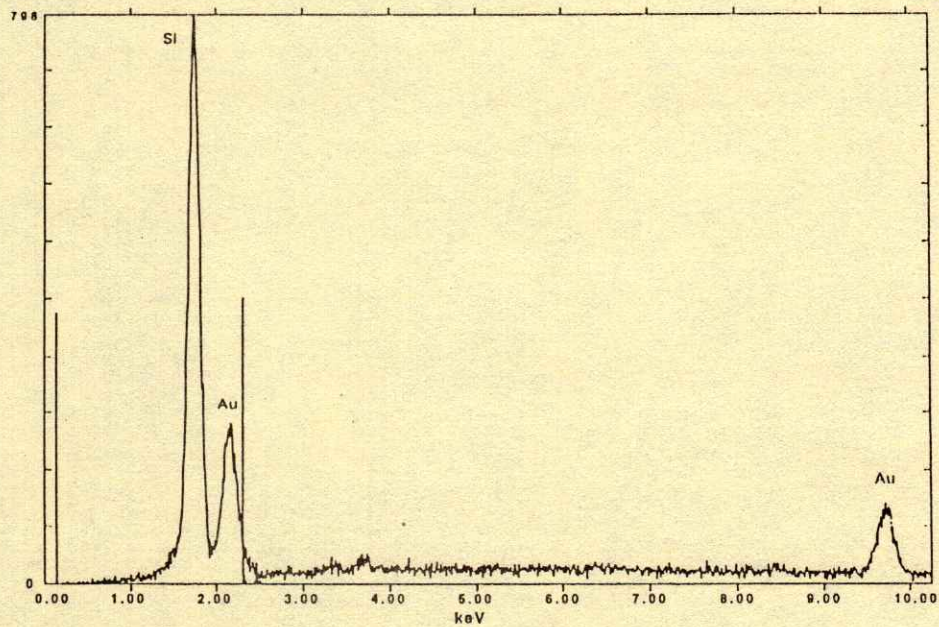


Figura 13. Detección de sílice por rayos-X, sugiriendo la presencia de sílice amorfa como agente cementante en la costra del suelo desnudo Coteau.

CONCLUSIONES

- La presencia de calcita se identificó por los rayos-X en las costras del suelo Coteau.
- Las costras de los suelos Olivier presentaron óxidos de hierro.
- La sílice se detectó como filamentos entre partículas en las costras de Gigger.
- En los suelos de México, se observó la presencia de yeso como agente cementante en Asogueros y Reforma.
- En las costras del suelo Reforma, se observaron cubiertas masivas de sílice y calcita.
- En Sandoval, además del yeso pedogénico, también se determinaron óxidos de hierro como cementantes.
- La morfología de los agentes cementantes ocurrió en dos formas. La primera como filamentos formados por sílice, óxidos de hierro y yeso entre partículas de suelo. La otra con cubiertas masivas de sílice, óxidos de hierro y calcita uniendo las partículas de suelo.

LITERATURA CITADA

- Agassi, M., J. Morin e I. Shainberg. 1985. Effect of raindrop impact energy and water salinity on rates of sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 186-190.
- Awahwal, N.K. y G.E. Thierstein. 1986. Soil crust and its impact on crop establishment: a review. *Soil Till. Res.* 5: 289-302.
- Ben-Hur, M. y J. Letey. 1989. Effect of polysaccharides, clay dispersion, and impact energy on water infiltration. *Soil Sci. Am. J.* 53: 233-238.
- Ben-Hur, M., R. Stern, A.J. van der Merwe e I. Shainberg. 1992. Slope and gypsum effects on infiltration and erodibility of dispersive and nondispersive soils. *Soil Sci. Am. J.* 56: 1571-1575.
- Brown, T.H. y R.L. Mahler. 1988. Effects of phosphorous and acidity levels of silica extracted from a Palouse silt loam. *Soil Sci. Am. J.* 51: 674-677.
- Chartres, C.J. y J.D. Fitzgerald. 1990. Properties of siliceous cements in some Australian soils and saprolites. *Dev. Soil Sci.* 19: 199-205.
- Chartres, C.J., J.M. Kirby y M. Raupach. 1990. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hard-setting soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1060-1067.
- Hallmark, C.T., L.P. Wilding y N.E. Smeck. 1982. Silicon. pp. 159-165. *In*: A.L. Page (ed.). *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties.* 2nd ed. Agronomy 9. Am. Soc. Agron. Madison, Wi.
- Laws, J.O. 1941. Measurements of fall-velocity of water-drops and raindrops. *Trans. Am. Geog. Union* 22: 709.
- Lindsay, W.L. 1979. *Chemical equilibria in soils.* Wiley-Interscience, New York, USA.
- Morin, J., S. Goldberg e I. Seniger. 1966. A rainfall simulator with a rotating disk. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 10: 74-79.
- Shainberg, I. y J. Letey. 1984. Effect of electrolyte concentration on the hydraulic properties of depositional crust. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1260-1263.
- Shaviv, A., I. Ravina y D. Zaslavsky. 1987. Application of soil conditioner solutions to soil columns to increase stability of aggregates. *Soil Sci. Am. J.* 51: 431-436.
- Soil Survey Staff. 1996. *Keys to soil taxonomy.* 7th ed. US Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. US Gov. Printing Off. Washington, DC.
- Stern, R., M. Ben-Hur e I. Shainberg. 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Sci.* 152: 455-462.
- Terry, E.R. y S.D. Nelson. 1986. Effects of polyacrylamide and irrigation method on soil physical properties. *Soil Sci.* 141: 317-320.
- Wallace, A. y A.M. Abouzamzam. 1986. Interaction of soil conditioner with other limiting factors to achieve high crop yields. *Soil Sci.* 141: 343-345.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. *Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning.* US Department of Agriculture, Agricultural Handbook 537.

HONGOS MICORRIZICOS ARBUSCULARES EN LA DINAMICA DE APARICION DE ESTOLONES Y NUTRICION DE PLANTAS DE FRESA CV. FERN OBTENIDAS POR CULTIVO *IN VITRO*

Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Runner Dynamics and Nutrition of Strawberry Plants cv. Fern Obtained from *In Vitro* Culture

A. Alarcón¹, R. Ferrera-Cerrato¹, M.C. González-Chávez¹ y A. Villegas-Monter²

RESUMEN

Plántulas de *Fragaria x annanassa* Duch. cv. Fern obtenidas por cultivo *in vitro* fueron inoculadas con tres especies de hongos micorrízicos del género *Glomus*, para evaluar su efecto en la promoción de la formación de estolones y plantas hija, así como en su concentración de nitrógeno (N) y fósforo (P). La inoculación produjo en promedio mayor número de estolones (2.6 planta⁻¹) y plantas hija (6.2 planta⁻¹) en la planta madre, mientras que en el testigo sólo se presentaron 1.4 estolones y 3.8 plantas hija planta⁻¹. Se observaron diferencias en volumen y peso seco radical de las plantas inoculadas, aunque significativamente menores que las de plantas testigo; mientras que no se presentaron diferencias significativas en el peso seco de la parte aérea. Se observó mayor relación raíz:parte aérea en plantas no inoculadas, la cual no fue significativa a la de plantas inoculadas. La concentración foliar de N y P fue mayor en plantas hijas de plantas madre inoculadas. Los hongos permitieron mayor capacidad de propagación de plantas madre y del mismo modo se observaron efectos significativos en el crecimiento y la nutrición de las plantas hija unidas a plantas madre inoculadas.

Palabras clave: *Fragaria x annanassa*, micropropagación, nutrición, efectividad micorrízica, *Glomus spp.*

SUMMARY

Fragaria x annanassa Duch. cv. Fern plantlets grown *in vitro* were inoculated with three arbuscular mycorrhizal

isolates belonging to the genus *Glomus* to evaluate their effect on promotion of runners and daughter plants and on nitrogen and phosphorus uptake. Mycorrhizal inoculation produced higher runner formation (2.6 mother plant⁻¹) and daughter plants (6.2 mother plant⁻¹) than the control plants (1.4 runners and 3.8 daughters per plant). Mycorrhizal inoculation significantly reduced root volume and root dry weight, but no differences in shoot dry weight were observed between control and inoculated plants. Root:shoot ratio in non-inoculated plants was higher than in mycorrhizal plants; however, no significant differences were observed among treatments. Daughter plants attached to mycorrhizal mother plants had higher concentrations of foliar nitrogen and phosphorus than those attached to control plants. Mycorrhizal fungi improved the mother plants' propagation capacity and better growth and N and P uptake in daughter plants.

Index words: *Fragaria x annanassa*, micropropagation, plant nutrition, mycorrhizal effectiveness, *Glomus spp.*

INTRODUCCION

En la actualidad, el cultivo de plantas *in vitro* ha sido utilizado para propagar cantidades mayores de ellas. Lovato *et al.* (1996) mencionaron que, en Europa, los volúmenes de producción de *in vitro*-plantas sobrepasaron los 132 millones, y se estima que a la fecha la producción ha tenido un incremento de 70%. En este contexto, uno de los principales problemas de las *in vitro*-plantas es la capacidad de supervivencia una vez que son establecidas en condiciones *ex-vitro*, debido principalmente a la condición mixotrófica en las que se han desarrollado, ya que viven a expensas de los nutrimentos presentes en el medio de cultivo (Davies, 1999)¹ y se necesita modificar la mixotrofia hacia la condición autotrófica. Como alternativa de manejo para la adaptación de las plantas a

¹ Area de Microbiología, Especialidad de Edafología, Instituto de Recursos Naturales.

² Laboratorio de Biotecnología, Especialidad de Fruticultura, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, 56230 Montecillo, Estado de México.

Recibido: Noviembre de 1999.

Aceptado: Enero de 2001.

¹Comunicación personal, Dr. Frederick T. Davies Jr. Department of Horticultural Sciences, Texas A&M University, College Station, 77843-2133, Texas, USA.

condiciones *ex-vitro*, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) podrían ser utilizados para incrementar su capacidad de supervivencia, crecimiento y aprovechamiento nutrimental (Rapparini *et al.*, 1994; Lovato *et al.*, 1996; Hernández-Meza *et al.*, 1998). De este modo, la producción de plantas micropropagadas puede ser mejorada con el establecimiento de la simbiosis micorrízica, que adicionalmente puede contribuir en el incremento de la calidad de las plantas con base en desarrollo, vigor y sanidad (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 1999; Manjarrez *et al.*, 2000). El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de HMA en la promoción del crecimiento de plantas madre de fresa cv. Fern, así como en la formación de estolones y crecimiento de plantas hija. Además, se evaluó el efecto de los hongos en la nutrición de nitrógeno y fósforo de las plantas hija unidas a plantas madre micorrizadas.

MATERIALES Y METODOS

Plantas de fresa (*Fragaria x annanassa* Duch. cv. Fern), con 30 días después de su enraizamiento *in vitro*, se transplantaron a contenedores de 250 cm³ con sustrato estéril. La inoculación de los endófitos *Glomus fasciculatum* (Gerdemann y Trappe), *G. etunicatum* (Becker y Gerdemann) y *G. aggregatum* (Schenck y Smith), cepas pertenecientes al banco de germoplasma del Area de Microbiología, se realizó al momento de trasplante. El inóculo consistió de 0.5 g de raíces de sorgo colonizadas en 79.0%, 61.0% y 87.0% por cada hongo, respectivamente. Se incluyeron también plantas sin inocular como tratamiento testigo. Después de 100 días de haber realizado la inoculación, las plantas se transplantaron a contenedores de 4 kg de capacidad. El riego a las plantas se aplicó con agua corriente cada tercer día, de acuerdo con el consumo de agua que éstas presentaron.

El sustrato utilizado consistió de una mezcla de suelo agrícola (Tequexquahuac, Edo. de México)-arena de río-agrolita en proporción 3:6:1 v/v, esterilizada en autoclave a 18 libras durante tres horas. El sustrato presentó la siguiente composición química por cada gramo de mezcla: 0.7 µg de N, 15 µg de P, 0.078 µg de K y 13.9 µg de materia orgánica y pH de 6.4.

Se utilizó un diseño completamente al azar considerando cuatro tratamientos con 10 repeticiones cada uno, con una planta en cada maceta como unidad experimental. Los tratamientos fueron los siguientes: 1) Plantas sin inocular, Testigo; 2) Plantas inoculadas con *Glomus fasciculatum*; 3) Plantas inoculadas con *Glomus*

etunicatum y 4) Plantas inoculadas con *Glomus aggregatum*. El experimento se estableció en invernadero: la temperatura fue 30 °C máxima y 15 °C mínima, controlada con calefactores automáticos y fotoperiodo de 12 h luz.

En el experimento se dio seguimiento a la dinámica de aparición de estolones en planta madre; esta prueba se realizó desde el primer trasplante hasta los 200 días después de la inoculación (ddi). También en este periodo de tiempo, se evaluó el peso seco de parte aérea y raíz de la planta madre, así como su volumen radical (mediante volumen desplazado en probeta de 200 mL) y relación raíz:parte aérea de la planta madre [gramos de raíz seca/gramos de parte aérea seca (Phavaphutanon *et al.*, 1996)]. En cuanto a plantas hija unidas a la planta madre, se evaluaron el número total y la materia seca a los 200 ddi. La colonización micorrízica arbuscular se determinó en raíces de plantas madre, siguiendo el método de clareo y tinción de raíces (Phillips y Hayman, 1970), y la frecuencia de la colonización se determinó con base en el método de Biermann y Linderman (1981) expresada en porcentaje. El número de esporas, en 100 g de suelo rizosférico, se evaluó mediante la técnica de Gerdemann y Nicolson (1963), en el sustrato de la planta madre. La concentración foliar de fósforo y nitrógeno se determinó en plantas madre y en plantas hija, mediante el método colorimétrico vanadato-molibdato y el procedimiento semi-microkjeldahl modificado para incluir nitratos, respectivamente (Etchevers, 1989). Los datos obtenidos se analizaron mediante el sistema de análisis estadístico SAS (SAS Institute, Inc., 1995). Se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) y determinación de los coeficientes de correlación de Pearson.

RESULTADOS

La adaptación de las plantas a condiciones *ex-vitro* fue de 100%, independientemente del tratamiento realizado. La inoculación en plantas micropropagadas de fresa con HMA favoreció la aparición temprana y el número de estolones en comparación con plantas madre no inoculadas (testigo). Las plantas inoculadas produjeron estolones a partir de los 35 días, mientras que en plantas testigo se observaron después de los 45 días. No obstante que *G. aggregatum* indujo más tempranamente la formación de estolones, se observó una detención del crecimiento de ellos, de modo que a los 200 días después de la inoculación, *G. fasciculatum* y *G. etunicatum* promovieron 2.6 estolones planta⁻¹ (Figura 1). En

contraste, las plantas testigo sólo presentaron, en promedio, 1.4 estolones planta⁻¹. La mayor capacidad de propagación observada en las plantas madre inoculadas puede ser ventajosa para el propagador de esta especie hortícola.

Plantas madre inoculadas con *Glomus aggregatum*, a pesar de haber presentado menor número de estolones, tuvieron mayor peso seco (5.2 g) mientras que el peso seco de estolones en plantas testigo fue de 1.2 g (datos no incluidos). La producción y el número de plantas hija se favorecieron significativamente por la inoculación. Plantas madre inoculadas con *G. fasciculatum* y *G. etunicatum* produjeron en promedio 6.2 plantas hija. En contraste, plantas madre testigo sólo tuvieron 3.8 plantas en promedio (Cuadro 1).

Aun cuando las plantas testigo produjeron menor número de estolones, no se observaron diferencias significativas con las plantas inoculadas en la longitud de los estolones (Cuadro 1), sin embargo, en plantas inoculadas con *G. fasciculatum* y *G. etunicatum*, la longitud de éstos fue numéricamente mayor que en los tratamientos restantes.

Las plantas madre inoculadas presentaron menor volumen y peso seco radical en comparación con plantas testigo (Cuadro 2). No se observaron diferencias entre tratamientos en el peso seco de la parte aérea (Cuadro 2). Se destaca el efecto de la micorriza arbuscular en la relación raíz:parte aérea de la planta madre, a pesar de no presentarse diferencias entre plantas testigo y plantas inoculadas. Las plantas con inoculación de HMA presentaron la tendencia de reducir el volumen y materia seca de la raíz en comparación con lo obtenido en plantas madre testigo (Cuadro 2). En este aspecto, el micelio

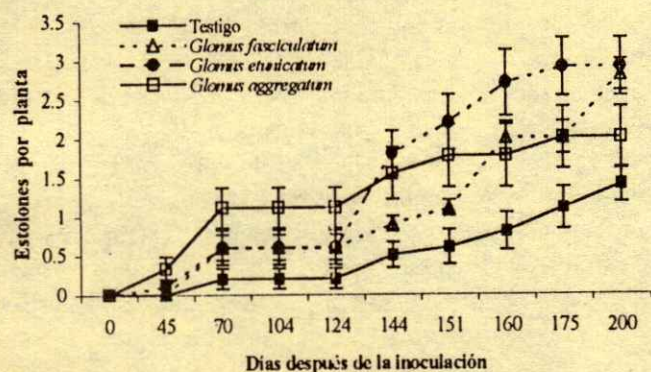


Figura 1. Número de estolones por planta madre de fresa cv. Fern por efecto de la inoculación con tres hongos micorrizicos arbusculares. n=10. I=Error estándar.

Cuadro 1. Efecto de la inoculación con tres hongos micorrizicos arbusculares en plantas de fresa cv. Fern, en el número y materia seca de plantas hija y longitud de estolones, a los 200 días.

Tratamiento	Número de plantas hija [†]	Peso seco de plantas hija [†]	Longitud de estolones [‡]
		g	cm
Testigo	3.8 b [†]	1.37 b	178.3 a
<i>Glomus fasciculatum</i>	6.5 a	2.12 a	244.2 a
<i>Glomus etunicatum</i>	6.5 a	2.44 a	257.4 a
<i>Glomus aggregatum</i>	5.5 ab	2.24 a	192.2 a
DMS	2.20	0.69	94.27

[†] Promedio correspondiente a plantas hija y estolones producidos por planta madre.

[‡] Valores con letras idénticas en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha=0.05$).

DMS = Diferencia mínima significativa. n=10.

fúngico pudo haber representado para la planta un mecanismo que facilitó la absorción nutrimental y generar así energía que se canalizó principalmente al incremento del crecimiento de la capacidad de propagación de las plantas. Este efecto puede relacionarse con el incremento observado en la materia seca de plantas hija procedentes de plantas madre inoculadas (Cuadro 1).

La nutrición por nitrógeno en planta madre fue favorecida por la inoculación de los hongos presentando en promedio 61.5 $\mu\text{g N g}^{-1}$ de materia seca foliar; sin embargo, no se observaron diferencias significativas con respecto a plantas testigo (Figura 2). Por otra parte, se observaron diferencias significativas en la concentración de nitrógeno en plantas hija procedentes de plantas madre inoculadas en comparación con aquéllas procedentes de plantas testigo. Se observó un incremento en la nutrición por nitrógeno de hasta 65% más, con respecto a plantas hija testigo (Figura 2). El follaje de plantas madre

Cuadro 2. Efecto de la inoculación de tres hongos micorrizicos arbusculares en plantas madre de fresa cv. Fern en diferentes variables de crecimiento, a los 200 días.

Tratamiento	Peso seco parte aérea	Volumen radical	Peso seco raíz	Relación raíz parte aérea
	g	cm ³	g	g g ⁻¹
Testigo	3.9 a [†]	44.0 a	3.00 a	0.65 a
<i>Glomus fasciculatum</i>	3.5 a	11.2 b	1.57 b	0.46 a
<i>Glomus etunicatum</i>	3.8 a	20.6 b	1.86 b	0.48 a
<i>Glomus aggregatum</i>	4.0 a	25.7 b	2.00 b	0.48 a
DMS	1.16	16.9	0.89	0.22

[†] Valores con letras idénticas en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha=0.05$).

DMS = Diferencia mínima significativa. n=10.

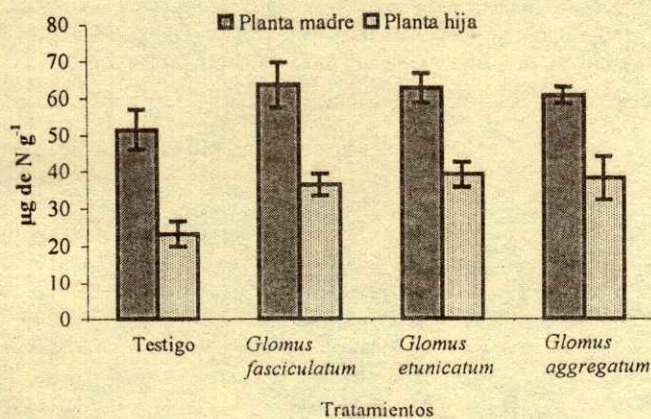


Figura 2. Concentración foliar de nitrógeno en plantas madre e hija de fresa cv. Fern por efecto de la inoculación con tres hongos micorrízicos arbusculares, a los 200 días. n=10. I=Error estándar.

inoculadas presentó incrementos significativos en la concentración de P. Este beneficio fue también significativo en el follaje de plantas hija unidas a plantas madre inoculadas (Figura 3). El beneficio en la absorción de fósforo por efecto de la simbiosis micorrízica, tanto en plantas madre como en plantas hija, fue de 122% y 146%, respectivamente, en comparación con las concentraciones determinadas para planta madre e hija del testigo (considerándolo como 100%).

La colonización micorrízica total fue relativamente alta en plantas madre inoculadas, pero el porcentaje de arbusculos fue bajo (Cuadro 3), excepto en raíces de plantas inoculadas con *G. aggregatum*. Se corroboró en plantas madre testigo la ausencia de estructuras fúngicas del tipo arbuscular. El mayor número de esporas se encontró en el sustrato de plantas inoculadas con *G. fasciculatum* en comparación con *G. etunicatum*. De acuerdo con el hábito de esporulación de *G. aggregatum*,

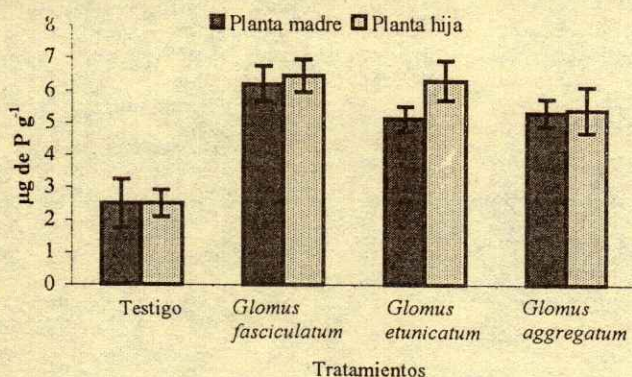


Figura 3. Concentración foliar de fósforo en plantas madre e hija de fresa cv. Fern, por efecto de la inoculación con tres hongos micorrízicos arbusculares, a los 200 días. n=10. I=Error estándar.

no se cuantificó el número de esporas de este hongo en el suelo; sin embargo, se determinó el porcentaje de esporas intrarradicales, el cual fue 50.6.

DISCUSION

La capacidad promotora del crecimiento de los HMA ha sido observada en plantas hortícolas obtenidas por cultivo *in vitro*. Se menciona que estos hongos permiten mayor capacidad de adaptabilidad y supervivencia de las plantas cuando éstas se exponen a condiciones *ex-vitro* (Hršelová *et al.*, 1989; Schubert *et al.*, 1992; Williams *et al.*, 1992; Rapparini *et al.*, 1994; Declerck *et al.*, 1995; Jaizme-Vega y Azcón, 1995). En este caso, el grado de adaptabilidad y supervivencia de las plantas de fresa fue de 100% en condiciones *ex-vitro*, incluyendo plantas con y sin inoculación de HMA.

Aun cuando el efecto de los hongos no fue significativo en la promoción del crecimiento de la parte aérea y acumulación de materia seca de la planta madre (Cuadro 2), se puede mencionar que la inoculación de estos endófitos promovió principalmente la formación de estolones y plantas hija como fue observado en otros cultivares de fresa (González y Ferrera-Cerrato, 1990; González *et al.*, 1992; Niemi y Vestberg, 1992). Este efecto puede estar relacionado con la capacidad de los HMA en la promoción de la síntesis de fitohormonas como las giberelinas y citocininas (Allen *et al.*, 1980, 1982; Barea, 1986; Smith y Gianinazzi-Pearson, 1988). El proceso de formación de estolones en fresa es respuesta a la inducción por ácido giberélico (Branzanti, 1989). En este estudio, uno de los posibles mecanismos de inducción de giberelinas pudo haber sido la presencia de hongos MA, ya que éstos promovieron que las plantas micorrizadas produjeran mayor número de estolones y plantas hija en comparación con el testigo. Esto sugiere la realización de investigaciones enfocadas a estudiar el balance fitohormonal de plantas en simbiosis micorrízica y corroborar el posible efecto mencionado.

El beneficio de los HMA en la nutrición en plantas madre permitió que las plantas hija producidas por ellas presentaran mayor concentración de N y P (Figuras 2 y 3), particularmente para P. Este efecto benéfico por los hongos es importante, si consideramos que las plantas no se fertilizaron durante el tiempo de investigación y su única fuente de obtención de nutrimentos fue la fertilidad basal del sustrato utilizado, la cual se consideró como baja (Vázquez y Bautista, 1993). Esta condición de fertilidad permitió a los HMA aprovechar con mayor eficiencia los

Cuadro 3. Colonización micorrizica en raíces de plantas madre de fresa cv. Fern, a los 200 días.

Tratamiento	Colonización total	Arbúsculos	Vesículas	Número de esporas 100 g de suelo
		%		
Testigo	0.0 b [†]	0.0 c	0.0 c	0.0
<i>Glomus fasciculatum</i>	75.9 a	6.0 b	19.6 b	107.2
<i>Glomus etunicatum</i>	62.5 a	3.6 b	1.0 c	39.6
<i>Glomus aggregatum</i>	72.1 a	31.3 a	40.0 a	nd
DMS	16.3	3.12	15.6	ne

[†] Valores con letras idénticas en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha=0.05$).

DMS = Diferencia mínima significativa. n=10. nd = no determinado en suelo; ne = no se realizó análisis estadístico para esta variable.

escasos nutrimentos del sustrato, haciéndolos disponibles y aprovechables para la planta madre y planta hija. Con esto se enfatiza la importancia del uso de endófitos micorrizicos en sustratos con limitada disponibilidad nutrimental para las plantas (Powell y Bagyaraj, 1984; Niemi y Vestberg, 1992). No obstante, la inoculación de HMA puede ser realizada en otros sustratos con mayor fertilidad; sin embargo, para que se exprese su beneficio, deben considerarse aspectos relacionados con el contenido de materia orgánica y fósforo, los cuales pueden repercutir en la funcionalidad y efectividad de los HMA (Gianinazzi *et al.*, 1990). Incluso pueden realizarse investigaciones relacionadas con el manejo de la simbiosis micorrizica y su interacción con fertilizantes para incrementar los rendimientos de los diversos cultivares comerciales de fresa.

Se ha mencionado que la efectividad de HMA no siempre está correlacionada con la capacidad infectiva de estos hongos (Abbott *et al.*, 1992; Bagyaraj, 1992). En este caso, los tres endófitos utilizados tuvieron alta colonización en la raíz del hospedante, por lo que se presentó buena compatibilidad entre ambos simbioses, mismos que favorecieron el crecimiento de plantas hija. Sin embargo, el porcentaje de arbúsculos fue significativamente mayor en *G. aggregatum* (31.3%), a pesar que produjo menos estolones a los 200 días, mientras que en *G. fasciculatum* y *G. etunicatum* estas estructuras fúngicas se observaron en menor proporción (6.0% y 3.6%, respectivamente). Anteriormente se mencionaba que el establecimiento de la interfase arbuscular en las células corticales del hospedante, era la principal responsable del intercambio bidireccional de nutrimentos entre ambos simbioses (Smith y Gianinazzi-Pearson, 1988; Smith y Read, 1997); este punto de vista ha cambiado actualmente, ya que se menciona que no sólo los arbúsculos realizan el intercambio nutrimental, sino que también las interfases de las hifas intercelulares contribuyen en forma significativa en la liberación de fósforo a las células hospedantes (Pfeffer *et al.*, 1998; Smith *et al.*, 1998), cuya demanda está en función de la

fenología de la planta hospedante (Abbott y Robson, 1991; Smith *et al.*, 1998).

Por lo anterior, se resalta la importancia de evaluar la colonización total del hongo incluyendo la frecuencia de arbúsculos e hifas intrarradicales, la cual, como se observa en el Cuadro 3, fue significativamente mayor que el porcentaje de arbúsculos encontrado. Con ello, los porcentajes de colonización total pueden correlacionarse con los contenidos de fósforo en follaje de plantas madre ($r=0.866$) y de plantas hija ($r=0.698$) (Cuadro 4).

Los tres endófitos pueden presentar buen potencial de uso en los procesos de producción de plantas de fresa con fines de propagación, promoviendo mayor formación de estolones y plantas hija con buen estado nutrimental de nitrógeno y fósforo (Cuadro 4). Además, estos hongos confieren a las plantas hija mayor crecimiento y acumulación de materia seca (Cuadro 1), aun cuando éstas permanezcan unidas a la planta madre. Mediante el uso de HMA pueden obtenerse incrementos significativos en el crecimiento y la producción de materia seca de la planta.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y nivel de significancia (P) entre diferentes variables de respuesta y por efecto de la colonización micorrizica.

Variable de estudio correlacionadas	r	P
Número de estolones <i>versus</i> Colonización micorrizica	0.266	0.271
Plantas hija <i>versus</i> Colonización micorrizica	0.319	0.183
Plantas hija <i>versus</i> Peso seco follaje de plantas madre	-0.307	0.860
Plantas hija <i>versus</i> Peso seco radical de plantas madre	-0.652	0.006*
Plantas hija <i>versus</i> Número de estolones N (Planta madre) <i>versus</i> Colonización micorrizica	0.953	0.0001*
P (Planta madre) <i>versus</i> Colonización micorrizica	0.507	0.022
N (Planta hija) <i>versus</i> Colonización micorrizica	0.866	0.0001*
P (Planta hija) <i>versus</i> Colonización micorrizica	0.570	0.0087*
N (Planta hija) <i>versus</i> Colonización micorrizica	0.698	0.0009*

* Correlaciones significativas.

efecto que se ha observado en otras investigaciones (Lovato *et al.*, 1992; Khanizadeh *et al.*, 1995; Barbosa y Ribeiro Da Silva, 1996; Estrada-Luna y Davies, 1999). Un aspecto interesante a resaltar es el efecto de los HMA en el hábito de crecimiento del sistema radical de fresa. Particularmente, la inoculación de estos hongos produjo disminución de la relación raíz:parte aérea; este efecto coincidió con lo reportado por Berta *et al.* (1994); Lovato *et al.* (1996) y Phavaphutanon *et al.* (1996), así como con lo reportado en la distribución del sistema radical micorrizado de algunas plantas (Hetrick, 1991; Lovato *et al.*, 1996).

Considerando lo anterior, las plantas de fresa micorrizadas, aunque no se observaron efectos significativos, presentaron la tendencia de asignar mayor acumulación de materia seca hacia la parte aérea en comparación con la materia seca producida en el sistema radical, como ha sido señalado por Davies *et al.* (2000). Este efecto puede atribuirse a que el micelio externo de los HMA propicia mayor exploración de volumen del suelo y aprovechamiento eficiente de los nutrientes disponibles en él. Por esta razón, es posible que el sistema radical de plantas micorrizadas no haya incrementado su volumen (Cuadro 2), mientras que en plantas testigo el aumento del volumen radical pudo haber sido consecuencia de la estrategia de la planta para absorber los nutrientes requeridos para su crecimiento y desarrollo. No obstante, el efecto benéfico de los HMA en las plantas, no sólo se reflejó en el mejoramiento del estado nutricional de plantas madre sino que también fue capaz de favorecer [tal vez de forma indirecta, con base en el coeficiente de correlación de Pearson determinado (Cuadro 4)] el balance fitohormonal necesario para la formación de estolones y plantas hija.

Como se aprecia en el Cuadro 2, los HMA no favorecieron la materia seca aérea producida en la planta madre, por lo que se sugiere que la simbiosis micorrízica permite a la planta madre ser capaz de regular su crecimiento y suministrar los nutrientes requeridos para los estolones y, por consiguiente, para las plantas hija, aun cuando estas variables no estuvieron correlacionadas en forma significativa con la colonización micorrízica (Cuadro 4). Se observó alta correlación entre la formación de estolones y plantas hija (Cuadro 4), de tal modo que la energía (fotoasimilados) ahorrada en el crecimiento de la raíz y acumulación de materia seca de la planta madre micorrizada se dirigió hacia la parte aérea y con ello favoreció la formación de estolones y plantas hija. En este caso, la correlación entre la formación de plantas hija con el peso seco radical de la planta madre fue negativa

(Cuadro 4), al igual que con el peso seco del follaje de la planta madre (Cuadro 4). La formación de estolones y plantas hija representa para la planta madre un sitio de demanda nutricional que impide el incremento de su crecimiento, ya que la planta madre debe dirigir buena parte de los fotoasimilados hacia los nuevos individuos (plantas hija) y favorecer con ello su crecimiento. Por ello, se sugiere la realización de estudios enfocados a la fisiología de plantas micorrizadas y determinar la relación fuente-demanda de plantas en simbiosis con HMA así como el estudio de las relaciones fitohormonales de una planta en simbiosis micorrízica arbuscular.

CONCLUSIONES

La inoculación de endófitos micorrízicos en plantas madre modificó favorablemente la formación de estolones y plantas hija. Además, mejoró la capacidad de aprovechamiento de nitrógeno y fósforo por las plantas hija unidas a plantas madre micorrizadas. La inoculación de HMA en plantas de fresa obtenidas por cultivo de tejidos tiene un importante papel en la propagación y nutrición de plantas de fresa cv. Fern. Esto puede ser ventajoso para el productor, ya que con el uso de estos endófitos en huertos de planta madre es posible mejorar la producción de plantas hija para uso en huertos comerciales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los Dres. Gabor J. Bethlenfalvay, Robert G. Linderman (USDA, Corvallis, Oregon) y Rodrigo Rodríguez-Kábana (Auburn University, Alabama), por su apoyo en la revisión y comentarios que permitieron el mejoramiento de este trabajo. Este trabajo fue parcialmente financiado por el Proyecto CONACYT 31947-B.

LITERATURA CITADA

- Abbott, L.K. y A.D. Robson. 1991. Factors influencing the occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhizas. *Agric. Ecosystems Environ.* 35: 121-150.
- Abbott, L.K., A.D. Robson y C. Gazey. 1992. Selection of inoculant vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Methods in Microbiology* 24: 1-21.
- Alarcón, A. y R. Ferrera-Cerrato. 1999. Manejo de la micorriza arbuscular en sistemas de propagación de plantas frutícolas. *Terra* 17: 179-191.

- Allen, M.F., T.S. Moore y M. Christensen. 1980. Phytohormone changes in *Bouteloua gracilis* infected by vesicular-arbuscular mycorrhizae. I. Cytokinin increases in the host plant. *Can. J. Bot.* 58: 371-374.
- Allen, M.F., T.S. Moore y M. Christensen. 1982. Phytohormone changes in *Bouteloua gracilis* infected by vesicular-arbuscular mycorrhizae. II. Altered levels of gibberellins-like substances and abscisic acid in the host plant. *Can. J. Bot.* 60: 468-471.
- Bagyaraj, D.J. 1992. Vesicular-arbuscular mycorrhiza: Application in agriculture. *Methods in Microbiology* 24: 359-373.
- Barbosa, M.R.M. y E.M. Ribeiro Da Silva. 1996. Effect of inoculation by arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of micropropagated pineapple plants. *Fruits* 51: 115-119.
- Barea, J.M. 1986. Importance of hormones and root exudates in mycorrhizal phenomena. pp. 177-187. *In: Gianinazzi-Pearson V. y S. Gianinazzi (eds.)*. Physiological and genetical aspects of mycorrhizae. INRA, Paris
- Berta, G., A. Trotta, J. Hooker, M. Munro, D. Atkinson, M. Giovanetti, S. Marini, F. Loreti, B. Tisserat, V. Gianinazzi-Pearson y S. Gianinazzi. 1994. The effects of arbuscular mycorrhizal infection on plant growth, root system, morphology and soluble protein content in *Prunus cerasifera* L. *Tree Physiol.* 15: 281-293.
- Biermann, B. y R.G. Linderman. 1981. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: A proposed method towards standardization. *New Phytol.* 97: 63-67.
- Branzanti, E.C. 1989. La fresa. Versión española. Ediciones Mundi Prensa, Madrid.
- Davies Jr, F.T., A.A. Estrada-Luna, T.L. Finnerty, J.N. Egilla y V. Olalde-Portugal. 2000. Applications of mycorrhizal fungi in plant propagation systems. pp. 129-146. *In: Alarcón, A. y R. Ferrera-Cerrato (eds.)*. Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular. Mundi Prensa, México.
- Declerck, S., C. Plenchette y D.G. Strullu. 1995. Mycorrhizal dependency of banana (*Musa acuminata*, AAA group) cultivar. *Plant Soil* 176: 183-187.
- Estrada-Luna, A.A. y F.T. Davies Jr. 1999. Effects of mycorrhizal fungi and phosphorus on growth and nutrient uptake of micropropagated prickly pear cactus plantlets (*Opuntia amyelaea* Tenore cv. Reyna). Abstracts of 96th International Conference of the American Society of Horticultural Science. *HortScience* 34 (3): 47.
- Etchevers B., J.D. 1989. Análisis químico de suelos y plantas. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.
- Gerdemann, J.W. y T.H. Nicolson. 1963. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soils by wet sieving and decanting. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 46: 235-244.
- Gianinazzi, S., A. Trouvelot y V. Gianinazzi-Pearson. 1990. Role and use of mycorrhizas in horticultural crop production. *Adv. Hort. Sci.* 4: 25-30.
- González C., M.C. y R. Ferrera-Cerrato. 1990. Effect of vesicular-arbuscular mycorrhizae on tissue culture-derived plantlets of strawberry. *HortScience* 25: 903-905.
- González C., M.C., R. Ferrera-Cerrato y A. Villegas M. 1992. La micorriza vesículo arbuscular y la aplicación de ácido giberélico en la propagación vegetativa de la fresa. *Agrociencia Serie Agua-Suelo-Clima* 3: 107-115.
- Hernández-Meza, V., M.C. González C., R. Ferrera-Cerrato y A. Villegas-Monter. 1998. Inoculación con hongos endomicorrizicos durante el establecimiento de portainjertos de cítricos micropropagados. pp. 231-240. *In: Zulueta, R.R., M.A. Escalona A. y D. Trejo A. (eds.)*. Avances de la Investigación Micorrizica en México. Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz. México.
- Hetrick, B.A.D. 1991. Mycorrhizas and root architecture. *Experientia* 47: 355-362.
- Hrselová, H., M. Gryndler y V. Vancura. 1989. Influence of inoculation with VA mycorrhizal fungus *Glomus* sp. on growth of strawberry and runner formation. *Agric. Ecosystems Environ.* 29: 193-197.
- Jaizme-Vega, M.C. y R. Azcón. 1995. Responses of some tropical and subtropical cultures to endomycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* 5: 213-217.
- Khanizadeh, S., C. Hamel, H. Kianmehr, D. Buszard y D.L. Smith. 1995. Effect of three vesicular-arbuscular mycorrhizae species and phosphorus on reproductive and vegetative growth of three strawberry cultivars. *J. Plant Nutr.* 18: 1073-1079.
- Lovato, P.E., J.P. Guillemín y S. Gianinazzi. 1992. Application of commercial arbuscular endomycorrhizal fungal inoculants to the establishment of micropropagated grapevine rootstock and pineapple plants. *Agronomie* 12: 873-880.
- Lovato, P.E., V. Gianinazzi-Pearson, A. Trouvelot y S. Gianinazzi. 1996. The state of art of mycorrhizas and micropropagation. *Adv. Hort. Sci.* 10: 46-52.
- Manjarrez, M.M.J., R. Ferrera-Cerrato y A. Alarcón. 2000. Biotecnología de la producción de inóculo micorrizico arbuscular y su control de calidad. pp. 238-250. *In: Alarcón, A. y R. Ferrera-Cerrato (eds.)*. Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular. Mundi Prensa, México.
- Niemi, M. y M. Vestberg. 1992. Inoculation of commercially grown strawberry with VA mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 144: 133-142.
- Pfeffer, P.E., Y. Schachar-Hill, G. Becard, D. Rollin y D.D. Douds. 1998. Nutrient transport and metabolism in the life cycle of arbuscular mycorrhizae as examined by NMR spectroscopy. *In: Flores, H.E. y J.P. Lynch (eds.)*. Radical biology: Advances and perspectives on the function of plant roots. *Am. Soc. Plant Physiologists*. Maryland, USA. Volume 18: 187-209.
- Phavaphutanon, L., F.T. Davies Jr. y S. Duray. 1996. Growth, root alteration, and nutrient uptake of neem tree (*Azadirachta indica* A. Juss) seedlings in response to vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus nutrition. *Int. Tree Crops J.* 9: 59-67.
- Phillips, J.M. y D.S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 55: 158-161.
- Powell, C.L. y D.J. Bagyaraj. 1984. Effect of mycorrhizal inoculation on the nursery production of blueberry cuttings- a note. *New Zealand J. Agric. Res.* 27: 467-471.
- Rapparini, F., R. Baraldi, G. Bertazza, B. Branzanti y S. Predieri. 1994. Vesicular-arbuscular mycorrhizal inoculation of micropropagated fruit trees. *J. Hort. Sci.* 69: 1101-1109.
- SAS Institute, Inc. 1995. SAS/STAT User's guide, version 6.03. SAS Institute, Cray, North Carolina.
- Schubert, A., C. Bodrino e I. Gribaudo. 1992. Vesicular-arbuscular mycorrhizal inoculation of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) micropropagated plants. *Agronomie* 12: 847-850.
- Smith, S.E. y V. Gianinazzi-Pearson. 1988. Physiological interactions between symbionts in vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 39: 221-244.

- Smith, S.E. y D.J. Read. 1997. Mycorrhizal symbiosis. Second Edition. Academic Press. Hortcourt Brace & Co. Publishers. London, UK.
- Smith, S.E., G.M. Rosewarne, S.M. Ayling, S. Dickson, D.P. Schachtman, S.J. Barker, R.J. Reid y F.A. Smith. 1998. Phosphate transfer between vesicular-arbuscular mycorrhizal symbionts: Insights from confocal microscopy, microphysiology, and molecular studies. *In*: Lynch J.P. y J. Deikman (eds.). Phosphorus in plant biology: Regulatory roles in molecular, cellular, organismic, and ecosystem processes. Am. Soc. Plant Physiologists. Maryland, USA. Volume 19: 111-123.
- Vázquez, A.A. y N. Bautista A. 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos, Chapingo, México.
- Williams, S.C.K., M. Vestberg, M. Uosukainen, J.C. Dodd y P. Jeffries. 1992. Effects of fertilizers and arbuscular mycorrhizal fungi on the *post-vitro* growth of micropropagated strawberry. *Agronomie* 12: 851-857.

ALTA Y BAJA HUMEDAD CON RIEGO POR GOTEO EN VID PARA MESA Y SU EFECTO EN LAS YEMAS FLORALES

Regular and High Application of Water with Drip Irrigation and its Effects on the Floral Buds of Table Grapes

Adán Fimbres Fontes¹, Gerardo Martínez Díaz y Manuel de Jesús Valenzuela Ruiz

RESUMEN

El agua es el principal problema en la región de Caborca, Sonora, ya que el acuífero se sobreexplota al doble de su recarga. El promedio de abatimiento en el nivel estático es 1 m por año. El cultivo más importante en la región es la vid, que ocupa una extensión de 14 000 ha. Uno de los problemas de la vid es la baja producción de yemas florales cuando ésta se maneja para uva de mesa y con riego por goteo. Por lo tanto, los objetivos de esta investigación fueron: determinar la cantidad óptima de aplicación de agua en uva de mesa, usando un sistema de riego por goteo, y la observación de los efectos de los diferentes porcentajes de evapotranspiración en la yemas florales del cultivar Thompson Seedless. Esta investigación se realizó durante 1990 y 1991 en el CECAB. Los cuatro tratamientos fueron: 120%, 166%, 206% y 250% de la evapotranspiración (ET) estimada en un tanque evaporímetro tipo A. Se usó un diseño experimental completamente al azar, con cinco repeticiones. Las variables que se midieron fueron: racimos número 1, peso promedio de tres racimos, diámetro de bayas, peso de 20 bayas, longitud de cañas, diámetro de la caña, número de entrenudos por caña, número de yemas florales, número de racimos por caña y peso de la poda. El análisis de los resultados indicó que los tratamientos que no tienen efecto en la disminución de las yemas florales fueron: 120% y 166% de ET, con láminas de agua aplicada de 117 y 156 cm, respectivamente. Sin embargo, el Tratamiento 120% de ET optimizó mejor el agua sin afectar el rendimiento.

Palabras clave: Irrigación, agua con alta presión, evapotranspiración, viñedo.

¹ Campo Experimental Caborca, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Apartado Postal 125, Caborca, Son., México.

Recibido: Mayo de 2000.
Aceptado: Noviembre de 2000.

SUMMARY

Water is the main problem in the region of Caborca, Sonora, Mexico, since the water table has been overexploited at a double rate of its replenishing capacity. The water depletion average of the aquifer in the static level is 1 m per year. The most important crop in the region is grapevine which occupies an extension of 14 000 ha. One of the problems of the vine is the low production of floral buds when this is handled for table grapes and under drip irrigation. Therefore, the objectives of this research were to determine the optimum quantity of water for table grapes, using a drip irrigation system, and the observation of the effects of the different percentages of evapotranspiration in the floral buds in the cultivar Thompson Seedless. This research was done during 1990 and 1991 in the CECAB. The four treatments were 120%, 166%, 206%, and 250% of evapotranspiration (ET) by measuring in an evaporation pan type A. A completely randomized block design was used with five replications. The variables were: clusters per plant number 1, average weight of three clusters, diameter of berries, weight of 20 berries, cane length, cane diameter, number of buds per cane, number of floral buds, number of clusters per cane, and pruning weight. The analysis of the results indicates that the Treatments 120% and 166% of ET had no effect on the decrease of floral buds, when 117 and 156 cm of water were applied. However, Treatment 120% ET optimized better the applied water without affecting yield.

Index words: Irrigation, high water pressure, evapotranspiration, grapevine.

INTRODUCCION

Caborca, Sonora, es uno de los lugares de la República Mexicana donde hay un fuerte abatimiento del manto acuífero que, en promedio, es de 1 m por año. Dicho abatimiento acumulado desde 1970 ha sido de 22.72 m (1998). La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos inició, desde 1983, un programa de restricciones tendientes a resolver el problema del

abatimiento del acuífero; además, de otras medidas como introducción de riego presurizado, frutales y medidores volumétricos (SARH, 1993).

El cultivo de la vid es uno de los más importantes en la región, tanto en superficie (14 000 ha), como en derrama económica. Debido al problema de baja fructibilidad en las yemas en el cultivo de la vid, cuando ésta se maneja para uva de mesa, además de las grandes láminas de agua que se le aplican, tanto en riego de goteo, como en gravedad, los esfuerzos se canalizaron hacia este cultivo. Carbonneau y Casteron (1979) indicaron que el número de inflorescencias disminuye cuando se mantiene la humedad de suelo cercana a 100% de la humedad aprovechable. Por otro lado, Lavee (1987) indicó que una alta cantidad de agua provoca un mayor desarrollo vegetativo, y éste se relaciona con el incremento de giberelinas endógenas, lo que provoca necrosis en las yemas florales. Williams (1991) indicó que, a menor cantidad de agua aplicada en postcosecha, se tiene una temprana brotación en la floración de primavera del próximo año.

Los objetivos de esta investigación fueron: determinar la cantidad óptima de aplicación de agua en uva de mesa usando un sistema de riego por goteo y la observación de los efectos de los diferentes porcentajes de evapotranspiración en la yemas florales del cultivar Thompson Seedless.

MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo se realizó en el campo experimental de la región de Caborca, durante 1990 y 1991, en plantas del cultivar Thompson Seedless preparado para uva de mesa. El trabajo se inició con la formación del bulbo de mojado y la aplicación de 200 L de agua planta⁻¹ según lo indican Fimbres y Lagarda (1981), ya que, en el caso de la región de Caborca, la

mayoría de las raíces de vid se localizaron a 110 y 150 cm de profundidad para plantas de nueve y 10 años, respectivamente (Fimbres, 1981). Por otro lado, Araujo (1986) indicó que, bajo riego por goteo, 78% de las raíces tienden a concentrarse en los primeros 50 cm.

Para preparar la uva para mesa se le aplicaron 20 mg L⁻¹ de ácido giberélico al cultivar Thompson Seedless para el alargamiento del racimo; en floración se hicieron dos aplicaciones para el raleo con 16 mg L⁻¹, se fertilizó con 70 kg de N ha⁻¹ y dos aspersiones con Dimetoato, para controlar thrips. Posterior al raleo, se aplicaron tres veces 50 mg L⁻¹ de ácido giberélico, para el crecimiento de la baya, en un período de cinco días. Se anilló en el amarre poco después de la última aplicación del ácido giberélico. No se aplicaron cianamida, fósforo ni potasio. Se utilizaron cuatro tratamientos con cinco repeticiones: 120%, 166%, 206% y 250% de la evapotranspiración estimada en un evaporímetro tipo A, como lo indican Ortiz y Raya (1982) y González (1985) en trabajos en el cultivar Perlette; así como Godoy (1987) en un trabajo en el cultivar Carignane. No se utilizaron porcentajes de evapotranspiración menores que 100%, ya que, en otros estudios previos en vid industrial, éstos resultaban insuficientes para abastecer a la planta de humedad, sobre todo cuando se trata de plantas en plena producción. Los coeficientes K en porcentaje que se aplicaron durante el ciclo fenológico del cultivo fueron los que indican Fimbres y Lagarda (1985) para el cultivar Thompson Seedless (Cuadro 1).

Se utilizaron dos tipos de goteros, rex netafim y del tipo espagueti; con éstos puede manejarse diferente gasto en el control de una sola válvula.

El 4 de diciembre de 1990, se realizó una evaluación de la cantidad de primordios florales por caña y yemas necrosadas, en dos cañas por unidad experimental. Las primeras 15 yemas basales de las cañas se disectaron bajo el microscopio estereoscópico y se clasificaron en tres

Cuadro 1. Coeficientes K en vid cultivar Thompson Seedless bajo riego por goteo. 1982 y 1985. CECAB-INIFAP.

Etapa fenológica	Período en días	Coefficiente K (%)
Yemas hinchadas	15 de febrero	Formación de bulbo de mojado (200 L planta ⁻¹)
Inicio de brotación	0 a 20	7.5
Desarrollo del brote	21 a 40	15.0
D. brote a formación de grano	41 a 60	52.5
Formación de grano a cosecha	61 a 163	80.0
Tres semanas después de cosecha	163 a 184	80.0
Postcosecha	184 a 240	7.5

grupos: fructíferas (con primordios de inflorescencia), vegetativa (sin primordios de inflorescencia) y necrosadas. En 1991, para medir el número de racimos por caña, con el fin de corroborar lo anterior, se escogieron tres plantas de seis cañas cada una, para lo cual se contó el número de racimos en cada caña, totalizando 18 cañas por unidad experimental. Esto no se hizo para 1990.

Las variables que se evaluaron durante el experimento fueron: racimos por planta tamaño número 1 (exportación), peso promedio de tres racimos, diámetro de bayas, peso de 20 bayas, longitud de cañas, diámetro de la caña, número de entrenudos por caña, número de yemas florales, racimos por caña y peso de la poda. De la parte media del racimo, se seleccionó el diámetro de bayas, así como el peso de 20 bayas; en el caso de peso de tres racimos se seleccionó al azar. Se midió el grado brix para determinar el momento de cosecha.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 2, se muestran las láminas de riego totales para cada uno de los tratamientos durante todo el ciclo de la vid cv. Thompson Seedless. 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 de agua entre el Tratamiento 120% y el Tratamiento 250% de ET es del doble, aproximadamente. La diferencia en láminas entre los dos años fue debido a que se presentaron altas temperaturas; por lo tanto, se tuvo que regar por más tiempo con el coeficiente más alto en postcosecha para 1991.

De acuerdo con el análisis de varianza (Cuadro 3), en 1990, se encontraron diferencias estadísticamente significativas para la variable racimos por planta tamaño número 1, en donde los Tratamientos 250%, 206% y 120% de la evapotranspiración (ET) tuvieron mayor cantidad de racimos tamaño número 1, mientras que el Tratamiento 166% de ET tuvo el menor valor. Sin

Cuadro 2. Riego por goteo y lámina total de agua para uva de mesa en vid cultivar Thompson Seedless. 1990 y 1991. CECAB-INIFAP.

Tratamiento (% ET)	Lámina de agua	
	1990	1991
	----- cm -----	
120	105.40	128.75
166	133.86	178.18
206	185.77	224.38
250	201.98	268.83

Cuadro 3. Riego por goteo y racimos por planta tamaño número 1 y peso promedio de tres racimos para uva de mesa en vid cultivar Thompson Seedless. 1990 y 1991. CECAB-INIFAP.

Tratamiento (% ET)	Racimo No. 1		Peso racimo	
	1990	1991	1990	1991
	----- g -----			
120	13.0 a	11.2 b	709.5 a	586 a
166	12.6 b	12.0 a	737.8 a	512 b
206	14.4 a	2.8 b	684.9 a	739 a
250	16.7 a	4.8 b	648.7 a	660 a

Las medias con igual letra en columna no tienen diferencia. Tukey (P < 0.05).

embargo, en 1991, los resultados fueron completamente diferentes para este parámetro, ya que los Tratamientos 206% y 250% tuvieron la menor cantidad de racimos tamaño número 1, mientras que los Tratamientos 166% y 120% tuvieron la mayor cantidad. Respecta al peso promedio de racimos, el análisis de varianza no reportó diferencias, en 1990. Sin embargo, en 1991, se observó una diferencia entre tratamientos, en donde los Tratamientos 250%, 206% y 120% fueron semejantes entre sí, con excepción del Tratamiento 166% de ET que fue estadísticamente menor (Cuadro 3).

Las láminas de agua fueron datos indirectos de la aplicación de los tratamientos por lo que no se les analizó.

Con base en el análisis de varianza, se encontró diferencia en la variable diámetro de la baya, en 1990; con los Tratamientos 250% y 206% se registraron mayores valores. Sin embargo, en 1991, todos los tratamientos fueron semejantes entre sí. Con respecto a longitud de bayas, se encontraron diferencias, en 1990; los Tratamientos 250% y 166% de ET produjeron mayor longitud de baya. Sin embargo, en 1991, todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales (Cuadro 4).

Para la variable peso de 20 bayas, el análisis de varianza de 1990 no reportó diferencias entre tratamientos mientras que, en 1991, las diferencias fueron significativas. Los tratamientos más sobresalientes fueron 120% y 166% de ET, mientras que con los Tratamientos 206% y 250% de ET se obtuvo el menor

Cuadro 4. Riego por goteo y diámetro y longitud de bayas para uva de mesa en vid cultivar Thompson Seedless. 1990 y 1991. CECAB-INIFAP

Tratamiento (% ET)	Diámetro bayas		Longitud bayas	
	1990	1991	1990	1991
	----- cm -----			
120	1.78 b	1.56 a	2.47 b	2.23 a
166	1.77 b	1.53 a	2.51 a	2.15 a
206	1.80 a	1.62 a	2.47 b	2.34 a
250	1.89 a	1.61 a	2.70 a	2.27 a

Las medias con igual letra en columna no tienen diferencia. Tukey (P > 0.05).

Cuadro 5. Riego por goteo y peso de 20 bayas y longitud de cañas para uva de mesa en vid cultivar Thompson Seedless. 1990 y 1991. CECAB-INIFAP.

Tratamiento (% ET)	Peso 20 Bayas		Longitud cañas	
	1990	1991	1990	1991
	----- g -----		----- m -----	
120	87.22 a	94.0 a	2.97 a	3.47 b
166	88.00 a	92.2 a	2.84 a	3.52 b
206	91.00 a	64.0 b	3.31 a	5.11 a
250	96.73 a	66.4 b	3.53 a	4.96 a

Las medias con igual letra en columna no tienen diferencia. Tukey ($P > 0.05$).

peso de bayas. El análisis de varianza no reportó diferencias entre tratamientos para la variable longitud de cañas, en 1990. Sin embargo, en 1991, sí se encontraron diferencias entre tratamientos; los Tratamientos 206% y 250% de ET fueron en los que se obtuvo mayor longitud de cañas, mientras que en los Tratamientos 120% y 166% de ET se tuvieron valores menores y semejantes (Cuadro 5).

Para la variable diámetro de la caña, en 1990, no hubo diferencias entre tratamientos. Sin embargo, en 1991, sí se encontró diferencia entre tratamientos, sobresaliendo los Tratamientos con 250%, 206% y 166% de ET. Con respecto a la variable entrenudos por caña, en 1991, se encontraron diferencias; en los Tratamientos con 250 y 206% de ET se registraron mayor cantidad de entrenudos (Cuadro 6).

Con base en el análisis de varianza de 1990, se encontraron diferencias entre tratamientos para la variable número de yemas florales por caña; con el Tratamiento 250% de ET hubo menor cantidad de yemas florales por caña; los demás tratamientos fueron semejantes entre sí. Sin embargo, el Tratamiento 120% de ET tuvo una ligera tendencia a incrementar su fructibilidad. En 1991, también se encontraron diferencias, así como en 1990, ya que los Tratamientos 206% y 250% de ET tuvieron el menor número de yemas fructíferas. Es posible que este decremento se deba al sombreado de las cañas (Rivera,

Cuadro 6. Riego por goteo y diámetro de caña y entrenudos por caña para uva de mesa en vid cultivar Thompson Seedless. 1990 y 1991. CECAB-INIFAP.

Tratamiento (% ET)	Diámetro caña		Entrenudos por caña	
	1990	1991	1990	1991
	----- cm -----			
120	1.05 a	1.03 b	31.3 a	47.20 b
166	1.07 a	1.08 a	29.9 a	49.23 b
206	1.15 a	1.14 a	33.2 a	60.41 a
250	1.33 a	1.16 a	33.8 a	58.31 a

Las medias con igual letra en columna no tienen diferencia. Tukey ($P > 0.05$).

Cuadro 7. Riego por goteo y número de yemas florales por caña y racimos por caña para uva de mesa en vid cultivar Thompson Seedless. 1990 y 1991. CECAB-INIFAP.

Tratamiento (% ET)	Yemas florales por caña		Racimos por caña
	1990	1991	1991
120	5.40 a	7.79 a	5.29 a
166	2.70 a	7.66 a	5.29 a
206	2.70 a	3.73 b	2.30 b
250	0.90 b	3.86 a	2.95 b

Las medias con igual letra en columna no tienen diferencia. Tukey ($P > 0.05$).

1982; Pérez y Kliewer, 1990). Dichos autores encontraron que, si la densidad de flujo de fotones fotosintéticos se reducía a 14%, la fructibilidad se reducía de 50% a 2%. Por otro lado, los Tratamientos 120% y 166% de ET tuvieron mayor número de yemas florales. Para 1990, se contaron las yemas florales en diciembre, mientras que, en 1991 se contaron en septiembre; a eso pueda deberse la diferencia entre años. Se encontraron también diferencias entre tratamientos para la variable número de racimos por caña; los Tratamientos 120% y 166% de ET propiciaron el mayor número de racimos por caña, mientras que los Tratamientos 206% y 250% de ET fueron estadísticamente diferentes al resto, y con el menor número de racimos por caña (Cuadro 7). Lo anterior concuerda con lo que concluye Fimbres (1989), quien indicó que es necesario afectar la evapotranspiración por 120%, y Grimes y Williams (1990) en el cv. Thompson Seedless.

En la Figura 1, se muestra que el número de primordios florales y racimos por caña se redujo con las láminas de agua más altas que correspondieron a los Tratamientos 206% y 250% de ET, las cuales fueron 185.77 y 201.98 cm, respectivamente; mientras que el número de yemas necrosadas se incrementó en estos mismos tratamientos; con respecto a otras causas de necrosis en las yemas fructíferas, Ziv *et al.* (1990) indicaron, además, que el uso del ácido giberélico causó necrosis en las yemas en vid cultivar Queen.

Cabe señalar que los Tratamientos 120% y 166%, con láminas de agua de 105 y 133 cm, respectivamente, tuvieron la mayor cantidad de primordios florales y el menor número de yemas necrosadas.

No se encontró diferencia entre tratamientos, en 1990, para la variable peso de la poda. Sin embargo, en 1991, los resultados fueron diferentes entre tratamientos; los Tratamientos 206% y 250% fueron los de mayor peso de poda (Cuadro 8).

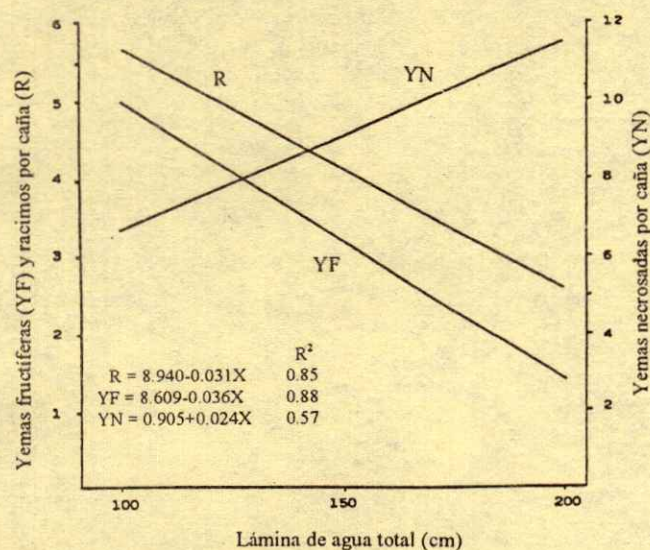


Figura 1. Riego por goteo y efecto de la lámina de riego en el necrosamiento de yemas y fructificación en vid cultivar Thompson Seedless para uva de mesa. 1990 y 1991. CECAB-CIFAPSON-INIFAP.

Cuadro 8. Riego por goteo y peso de la poda para uva de mesa en vid cv. Thompson Seedless. 1990 y 1991. CECAB-INIFAP.

Tratamiento (% ET)	Peso de la poda	
	1990	1991
120	3.38 a	3.39 b
166	3.55 a	3.44 b
206	3.64 a	4.52 a
250	3.93 a	4.09 ab

Las medias con igual letra en columna no tienen diferencia. Tukey ($P > 0.05$).

CONCLUSIONES

El análisis de los resultados obtenidos indicó que la planta de vid se ve seriamente afectada en la reducción de las yemas florales cuando se le aplica exceso de agua, es decir, láminas de 205 y 235 cm. Cuando esto sucede hay un incremento en el crecimiento de las cañas, lo cual finalmente trae como consecuencia reducción en el rendimiento de uva. Los tratamientos que no tuvieron efecto en la disminución de las yemas florales fueron los Tratamientos 120% y 166% de ET, con láminas de agua aplicada de 117 y 156 cm, respectivamente. Sin embargo, el Tratamiento 120% de ET fue el que mejor optimizó el agua sin afectar el rendimiento.

AGRADECIMIENTO

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

LITERATURA CITADA

- Araujo, F.J. 1986. The response of three year old Thompson Seedless grapevines to drip and furrow irrigation in the San Joaquin Valley. M.Sc Thesis. University of California, Davis, CA.
- Carbonneau, A. y P. Casteron. 1979. Irrigation depressing affect floral initiation of cabernet sauvignon grapevines in Bordeaux area. Am. J. Enol. Vitic. 30: 3-7.
- Fimbres F., A. 1981. Distribución radicular en plantas de vid en diferentes edades del cv. Thompson Seedless en la región de Caborca, Sonora. Tesis profesional. U.A.B.C. Ej. Nuevo León. Mexicali, B.C. Avances de la Investigación, No. 10. P-V. SARH-CIANO-INIFAP. P. 197.
- Fimbres F., A. 1989. Optimización del riego por goteo en vid para uva de mesa en el cv. Perlette en base a porcentajes de evapotranspiración. p. 193. In: Memorias del XXII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México.
- Fimbres F., A. y R. Lagarda M. 1981. Evaluación de 4 tratamientos de riego por goteo en vid en la región de Caborca, Sonora. Reporte técnico del CAECAB-CIANO-INIA-SARH. p. 6-7.
- Fimbres F., A. y R. Lagarda M. 1985. Optimización del sistema de riego por goteo en vid *Vitis vinifera* L. en la región de Caborca. Agricultura Técnica en México II-I: 51-67
- Godoy A., C. 1987. Aplicación de riego por goteo en vid y nogal. Folleto Técnico 3. SARH-INIFAP. CAE de la región Lagunera. Matamoros, Coah., México.
- Gonzalez G., J.A. 1985. Evaluación del consumo de agua con riego por goteo en 3 cultivares de vid en la región de Caborca. Reporte Técnico del CAECAB-CIANO-SARH-INIFAP.
- Grimes, D.W. y E.L. Williams. 1990. Irrigation effects on plant water relations and productivity of Thompson Seedless grapevines. Crop Sci. 30: 255-260.
- Lavee, S. 1987. Necrosis in grapevine buds (*Vitis vinifera* cv. Queen of vineyard). III Endogenous gibberelin levels in leaves and buds. Vitis 26: 225-230.
- Ortiz M., J., y A. Raya S. 1982. Evaluación del riego por goteo en base a datos de evaporación en tanque evaporimetro tipo A en vid cv. Perlette Avances de la Investigación. Núm. 12 P-V. CAECH-CIANO-INIFAP.
- Pérez, J. y M.W. Kliewer. 1990. Effect of shading on bud necrosis and bud fruitfulness of Thompson Seedless grapevines. Am. J. Enol. Vitic. 41: 168-175.
- Rivera O., C. 1982. Evaluación de la fructificación de las yemas de vid, cv. Thompson Seedless (1er año). p. 180 In: Avances de la Investigación 12. P-V. CIANO-SARH.
- 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.

Williams, E.L. 1991. Postharvest irrigation influences budbreak of Perlette grapevines. HortScience 26: 1081.

Ziv, M., H. Melamud, Z. Bernstein y S. Lavee. 1981. Necrosis in grapevine buds (*Vitis vinifera* cv. Queen of Vineyard) II. Effect of gibberellic acid (GA3) application. Vitis 20: 105-114.

EFECTO DE CUBIERTAS, RIEGO Y FERTILIZACION FOLIAR EN EL DESARROLLO RADICAL DE MANZANO

Effect of Mulching, Irrigation and Foliar Fertilization upon Apple Root Development

Armando Ibáñez Martínez¹, A. Enrique Becerril Román², Alberto Castillo Morales³,
Rafael A. Parra Quezada⁴ y Cándido López Castañeda²

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo consistió en el estudio de los efectos de disponibilidad hídrica (riego y temporal), cubiertas (estiércol, pasto y suelo desnudo) y fertilización foliar (con y sin aplicación) en el desarrollo radical de árboles de manzano 'Agua Nueva II'. El vigor del árbol, las cubiertas orgánicas y el riego promovieron el mayor desarrollo radical, de 7 a 52% y de 20 a 67% de incremento en longitud y densidad de raíces, respectivamente, mismo que se localizó en los primeros 30 cm de profundidad, a 30 cm del tronco y en la parte sur y norte de árboles manejados con cubierta de pasto, seguidos por aquellos con cubierta de estiércol. La fertilización foliar no afectó el desarrollo radical.

Palabras clave: 'Agua Nueva II', humedad del suelo, raíz.

SUMMARY

The effects of water availability (irrigation and rainfed), mulching (manure, grass and bare soil), and foliar fertilization (with and without spraying) in the root development of apple trees 'Agua Nueva II' were studied. Tree vigor, mulching, and irrigation caused the highest root development, 7 to 52% and 20 to 67% increases in length and root density, respectively. Roots were found mainly in the first 30 cm, at 30 cm from the trunk, and on the south and north

sides of the trees grown with grass and manure mulching. Foliar fertilization did not affect root development.

Index words: 'Agua Nueva II', soil moisture, root.

INTRODUCCION

La distribución del sistema radical de las plantas en el suelo juega un papel importante en dos de las funciones primarias del mismo, la absorción y transporte de agua y nutrientes y la de anclaje, por lo que si su desarrollo es afectado, producto de la reducción implícita de volumen explorado de suelo, se limita la absorción de agua, se reduce el intercambio gaseoso y se genera la posibilidad de deficiencia y/o desbalance nutricional. Además, se afectan otras funciones del sistema radical, como son síntesis de compuestos y almacenamiento de reservas, lo cual trae como consecuencia la disminución del crecimiento y producción de la planta (Miller, 1986). La longitud y densidad de raíces disminuye conforme aumenta la profundidad y compactación del suelo, que provoca problemas de abastecimiento de agua y nutricional, que se reflejan en la reducción del desarrollo de la planta (Williamson *et al.*, 1992). La aparición de raíces blancas está inversamente relacionada con la presencia de frutos, deteniéndose su crecimiento antes de la apertura de yemas y reiniciando después de la cosecha, además de no correlacionarse con la disponibilidad de agua, lo cual se atribuye a la mayor penetración del sistema radical (Glenn y Welker, 1993).

El desarrollo de una planta depende de la interrelación raíz-parte aérea, en la cual existe un balance antagónico: cuando crece una parte, la otra está en letargo parcial o total. La distribución radical depende del crecimiento de raíces nuevas; en durazno ocurre después del crecimiento de brotes y antes de la abscisión de las hojas a mediados de octubre. El doble máximo de crecimiento radical observado es debido a

¹ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 73800 San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla.

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

³ Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, 09340 México, DF.

⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 31500 Cd. Cuauhtémoc, Chih.

Recibido: Diciembre de 1999.

Aceptado: Diciembre de 2000.

una disminución en la producción de nuevas raíces durante los meses de verano, por presentarse el mayor crecimiento de los brotes en la parte aérea (Williamson y Coston, 1989). En manzano 'Cox' sobre M9, la máxima longitud de raíces nuevas ocurre después del periodo de máxima elongación de brotes (Atkinson, 1983).

Por otro lado, la distribución radical es afectada por el ambiente. La disminución de la humedad en el suelo causa que las raíces más cercanas a la superficie estén expuestas a condiciones más secas, por lo que se deshidratan más rápido con respecto a las raíces más profundas, donde el suelo contiene mayor humedad, enviando señales a los órganos aéreos de la planta vía xilema; esta señal de naturaleza bioquímica actúa para que las necesidades de agua se reduzcan, controlando la apertura estomatal, la tasa de transpiración, el contenido de agua en la hoja y el crecimiento. La mayoría de los cultivos frutícolas son exigentes en agua, por lo que en condiciones áridas y semiáridas es indispensable el uso del riego; en la mayoría de las regiones con mucha humedad, la precipitación provee el agua necesaria, pero si llega a faltar se presenta un estrés hídrico que provoca efectos dañinos en hojas, tallos y otras partes de la planta, los cuales se manifiestan en la calidad de los frutos y desarrollo de los árboles (Mills *et al.*, 1994).

Las prácticas que ayuden a conservar y mantener mayor disponibilidad de agua, tal es el caso de cubiertas, beneficiarán el desarrollo radical y de la planta en general. En manzano, cuando se utilizaron cubiertas como manejo de suelo, se encontraron altas cantidades de raíces fibrosas ramificadas (Coker, 1959), de igual forma con la cubierta de *Muhlenbergia schreberi* J.F. que propició alta densidad radical

superficial en durazno (Parker y Meyer, 1996). Las cubiertas orgánicas muertas (estiércol, paja, abonos verdes, composta, pastos, hierba cortada, desechos de caña de azúcar, viruta, aserrín, etc.) disminuyen las pérdidas de agua por evaporación, conservan la humedad en el suelo por un mayor periodo, aumentan el contenido de materia orgánica y mejoran la estructura del suelo.

Un complemento nutricional que ha causado mayor desarrollo radical son las aplicaciones de fertilizante foliar, y esta forma de adición de nutrimentos es más eficiente cuando las raíces se encuentran en condiciones desfavorables para obtener suficientes nutrimentos del suelo. Esta situación se presenta cuando el suelo no es fértil o tiene características físico-químicas que limitan la disponibilidad nutrimental, existen bajas temperaturas, falta de humedad y tiene un sistema radical dañado o restringido (Marschner, 1986). Con base en lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo determinar los efectos de humedad del suelo, cubiertas orgánicas y fertilización foliar en el desarrollo y la distribución radical de manzano 'Agua Nueva II'.

MATERIALES Y METODOS

Localización y Condiciones del Sitio Experimental

El presente trabajo se llevó a cabo de octubre de 1997 a septiembre de 1998 en el huerto frutícola del Colegio de Postgraduados, ubicado en Montecillo, Texcoco, México, el cual se localiza a 19°29' latitud norte, 98°54' longitud oeste y a una altitud de 2250 m. En 1997, las temperaturas más altas se presentaron entre junio y septiembre (20 a 25 °C), en tanto que las

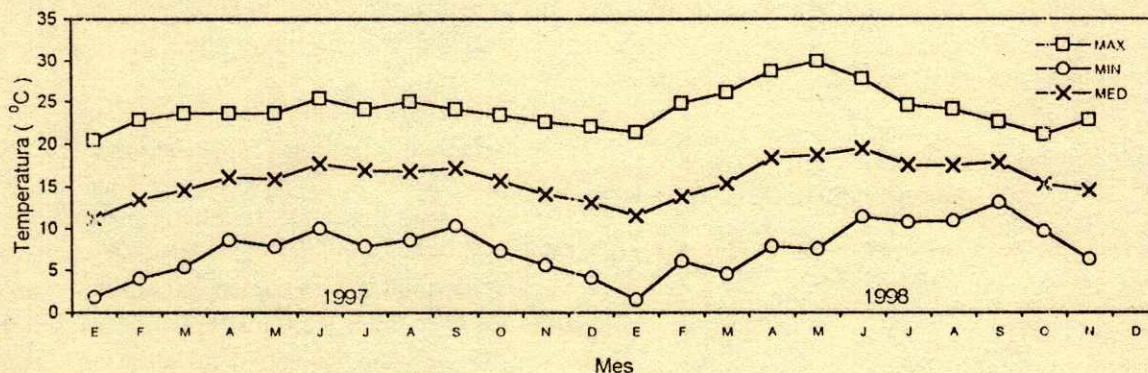


Figura 1. Promedio mensual de temperatura máxima, mínima y media ambiente durante 1997 y 1998 en Montecillo, Texcoco, México.

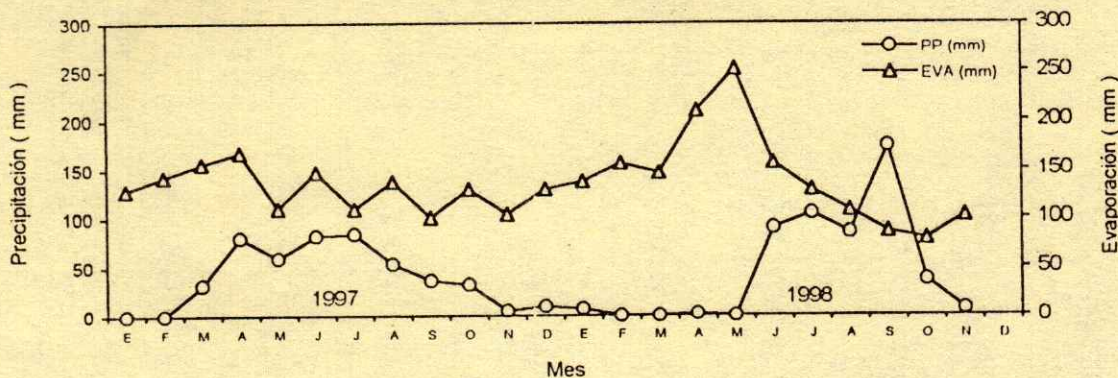


Figura 2. Variación de precipitación (PP) y evaporación (EVA) mensual durante 1997 y 1998 en Montecillo, Texcoco, México.

temperaturas más bajas en enero, febrero y diciembre (2 a 5 °C), respectivamente; en 1998, las más altas temperaturas se registraron en mayo y junio (28 a 30 °C) y la más baja en enero (1.5 °C) (Figura 1). La precipitación en 1997 fue de 473.3 mm totales, inferior a la evaporación durante todo el año; en 1998 la precipitación total fue de 505.9 mm, y se registró en junio, julio y septiembre la mayor cantidad de lluvia, la cual llegó a superar la evaporación en septiembre (Figura 2).

La variación de temperatura en el suelo estuvo afectada por el comportamiento de la temperatura del medio ambiente (Figura 3). En 1997 el ascenso de la temperatura del suelo en todas las profundidades inició desde enero y en junio se registraron las temperaturas más altas; de igual forma para 1998, las temperaturas mínimas se registraron en enero, y en abril y mayo las máximas, aunque a 30 cm de profundidad fue en junio.

A 30 cm los cambios de temperatura fueron menores que a 15 cm (Figura 3).

Se midió la temperatura del suelo en cada uno de los tratamientos (cubierta-estiercol, cubierta-pasto y suelo desnudo en condiciones de riego y temporal), para ello se colocaron dos tubos de PVC a 15 y 30 cm de profundidad, donde se introducía un geotermómetro, para tal efecto se utilizaron tubos que estaban a 60 cm del tronco en la parte sur; el registro se realizó una vez por semana de 7 a 8 y de 14 a 15 h de abril a octubre de 1998 (Figuras 4 y 5). De igual forma, en todos los tratamientos indicados también se hizo la medición de humedad mediante el método Gravimétrico, determinación que se llevó a cabo en los primeros 45 cm de profundidad, una vez por semana, de abril a agosto de 1998; para toma de las muestras de suelo se utilizó una barrena tipo Veihmeyer; en los casos de tratamientos con riego, las muestras se tomaron antes de aplicarlo (Figuras 6 y 7).

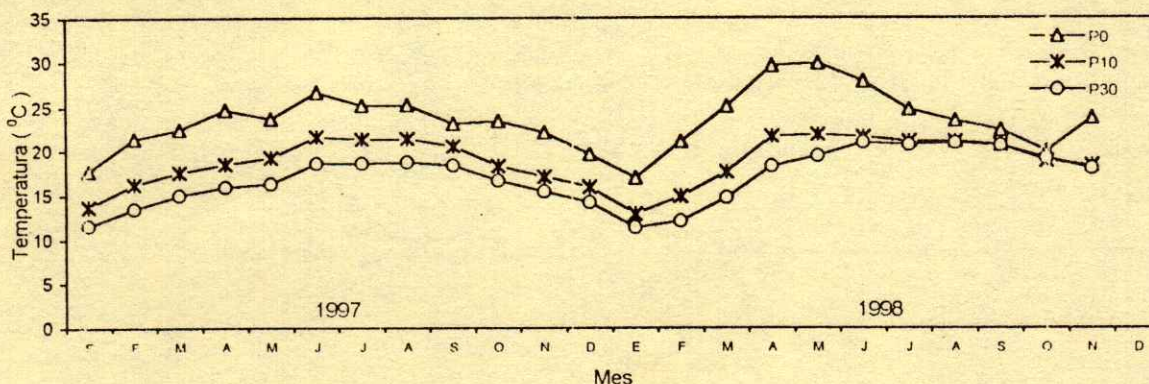


Figura 3. Variación en la temperatura media mensual del suelo desnudo a 0 (P0), 10 (P10) y 30 cm (P30) de profundidad, durante 1997 y 1998 en Montecillo, Texcoco, México.

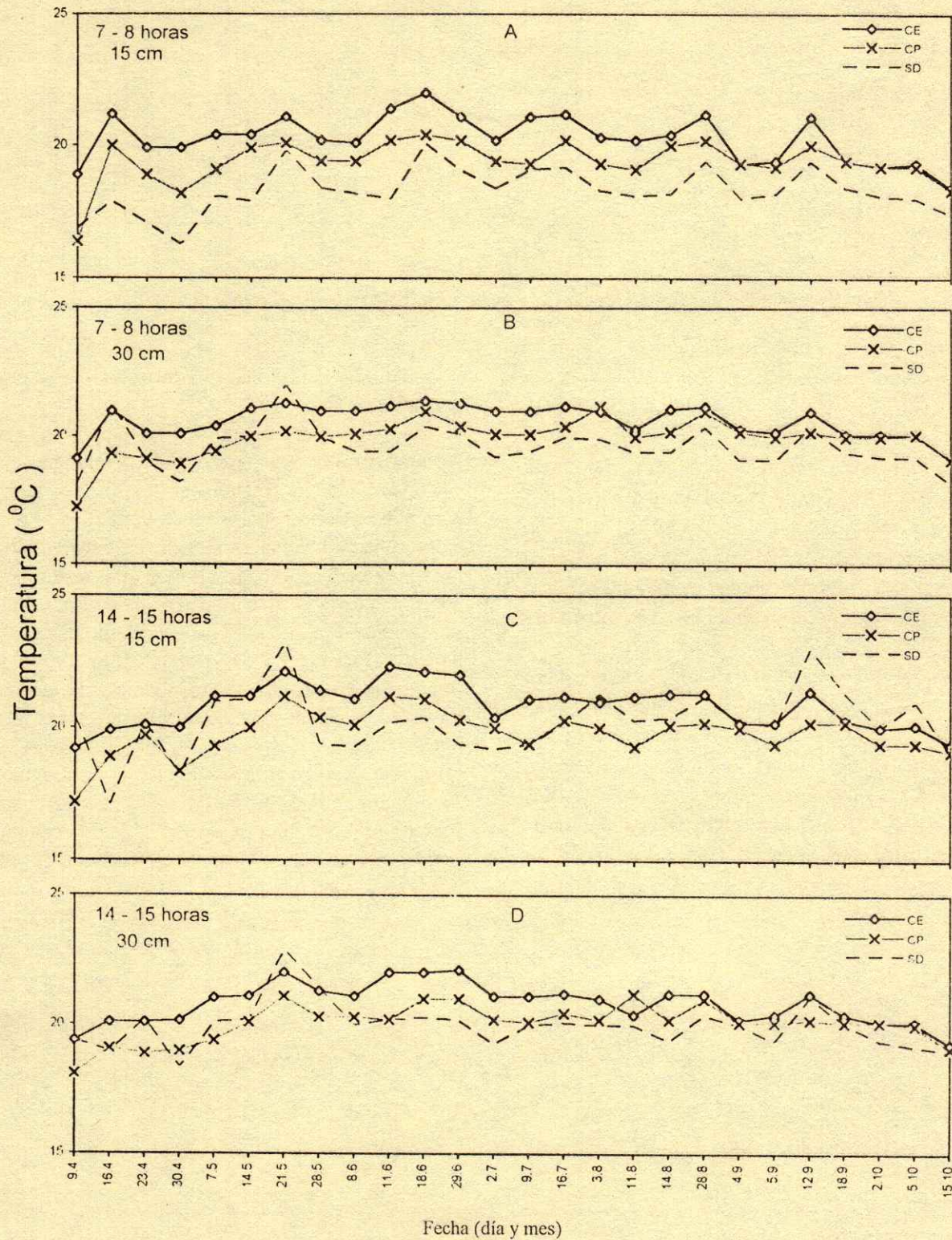


Figura 4. Temperatura del suelo en condiciones de riego, cubierta-estiércol (CE), cubierta-pasto (CP) y suelo desnudo (SD) en dos horarios y dos profundidades, durante 1998.

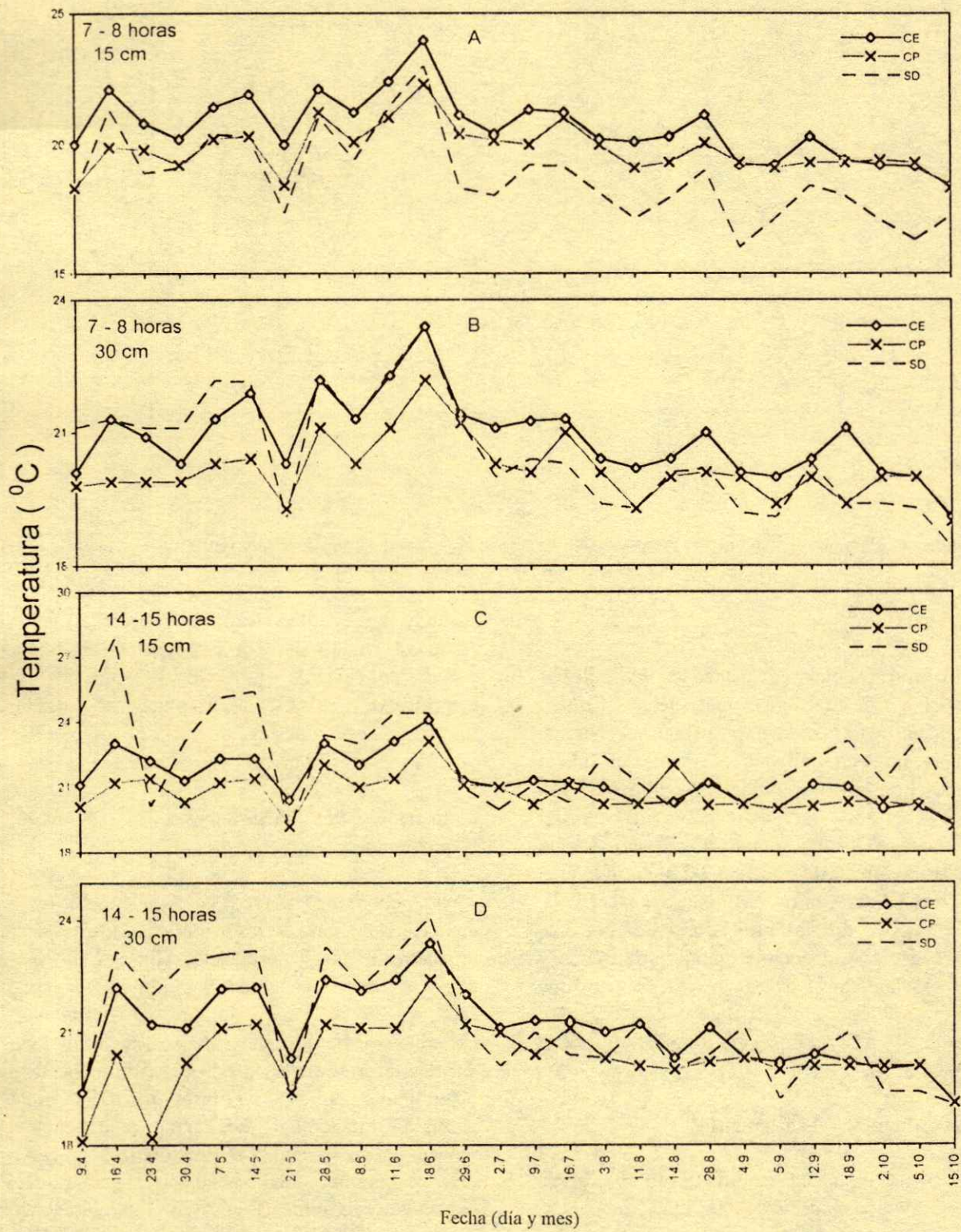


Figura 5. Temperatura del suelo en condiciones de temporal, cubierta-estiércol (CE), cubierta-pasto (CP) y suelo desnudo (SD) en dos horarios y dos profundidades, durante 1998.

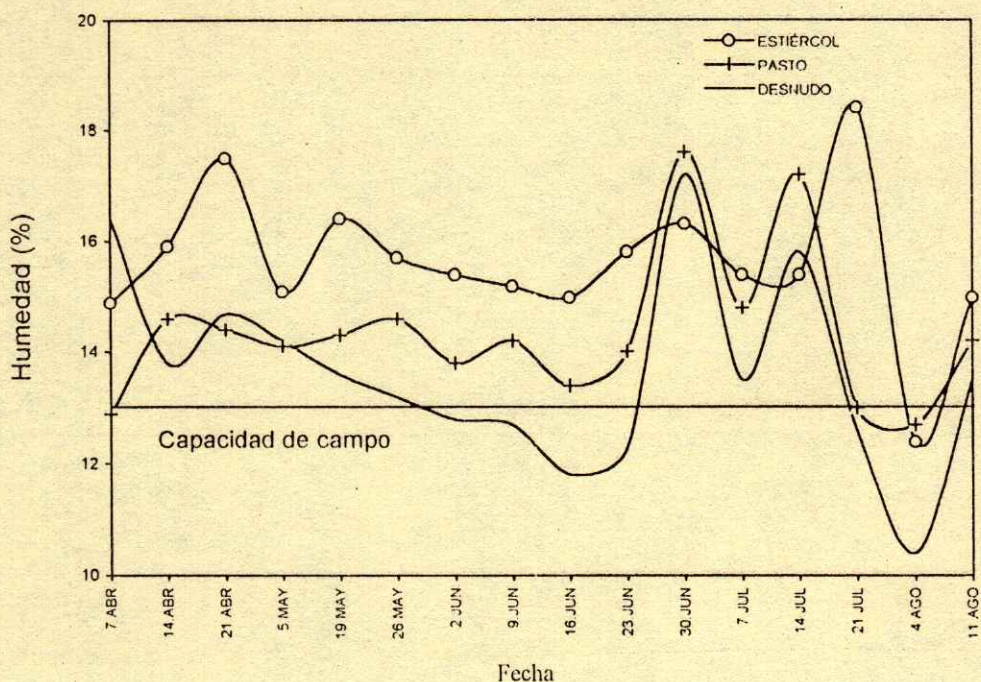


Figura 6. Porcentaje de humedad promedio (0 a 45 cm) en el suelo con cubierta de estiércol, cubierta de pasto y suelo desnudo en condiciones de riego, durante 1998.

Material Vegetativo

Se utilizaron árboles de manzano del cultivar 'Agua Nueva II', el cual es un mutante de 'Golden Delicious' identificado en la región de Agua Nueva, Coahuila. Es un material que requiere de 400 a 500 Unidades Frío para su brotación y floración. Son árboles de ocho años de edad que se encuentran injertados sobre MM-106, plantados en un sistema semi-intensivo a 2 m entre árboles y 2.5 m entre hileras y conducidos en líder central (Miranda *et al.*, 1997). La selección de los árboles utilizados en el presente estudio se realizó con base en el diámetro de tronco y los árboles se clasificaron en tres grupos de vigor que constituyeron los bloques (Vigor Bajo: 5.75 a 6.90 cm; Vigor Intermedio: 6.95 a 7.50 cm; Vigor Alto: 7.60 a 8.50 cm).

Diseño Experimental y Tratamientos

Para análisis de datos se utilizó un diseño de parcelas subdivididas en arreglo bloques completamente al azar con tres repeticiones (bloques), con los siguientes factores y niveles de estudio: a) humedad del

suelo (riego y temporal); b) cubiertas del suelo (estiércol, pasto y desnudo); c) fertilización foliar (con y sin aplicación); y d) distribución de raíces, identificada por las combinaciones entre orientación (norte, sur, este y oeste), distancia al tronco (30, 60 y 90 cm) y profundidad (15, 30 y 45 cm).

Aplicación de Tratamientos y Manejo del Experimento

Las cubiertas (estiércol y pasto) se colocaron antes de la caída de hojas de los árboles en 1997, y se abarcó un metro al sur y norte del árbol, por un metro de ancho (2 m²); las cubiertas se mantuvieron con un espesor de 15 cm durante el desarrollo del experimento. El riego se realizó en forma rodada, por canales dirigidos a los árboles correspondientes; para determinar su aplicación se instalaron tres tensiómetros a una profundidad de 20 cm en cada condición de manejo del suelo; con la aplicación de riego cada ocho días se mantuvo una condición cercana o mayor a capacidad de campo (Figura 6). Las aplicaciones de fertilizante foliar se realizaron cada quince días con bomba motorizada, a partir de un mes después de la

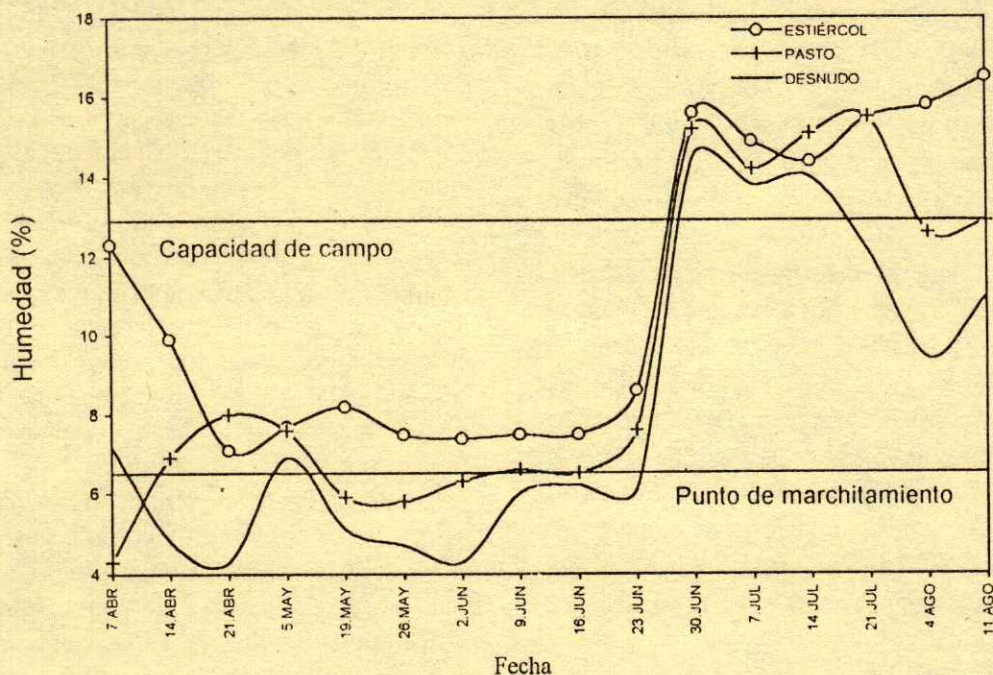


Figura 7. Porcentaje de humedad promedio (0 a 45 cm) en el suelo con cubierta de estiércol, cubierta de pasto y suelo desnudo en condiciones de temporal, durante 1998.

brotación hasta producción, utilizando 5 g de urea 'loby' sin biuret más 5 mL de 'Bayfolan' y 0.5 mL de adherente Agral-plus por litro de agua.

Se mantuvo el sistema de poda en líder central, misma que se llevó a efecto a finales de febrero de 1998. Se realizó encalado de troncos a principios de marzo de 1998 en forma manual. El lote estuvo libre de malezas y la cubierta viva (pasto) entre hileras de árboles se podó mecánicamente. El 4 y 5 de marzo de 1998 se aplicaron estimuladores de brotación en todo el huerto [Thidiazuron (TDZ) al 0.2% + Citrolina emulsificada al 0.4%], dadas las condiciones de acumulación deficiente de frío durante el invierno 1997-1998 (279 Unidades Frío). El suelo se fertilizó con la fórmula 145-72-102-12 por año, y se aplicaron 50% de la dosis el 24 de septiembre de 1997 y 50% restante el 13 de julio de 1998; la fertilización fue hecha al voleo sobre las hileras de árboles (80 m de largo por 1 m de ancho con 40 árboles) con 2.4 kg de Nitrofoska (12-12-17-2), más 640 g de urea (46-0-0), y se aplicaron 29 g de N, 14 g de P, 20 g de K y 2 g de Mg por árbol por año. Para control del pulgón (*Aphis pomi*) se utilizó 'Pirimor' (1 g L⁻¹ de agua) el 30 de abril de 1998; también se presentó cenicilla

(*Sphaerotheca pannosa*), para lo cual se aplicó 'Bayletón' (2 g L⁻¹ de agua) el 7 de mayo de 1998; dada la incidencia de frailecillo (*Macroductylus* spp) fue necesario aplicar 'Malatión' (2 mL L⁻¹ de agua) el 5 de junio y el 22 de julio del mismo año.

Variables en Estudio

Longitud y densidad de raíces. En otoño de 1998, con la ayuda de una barrena Veihmeyer, se extrajeron muestras de suelo con raíces, en las cuatro orientaciones del árbol (norte, sur, este y oeste), a tres distancias del tronco (30, 60 y 90 cm) y a tres profundidades (0 a 15, 15 a 30 y 30 a 45 cm), y se obtuvo así un total de 36 muestras por árbol. Cada muestra se secó en una estufa de circulación de aire a 70 °C por 24 h, para después pesarla y luego ponerla en agua para facilitar la separación del suelo; enseguida la muestra se mezcló y dispersó por 10 a 15 segundos, para esto se utilizó una mezcladora eléctrica, para después vaciarla al separador de raíces, donde pasan por una columna con agua y, por diferencia de densidad de partículas, las raíces flotan y emergen por el flujo de agua para ser recibidas en un

tamiz con abertura de 0.149 mm, eliminándose los sedimentos por decantación; una vez separadas las raíces se tiñeron con colorante congo rojo. Posteriormente, las raíces se colocaron en un dispositivo que en su base contiene papel filtro y sobre él un tubo cilíndrico biselado cuyo diámetro interno es de 12.1 cm; el dispositivo a la vez está equipado con una bomba de vacío, la cual, al aplicar succión, permite que las raíces se distribuyan aleatoriamente sobre el papel filtro. El papel filtro con raíces se colocó entre dos placas de plástico transparente, donde la placa superior se encuentra reticulada con cuadros de 1 cm². Al realizar esto, los fragmentos de las raíces interceptan aleatoriamente líneas de la retícula conformada por 20 cuadros marcados, determinando con el apoyo de un microscopio de disección el número de interceptaciones (la retícula está inscrita en un círculo, cuyo diámetro es el mismo que el del cilindro antes indicado).

Después de obtener los datos necesarios se calcularon la longitud de raíces y densidad de raíces utilizando las siguientes ecuaciones:

$$R = 2.258 * N; \quad (1)$$

$$Lv = (R) (Da / m) \quad (2)$$

Donde: R = Longitud radical (cm); 2.258 = Constante en cm; N = Número de interceptaciones; Lv = Densidad de longitud de raíces (cm cm⁻³); Da = Densidad aparente de la muestra del suelo (g cm⁻³) y m = Peso seco de la muestra del suelo (g) (Newman, 1966).

Análisis de Datos

Para el análisis de la información obtenida se utilizó el Sistema de Análisis Estadístico (SAS, 1988), se hizo un análisis de varianza para cada una de las variables con el procedimiento GLM y pruebas de Tukey para la comparación de medias de tratamientos. Cabe aclarar que en ninguno de los casos se analizaron interacciones de tercer o cuarto orden dada la complejidad de análisis.

RESULTADOS Y DISCUSION

Temperatura del Suelo

En condiciones de riego, de 7 a 8 h de la mañana, a 15 cm de profundidad, la cubierta de estiércol (CE) mostró mayor temperatura comparada con los otros dos manejos del suelo durante todas las fechas de registro; le siguió la cubierta de pasto (CP) con un comportamiento prácticamente similar, sólo que presentó menor oscilación térmica, inclusive, al inicio la temperatura registrada estuvo por abajo del suelo desnudo (SD); en SD los cambios de la temperatura fueron mayores, pero los promedios estuvieron por debajo de CE y CP (Figura 4A). A 30 cm de profundidad, las temperaturas observadas son mayores pero con el mismo comportamiento y con menor variación que a 15 cm (Figura 4B). De 14 a 15 h, en condiciones de riego, a 15 cm de profundidad, las temperaturas en los tres manejos de suelo fueron mayores que de 7 a 8 h de la mañana; las temperaturas observadas en el tratamiento CE fueron más altas en la mayor parte de las lecturas registradas (Figura 4C). A 30 cm de profundidad la variación para los tres manejos del suelo fue menor que a 15 cm de profundidad, mientras se mantuvieron las temperaturas de CE por arriba de las otras dos condiciones (Figura 4D).

En condiciones de temporal, de 7 a 8 h a 15 cm de profundidad, la temperatura del suelo en CE siempre fue superior y menos variable que CP y SD en todas las fechas de registro, descendiendo las temperaturas con la época de lluvias (Figura 5A). A 30 cm de profundidad la variación de la temperatura es muy parecida a la registrada a 15 cm de profundidad, las temperaturas más variables se registraron en SD con oscilación de hasta 3.1°C (Figura 5B). A 15 cm de profundidad, de las 14 a 15 h, en condiciones de temporal, la oscilación en CE y CP fue menor en todos los casos (Figura 5C). A 30 cm de profundidad las temperaturas de CE en todos los casos fueron mayores que en CP y ambas con menor variación que SD (Figura 5D).

Las diferencias observadas, entre aquellas temperaturas a 15 cm y a 30 cm, son debidas a la mayor oscilación térmica que se presenta en los

primeros 15 cm de profundidad del suelo, producto de las variaciones que observa el balance de energía calorífica del mismo, resultante de la recepción de luz solar, la emisión de calor y el intercambio de energía con la atmósfera durante el día y la noche. Esto explica por que las temperaturas pueden ser más altas y menos variables a 30 cm, incrementándose las temperaturas en el suelo con la hora del día y la época del año cuando la recepción de energía solar es mayor. Dicho valor de temperatura puede estar afectado por características del suelo, entre ellas, la humedad del suelo, dada la conservación de energía calorífica que propicia, causando valores de temperatura del suelo más estables y, en general, más altos, lo que explica por que la cubierta de estiércol resulta ser la mejor en ambas profundidades de medición ya que, en promedio, mantiene los niveles de humedad más altos en el suelo, en particular, notorio en condiciones de riego (Figuras 6 y 7).

Humedad en el Suelo

En condiciones de riego, el porcentaje de humedad del suelo con CE, en la gran mayoría de los muestreos, se encontró por arriba de capacidad de campo (13.1%), con más variación en julio y agosto, con niveles de humedad superiores a los correspondientes en CP y SD; en todos los tratamientos la humedad fue mayor que 10% (Figura 6). Entre el 7 de abril y el 23 de junio, en condiciones de temporal, solamente la CE mantuvo niveles de humedad superiores al punto de marchitamiento durante la estación seca, siendo SD el tratamiento más castigado, con humedad inferior al punto de marchitamiento (6.6%). A partir del 30 de junio, el porcentaje de humedad de las tres condiciones, por efecto de precipitación, superó el nivel de capacidad de campo (Figura 7).

Longitud de Raíces

El vigor de árboles (Figura 8A), la humedad del suelo (Figura 8B), las cubiertas (Figura 8C) y fertilización foliar (Figura 8D) no afectaron significativamente la longitud de raíces. Sin embargo, la mejor tendencia de crecimiento radical se observó en árboles de vigor alto, con riego y cubierta de pasto, lo cual coincide con los resultados de Coker (1959), quien encontró mayor cantidad de raíces en manzanos cultivados con cubiertas, que en aquellos cultivados en

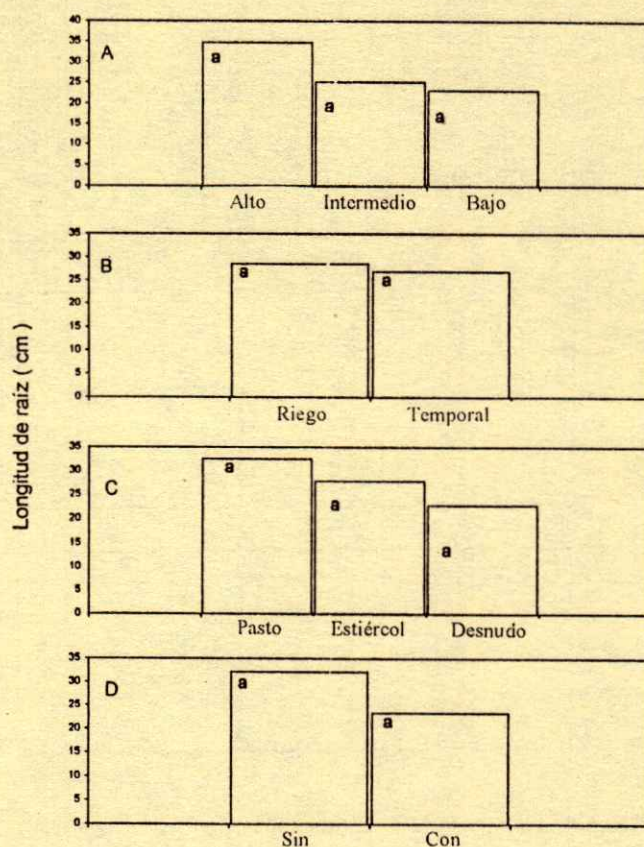


Figura 8. Longitud de raíz afectada por (A) vigor del árbol, (B) humedad del suelo, (C) cubiertas y (D) fertilización foliar al final del experimento en árboles de manzano 'Agua Nueva II', en 1998. (Misma letra dentro de tratamientos son estadísticamente iguales, Tukey, P<0.05).

suelo desnudo. Con respecto a distribución radical, se presentaron diferencias significativas en orientación, siendo las posiciones S y N estadísticamente iguales, pero superiores a las posiciones O y E, respectivamente (Figura 9A), y se confirmó mayor crecimiento de raíces sobre la hilera de árboles (N-S), por donde es conducido el riego, corroborándose el efecto positivo de la disponibilidad de agua, que no sólo se reflejó en el desarrollo radical, sino también en la parte aérea, que observó mayor cantidad y calidad de la producción (Mills *et al.*, 1994), no así entre hileras de árboles (E-O), donde la competencia con la cubierta viva es constante, aunado a condiciones adversas del suelo que se pueden presentar, como son compactación y factores bióticos (Williamson *et al.*, 1992).

El mayor crecimiento de raíces en los primeros 30 cm desde el tronco puede obedecer a una distribución vertical en profundidad de las mismas, por

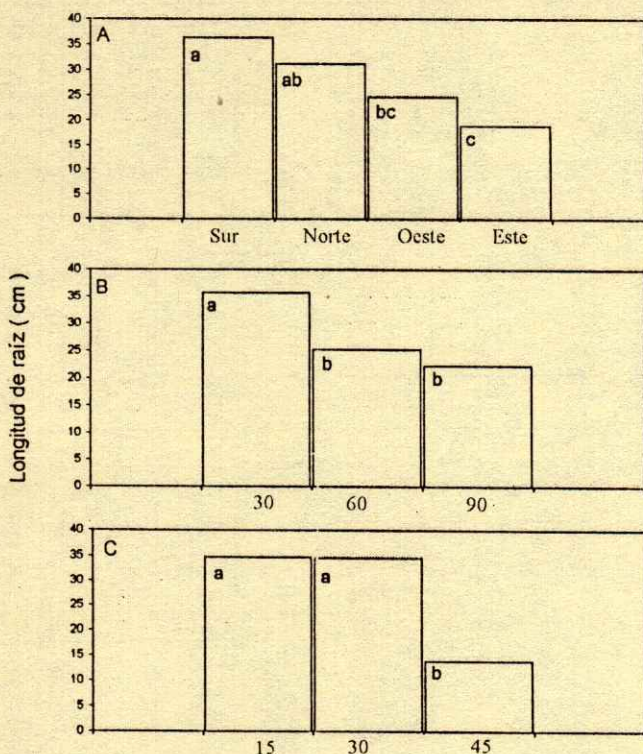


Figura 9. Longitud de raíz afectada por (A) orientación, (B) distancia del tronco (cm) y (C) profundidad (cm) en árboles de manzano 'Agua Nueva II', en 1998. (Misma letra dentro de tratamientos son estadísticamente iguales, Tukey, $P < 0.05$).

competencia con raíces de árboles adyacentes, ese crecimiento fue estadísticamente superior a las distancias de 60 y 90 cm del tronco, respectivamente (Figura 9B). En árboles de manzano 'Melrose' sobre M26, se ha encontrado interacción significativa entre raíces y distancia del tronco, y se presentó el mayor número de raíces por m^2 hasta 60 cm alrededor del tronco, pero más allá de esa distancia el número de raíces disminuye (Ferree, 1994).

Las profundidades en donde se encontró mayor longitud de raíces fue a 15 y 30 cm, respectivamente, siendo estadísticamente iguales entre sí, pero superiores a la profundidad de 45 cm, en la cual se presentó una disminución importante (Figura 9C). Atkinson (1980) encontró que 70% del sistema radical en árboles de manzano se localiza entre los 0 a 30 cm de profundidad, disminuyendo conforme aumenta la profundidad.

La interacción cubierta-orientación fue significativa y se obtuvieron los mayores valores de

Cuadro 1. Efecto de la interacción cubierta-orientación en longitud de raíces (cm) en manzano 'Agua Nueva II', Montecillo, Texcoco, Méx. (1998).

Orientación	Cubiertas		
	Estiércol	Pasto	Desnudo
Norte	34.21 abcd [†]	35.23 abc	23.89 bcdef
Sur	35.80 ab	44.11 a	28.86 abcdef
Este	17.37 cf	17.75 cf	21.66 bedef
Oeste	24.05 bcdef	32.98 abcde	16.83 f

[†] Medias con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con Tukey ($P < 0.05$; DMS = 15.87).

longitud de raíces en la posición S con CP, seguido por CE en la misma orientación. El valor más bajo se localizó en la posición O con SD (Cuadro 1). También resultó significativa la interacción cubierta-profundidad, donde la mayor longitud se presentó a 15 y 30 cm de profundidad, respectivamente, con CP, en tanto que a 45 cm con CE fue mayor la longitud de raíces (Cuadro 2). Finalmente, la interacción orientación-profundidad fue también significativa, en las posiciones S y N a 30 cm de profundidad se presentó la mayor longitud de raíces y en el O la menor a 45 cm (Cuadro 3). Lo anterior ratifica que, aunque el patrón de crecimiento y distribución de las raíces es una característica inherente a la especie, puede ser alterada por un gran número de factores edáficos, climáticos, bióticos, nutrimentales, hídricos y culturales (Layne *et al.*, 1986).

También la interacción distancia del tronco-profundidad fue significativa: se encontró mayor longitud de raíces a 30 cm de distancia del tronco a las profundidades de 15 y 30 cm, respectivamente. La menor longitud de raíces es localizada a 90 cm de distancia del tronco y 45 cm de profundidad (Cuadro 4).

Cuadro 2. Efecto de la interacción cubierta-profundidad en longitud de raíces (cm) en manzano 'Agua Nueva II', Montecillo, Texcoco, Méx. (1998).

Profundidad	Cubiertas		
	Estiércol	Pasto	Desnudo
cm			
15	35.08abc [†]	42.88a	26.29cdef
30	32.28abcd	42.48ab	28.92cde
45	16.22efg	12.20g	13.22fg

[†] Medias con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con Tukey ($P < 0.05$; DMS = 13.05).

Cuadro 3. Efecto de la interacción orientación-profundidad en longitud de raíces (cm) en manzano 'Agua Nueva II', Montecillo, Texcoco, Méx. (1998).

Orientación	Profundidad (cm)		
	15	30	45
Norte	38.10 abcd†	43.32 ab	11.92 f
Sur	41.98 abc	49.81 a	16.96 f
Este	22.64 ef	19.08 f	15.06 f
Oeste	36.27 abcde	26.02 cdef	11.57 f

† Medias con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con Tukey ($P \leq 0.05$; DMS = 15.87).

Densidad de Raíces

El proceso regulatorio del crecimiento está dado por el balance entre la raíz y los brotes (Aiken y Smucker, 1996), árboles de débil desarrollo están escasamente anclados, en tanto que los más vigorosos presentan equilibrio de la parte aérea con la radical. Así se tiene que la densidad radical de árboles de vigor alto es superior a la observada en árboles de vigor intermedio o bajo (Figura 10A), lo cual coincide con resultados en ciruelo donde se encontró una relación significativa entre la circunferencia del tronco y el promedio de la densidad radical (Grimes *et al.*, 1982). A pesar de que no hubo diferencias entre tratamientos de humedad del suelo (Figura 10B), cubiertas (Figura 10C) y fertilización foliar (Figura 10D), hay mayor densidad de raíces en árboles con riego y cubierta de pasto (Figura 10).

Es importante indicar que no hubo diferencias estadísticas entre el tratamiento de fertilización foliar y el testigo, tanto en longitud como en densidad de raíces; se observó además que el testigo supera al tratamiento con fertilización foliar (Figuras 8 y 10), posiblemente por la fertilización realizada al suelo que, en principio, se establece como suficiente.

Cuadro 4. Efecto de la interacción distancia del tronco-profundidad en longitud de raíces (cm) en manzano 'Agua Nueva II', Montecillo, Texcoco, Méx. (1998).

Distancia del tronco	Profundidad (cm)		
	15	30	45
cm			
30	49.09 a†	43.40 ab	14.59 f
60	29.92 cd	31.59 bc	14.12 f
90	25.11 cdef	28.69 cde	12.92 f

† Medias con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con Tukey ($P \leq 0.05$; DMS = 13.05).

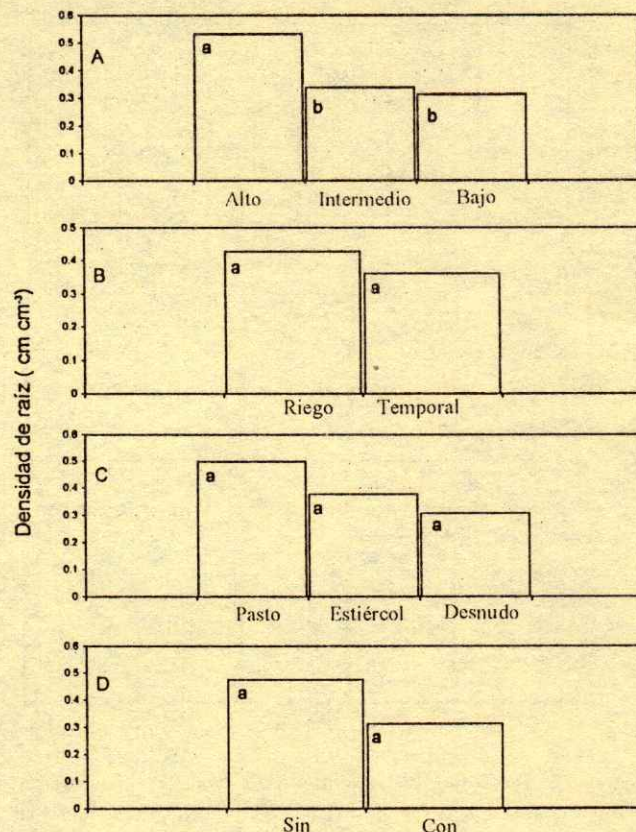


Figura 10. Densidad de raíz afectada por (A) vigor del árbol, (B) humedad del suelo, (C) cubiertas y (D) fertilización foliar al final del experimento en árboles de manzano 'Agua Nueva II', en 1998. (Misma letra dentro de tratamientos son estadísticamente iguales. Tukey, $P \leq 0.05$).

El comportamiento de la densidad de raíces con respecto a la orientación es igual a la observada para longitud de raíces; la mayor densidad de raíces fue en la posición S, estadísticamente igual con la posición N, pero diferente a las posiciones O y E (Figura 11A). Igualmente, la mayor densidad de raíces se localizó a 30 cm del tronco, seguida por 60 y 90 cm (Figura 11B), así también la mayor densidad de raíces se observó a 15 y 30 cm de profundidad, respectivamente, estadísticamente iguales entre sí, pero superiores a la profundidad de 45 cm (Figura 11C), resultados esperados, considerando que se correlacionan positivamente longitud y densidad de raíces. El suelo con cubiertas presenta una gran cantidad de raíces en la parte superior del suelo, lo que se debe, en parte, a que la humedad en los perfiles superiores del suelo se conserva mejor, tal y como se observa en las Figuras 6 y 7; esto coincide con

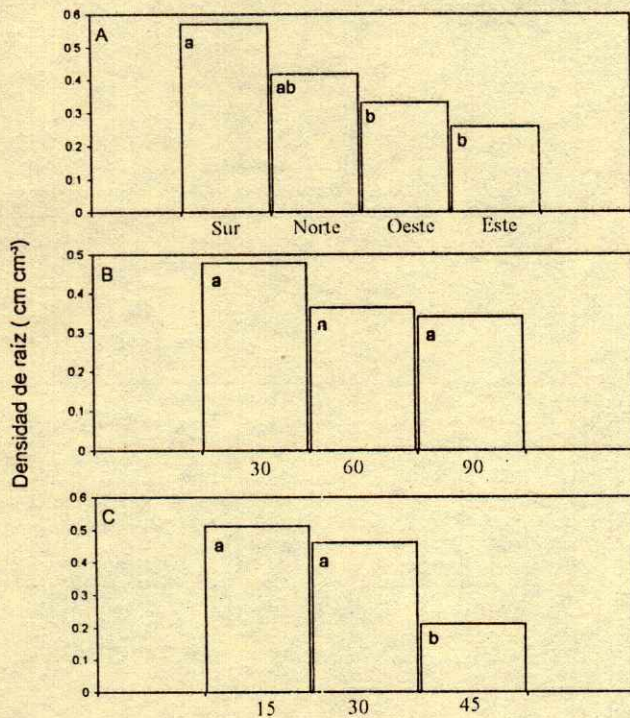


Figura 11. Densidad de raíz afectada por (A) orientación, (B) distancia del tronco (cm) y (C) profundidad (cm) en árboles de manzano 'Agua Nueva II', en 1998. (Misma letra dentro de tratamientos son estadísticamente iguales, Tukey, $P \leq 0.05$).

resultados de Coker (1959) y Parker y Meyer (1996). De hecho, la interacción cubierta-profundidad, que fue significativa, muestra que la zona donde se presenta la mayor densidad es a 15 y 30 cm de profundidad con CP, seguido por CE en las mismas profundidades (Cuadro 5).

Es importante finalizar indicando que el mayor desarrollo radical se observó a la par de mayor productividad del árbol (Hogue y Neilsen, 1987), siendo a) el vigor del árbol, por la correlación positiva

Cuadro 5. Efecto de la interacción cubierta-profundidad en densidad de raíces en manzano 'Agua Nueva II', Montecillo, Texcoco, Méx. (1998).

Profundidad	Cubiertas		
	Estiércol	Pasto	Desnudo
cm			
15	0.45 abc [†]	0.74 a	0.34 bc
30	0.43 abc	0.57 ab	0.38 bc
45	0.25 c	0.19 c	0.20 c

[†] Medias con la misma letra en columna son estadísticamente iguales. Tukey $P \leq 0.05$; DMS = 0.32.

que existe entre el desarrollo de la parte radical y el de la parte aérea, y b) el riego y las cubiertas orgánicas por sus efectos benéficos sobre disponibilidad y conservación de agua, factores que influyeron de manera más determinante, cuando se considera que las variaciones de temperatura del suelo causadas por los tratamientos son escasas y no propician diferencias entre tratamientos.

CONCLUSIONES

- El uso de cubiertas y de riego causan que la temperatura del suelo sea más alta y estable, producto de la modificación que promueve la mayor humedad que se mantiene en tales condiciones; se observa la mayor variación de temperatura a 15 cm de profundidad.
- La humedad del suelo está directamente relacionada con la adición y/o conservación de agua por efecto del riego y/o el uso de cubiertas.
- El vigor del árbol, las cubiertas y el riego favorecen el crecimiento de raíces.
- Las cubiertas orgánicas, en particular la de pasto, y el riego causaron la mayor longitud o densidad radical, misma que se distribuyó en mayor cantidad en las posiciones S y N del árbol, a 30 cm del tronco y en los primeros 30 cm de profundidad.
- La fertilización foliar no afectó el desarrollo radical de los árboles y se estima que la fertilización al suelo es suficiente.

LITERATURA CITADA

- Aiken, R.M. y A.J.M. Smucker. 1996. Root system regulation of whole plant growth. *Ann. Rev. Phytopathol.* 34: 325-346.
- Atkinson, D. 1980. The distribution and effectiveness of the roots of the crops. *Hort. Rev.* 2: 424-490.
- Atkinson, D. 1983. The growth, activity and distribution of the fruit tree root system. *Plant Soil* 71: 23-35.
- Coker, E.G. 1959. Root development of apple trees in grass and clean cultivation. *J. Hort. Sci.* 34: 111-121.
- Ferree, C.D. 1994. Root distribution following 9 years of root-pruning 'Melrose'/M.26 apple trees. *HortScience* 29(2): 76-78.
- Glenn, D.M. y W.V. Welker. 1993. Root development patterns in field grown peach trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 118(3): 362-365.
- Grimes, D.W., P.L. Wiley y A.B. Carlton. 1982. Plum root growth in a variable-strength field soil. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107(6): 990-992.
- Hogue, E.J. y G.H. Neilsen. 1987. Orchard floor vegetation management. *Horticultural Reviews* 9: 377-430.

- Layne, R.E.C., C.S. Tan y R.L. Perry. 1986. Characterization of peach roots in fox sand as influenced by sprinkler irrigation and tree density. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111(5): 670-677.
- Marschner, E.R. 1986. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, Belfast, Ireland.
- Miller, D.E. 1986. Root systems in relation to stress tolerance. *HortScience* 24: 963-970.
- Mills, T.M., M.H. Behboudian, P.Y. Tan y B.E. Clothier. 1994. Plant water status and fruit quality in 'Braeburn' apple. *HortScience* 29: 1274-1278.
- Miranda B., J.L. 1994. Requerimientos de frío y calor y estimulación de la brotación del manzano 'Agua Nueva II'. *Agrociencia* 31: 45-49.
- Newman, E.Y. 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.* 3: 139-145.
- Parker, M.L. y J.R. Meyer. 1996. Peach tree vegetative and root growth response to orchard floor management. *HortScience* 31(3): 330-333.
- SAS Institute. 1988. Statistical Analysis System/STAT 'User' Guide Release 6.03 Edition. Cary, NC. USA.
- Williamson, J.G. y D.C. Coston. 1989. The relationship among root growth, shoot growth, and fruit growth of peach. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114(2): 180-183.
- Williamson, J.G., D.C. Coston y J.A. Cornell. 1992. Root restriction affects shoot development of peach in a high-density orchard. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117(3): 362-367.

ASPERSIONES FOLIARES DE ZINC EN NOGAL PECANERO EN SUELOS ALCALINOS

Foliar Spray Applications of Zinc on Pecan Trees in Alkaline Soils

Esteban Favela Chávez¹, José I. Cortés Flores², Gabriel Alcántar González², Jorge D. Etchevers Barra², Gustavo A. Baca Castillo² y Jorge Rodríguez Alcázar³

RESUMEN

En árboles de nogal pecanero (*Carya illinoensis* W. Koch), de 22 años de edad, se estudió el efecto de la época de aspersión foliar con zinc sobre la condición nutrimental, el crecimiento total del brote y la producción de nueces. Estos árboles, plantados en un Fluvisol dístico de textura franca, pH alcalino y contenidos de materia orgánica y CaCO₃ de 1.76% y 0.52%, respectivamente, muestran una deficiencia de zinc. El experimento consistió de cinco tratamientos, los cuales incluyeron una aspersión en el otoño, sin o con una, dos, tres o cuatro aspersiones adicionales durante la estación de crecimiento a una concentración de 0.03% de zinc, más un testigo. En un diagnóstico visual se encontraron diferencias significativas en la etapa temprana de la estación de crecimiento. Al aumentar la concentración de zinc en las hojas, mayor que 40 mg kg⁻¹, los síntomas se disminuyeron y *viceversa*. En los tratamientos con las dos primeras aspersiones adicionales, aplicadas al inicio de la estación de crecimiento, la concentración de zinc en las hojas en crecimiento fue mayor, pero menor que el intervalo considerado como óptimo. En los tratamientos con una sola aspersión en el otoño y con una al inicio de la primavera, la concentración de zinc en las hojas fue similar a la del tratamiento testigo. Sin embargo, en los muestreos subsecuentes la diferencia en la concentración de zinc en las hojas entre tratamientos no fue significativa. La longitud total del brote y el número de nueces por brote no se afectaron por los tratamientos.

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-UL km Carretera Santa Fe y Periférico, 27000 Torreón, Coahuila, México.

² Programa de Edafología. Instituto de Recursos Naturales;

³ Programa de Fruticultura. Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Edo. de México.

Recibido: Octubre de 1997.

Aceptado: Junio de 2000.

Palabras clave: Zinc foliar, nutrición, *Carya illinoensis*.

SUMMARY

The effect of application time of zinc foliar sprays on nutrient condition, shoot length and nut production was studied in 22-yr-old pecan trees (*Carya illinoensis* W. Koch). These trees, growing in a Distric fluvisol with a loam texture, alkaline pH, 1.76% organic matter and 0.52% calcium carbonate, are deficient in zinc. The experiment consisted of five treatments of a foliar spray application in the fall; four of them received either 1, 2, 3, or 4 additional spray applications at a 0.03% concentration during the growing period. Visual symptoms were significantly different in the early growth stage. When leaf zinc concentration was increased to more than 40 mg kg⁻¹, the symptoms of zinc deficiency decreased, and *viceversa*. In treatments with the first two additional spray applications at the beginning of the growing season, zinc concentration in growing leaves was higher, but lower than the optimum level. Treatments with two foliar spray applications (one in fall and the other in early spring) were not different from the control. As the growing season advanced, there were no differences among treatments in terms of the degree of zinc deficiency, leaf zinc concentration, shoot length and number of nuts per shoot.

Index words: Zinc foliar sprays, nutrition, *Carya illinoensis*.

INTRODUCCION

El nogal pecanero (*Carya illinoensis* W. Koch) generalmente presenta problemas de deficiencias nutrimentales de elementos menores como zinc, manganeso y hierro. La deficiencia de zinc es común en los suelos calcáreos con un pH que varía de

7.0 a 8.6. El alto contenido de carbonato o pH alcalino en estos suelos limita la disponibilidad de elementos menores, incluyendo al zinc. Este elemento se encuentra disponible en un suelo con un pH de 5.0 a 7.0. A pH más alto, el zinc forma compuestos poco solubles como $Zn(OH)_2$, $ZnCO_3$ y $Zn_3(PO_4)_2$ (Kabata y Pendias, 1984). En los suelos alcalinos, el zinc tiene una movilidad limitada debido a que el carbonato de calcio reacciona con el zinc, lo que reduce su disponibilidad (Fassbender y Bornemisza, 1987).

La deficiencia de zinc en el nogal pecanero disminuye la actividad de la anhidrasa carbónica, la síntesis de RNA y de proteínas, además, el zinc es el precursor del triptofano, indispensable para la síntesis de ácido indolacético en las hojas, donde participa en la elongación de los tejidos (McEachern, 1990). Su deficiencia reduce el tamaño de las hojas nuevas, con un aspecto de roseta, debido a la reducción de los entrenudos en los tallos. Al agudizarse la deficiencia, las ramas más afectadas mueren (Rathore, 1991).

O'Barr y Hanson (1978), al relacionar la sintomatología con la concentración de zinc en los folíolos de nogal pecanero, encontraron valores de 20 a 40 $mg\ kg^{-1}$ en los árboles deficientes (hambre oculta) y valores superiores a 60 y 100 $mg\ kg^{-1}$ en árboles normales; en suelos alcalinos, la concentración de zinc en las hojas de árboles con síntomas visuales de deficiencia fue de 20 $mg\ kg^{-1}$. Spark y Payne (1982) establecieron los siguientes grados de deficiencia, con base en el porcentaje de follaje dañado: 1: no deficiente; 2: menos de 1%; 3: menos de 25%; 4: más de 25% pero menos de 50%; y 5: más de 50%. Sin embargo, Pimentel (1978) no encontró diferencias significativas entre estos grados de deficiencia y la concentración de zinc en las hojas en condiciones de campo, haciendo notar que el cv. Wichita presentó la deficiencia más severa de zinc.

En el nogal pecanero, cultivado en suelos alcalinos de la región norte de México, Medina (1995) estableció que el nivel de zinc varía entre 57 y 73 $mg\ kg^{-1}$ en hojas del mes de julio cuando el árbol se encuentra en pleno crecimiento.

La aspersión al follaje de elementos menores en los frutales es un método de suministro más rápido y efectivo que la aplicación al suelo (Rodríguez, 1989). Aunque el efecto de la aspersión foliar sobre la nutrición del árbol es temporal (Marschner, 1986), esta forma de fertilizar tiene ventajas cuando las bajas temperaturas, al inicio de la estación de crecimiento y

el pH alcalino del suelo, no favorecen la disponibilidad de zinc.

En general, se reconocen tres épocas de aspersión vía foliar. En primer término está la de primavera, al iniciar el período de crecimiento vegetativo. Enseguida la de verano, cuando el árbol está en pleno crecimiento hasta antes de la cosecha. Finalmente, las aplicaciones de otoño y de reposo, las cuales se realizan posteriormente a la cosecha, se consideran como fuente de reservas de elementos requeridos al inicio del siguiente ciclo de crecimiento. Se procura siempre que las hojas se encuentren todavía en buen estado para aprovechar al máximo su capacidad de absorción y el proceso de retranslocación hacia los órganos de reserva (Swietlik y Faust, 1984).

En frutales caducifolios se ha demostrado que los nutrimentos asperjados no solamente son absorbidos por las hojas, sino también por los tallos y las ramas, donde la penetración se efectúa por las cicatrices de las ramas rotas, lenticelas y fisuras longitudinales de la corteza de los árboles en defoliación o en período de reposo, como se ha observado en almendro *Prunus amygdalus*, duraznero *Prunus persica*, ciruelo *Prunus domestica* y nectarino *Prunus persica* var. nectarina (Uriu, 1978; Johnson y Uriu, 1989).

Ryugo (1993) menciona que las aspersiones en otoño con dosis elevadas deben efectuarse antes de la caída de las hojas en frutales caducifolios, donde el zinc se almacena en ramas y espolones, junto con los productos desdoblados de la clorofila y otros compuestos celulares y nutrimentos de las hojas en su etapa de senescencia. El mismo autor considera que el mecanismo de retranslocación permite que las plantas conserven nutrimentos en las ramas para la siguiente estación de crecimiento.

En cuanto a las aspersiones de primavera, Storey *et al.* (1973), para corregir la deficiencia de zinc en suelos calcáreos, iniciaron pruebas con diferentes productos de zinc, asperjados al follaje combinándolos con productos sobre la base de nitrógeno como urán el cual es un producto comercial con 32% de N para estimular o mejorar la absorción. Los resultados indicaron que el urán duplica la absorción de zinc por las hojas del nogal pecanero.

Cuando se aplica nitrato de zinc más urán vía foliar, la cantidad de zinc absorbida por las hojas es el doble respecto a los casos en que se aplica sulfato de zinc. Sin embargo, los tratamientos sobre la base de nitrato de zinc son más caros y, a veces, llegan a

causar toxicidad (Smith y Storey, 1979). Por otra parte, al asperjar zinc al follaje, las hojas jóvenes absorben hasta 1.0% de lo aplicado, mientras que las hojas maduras sólo absorben 0.1%; por eso se recomienda que las aspersiones sean más frecuentes al inicio de la brotación (Storey *et al.*, 1979), a una concentración no mayor que 1100 mg kg⁻¹ para no provocar toxicidad.

En México, los resultados de investigación de tres años en la Comarca Lagunera en árboles de nogal pecanero 'Western' y 'Wichita' de 10 a 16 años de edad, que recibieron 1, 2, 3 y 5 aspersiones de zinc cada año, mostraron que con sólo dos aplicaciones se logró una concentración de 60 mg kg⁻¹ (límite de deficiencia) y no se observaron diferencias significativas con tres y cinco aspersiones. Por lo tanto, para el cv. 'Western' se recomienda aplicar la primera aspersión una semana después de la brotación (brote de 5 a 7 cm) y la segunda tres semanas después (Chávez y Medina, 1992; 1994). En condiciones de invernadero, Favela (1990) incrementó de manera significativa la concentración de zinc en la hoja de nogal pecanero, con tres aspersiones con zinc a una concentración de 0.03, 0.04 y 0.05 %, en el período de crecimiento vegetativo, sin efecto alguno sobre la altura final de las plantas.

En la actualidad, la práctica de corrección de la deficiencia de zinc en el nogal pecanero, cultivado en suelos alcalinos, consiste en aplicar de dos a seis aspersiones con zinc al follaje, en el período de primavera y verano. Ello requiere equipo especializado de elevado costo así como maquinaria y mano de obra adicionales, que incrementan el costo de producción del huerto. Por lo tanto, el presente trabajo estuvo encaminado a estudiar la posibilidad de disminuir el número de aspersiones de zinc al follaje en el cultivo de nogal pecanero y esto se lograría con aspersiones en el período de otoño, manteniendo el nivel óptimo de zinc en el follaje sin que se afectara el rendimiento.

MATERIALES Y METODOS

La investigación se llevó a cabo en el período de otoño de 1994 y primavera de 1995, en la huerta comunal Los Remedios del municipio de Tasquillo, estado de Hidalgo, cuyas condiciones climáticas y edafológicas son similares a las de las principales regiones productoras de nogal pecanero en el país. La localidad se encuentra a 20°32'53" latitud norte, 99°18'46" longitud oeste, a 1680 msnm, con 477.2 mm

de precipitación anual. Es una región semiárida o semiseca, con una temperatura media anual de 18 °C (García, 1973). El suelo del huerto tiene un pH de 7.5, un contenido de CaCO₃ de 0.52% y 1.76% de materia orgánica, con textura franca, y se clasifica como Fluvisol dístico (FAO/UNESCO/ISRIC, 1990).

La plantación tenía 22 años de edad y corresponde a el cultivar 'Western', injertado sobre un patrón proveniente de semilla probablemente del cv. 'Riverside', originario de Las Cruces, Nuevo México, EUA, y una distancia de 12 x 12 m en marco real (64 árboles ha⁻¹). Los árboles del estudio se seleccionaron en función de vigor y contenido de zinc en la hoja. Se consideró que el diámetro del tronco fuera similar, para lo cual se midió con un vernier de madera graduado de 0 a 60 cm. Este parámetro se consideró como covariable en el análisis de los resultados. Para conocer la condición nutricional se tomaron previamente muestras de 20 árboles con síntomas de deficiencia, en julio de 1994, y el análisis reportó una concentración media de 32.5 mg kg⁻¹, el cual se considera como deficiente en el cultivo de nogal de acuerdo con Medina (1995).

El arreglo de los seis tratamientos en el campo se hizo mediante el diseño experimental completamente al azar con seis repeticiones por tratamiento. La unidad experimental la constituyó un árbol, seleccionado por su deficiencia de zinc de acuerdo con el diagnóstico previo arriba mencionado (Cuadro 1).

En las soluciones asperjadas se empleó ZnSO₄·7H₂O, grado reactivo, y se agregó nitrógeno en forma de urea como ion transportador. La concentración de la solución fue de 0.03% de Zn y 0.1% de urea más un adherente dispersante comercial a dosis de 500 mL por cada 200 L de agua. La dosis de zinc aplicada dio mejores resultados en el cultivo de nogal pecanero, en un estudio previo realizado por Favela (1990). Por cada 200 L de solución se adicionaron 1240 mL de ácido sulfúrico IN para bajar el pH de 8.0 a 6.5, con el fin de que la solución asperjada tuviera el pH que mejor favorece la absorción vía foliar (Marschner, 1986).

Las aspersiones foliares se realizaron con un equipo de aspersión de alta presión de tracción mecánica. En cada aspersión se cubrió completamente la superficie foliar hasta el punto de rocío. Todas las aspersiones siempre se realizaron en el transcurso de la mañana, entre las 8:00 y 10:00 h.

Cuadro 1. Tratamientos y fechas de aspersión foliar de zinc (0.03%) en el otoño y en el periodo de crecimiento vegetativo en nogal pecanero.

Tratamientos (periodos de aplicación)	Fechas de aspersión foliar				
	1994	1995			
	22 octubre	01 abril	12 abril	25 mayo	12 julio
1 Testigo [†]	-	-	-	-	-
2 Otoño [†]	+	-	-	-	-
3 Otoño + 1 Primavera	+	+	-	-	-
4 Otoño + 2 Primavera	+	+	+	-	-
5 Otoño + 3 Primavera	+	+	+	+	-
6 Otoño + 3 Primavera+1 Verano	+	+	+	+	+

[†] Sin aspersión. [†] Con aspersión.

Manejo del Huerto

Los árboles se fertilizaron una sola vez con la fórmula 120-80-00 que se aplica año con año y se usaron como fuentes de nitrógeno y fósforo a la urea (46% N) y el fosfato diamónico (18% N y 46% P₂O₅), respectivamente. La aplicación se realizó al voleo el 28 de junio de 1995, se pasó la rastra inmediatamente después para su incorporación. Puesto que los árboles crecen fundamentalmente bajo condiciones de temporal, el huerto solamente recibió dos riegos de auxilio, el 6 de abril y 9 de junio. El temporal inició al final del mes de mayo. Las plagas más comunes fueron el pulgón amarillo *Moniella costalis* y el barrenador del ruzno *Laspeyresia caryana*, en el caso de las enfermedades fueron la fumagina *Mycosphaerella caryigena* y pudrición texana *Phymatotrichum omnivorum*. Debido a la baja incidencia de las mismas, no se realizó algún tipo de control.

Medición de la Respuesta.

La primera variable registrada fue la sintomatología visual de los árboles, la cual se determinó en dos fechas. La primera, el 25 de mayo de 1995 y la segunda el 15 de septiembre del mismo año. En ambas fechas se tomó en cuenta la apariencia de las hojas y de las ramas de acuerdo con la metodología propuesta por Spark y Payne (1982), la cual consiste en observar grados de deficiencia de acuerdo con la apariencia de hojas en cuanto a color y forma y tamaño de ramas. La longitud total de los brotes fue otra de las variables consideradas. Para ello, se tomaron al azar cuatro brotes vegetativos por árbol y se midieron con una regla al final de septiembre, cuando se detiene

completamente el crecimiento vegetativo. También se cuantificó el número de nueces por brote, para ello se consideraron cuatro brotes fructíferos seleccionados al azar en agosto. La última variable registrada fue el contenido de zinc en tejido foliar en cinco fechas diferentes de aplicación de zinc. El primer muestreo se realizó el 22 de octubre de 1994, previo a la aspersión de zinc en el otoño. El segundo y tercer muestreo se realizaron el 13 y 24 de mayo de 1995, respectivamente, y el cuarto y quinto muestreo el 29 de julio y el 15 de septiembre 1995. En cada fecha de muestreo se colectaron hojas compuestas de la parte media del brote a una altura de 1.50 m, alrededor del árbol hasta completar de ocho a 10 hojas, las cuales se lavaron en primer lugar con agua de la llave, enseguida con HCl al 5%, y se enjuagaron con agua destilada y desionizada; se secaron a 70 °C por 24 h y se molieron en un molino de acero inoxidable con una malla 40.

La determinación analítica del nitrógeno total fue por el método de microkjeldahl (Etchevers, 1985) y del fósforo por el método de fosfovanadomolibdato de amonio y fotolorimetría. Para los elementos como zinc, hierro y manganeso se empleó la digestión húmeda para la destrucción de la matriz orgánica de la muestra y se cuantificó su concentración por espectrofotometría de absorción atómica.

El análisis estadístico de los resultados se realizó a través del análisis de covarianza, para lo cual se usó el procedimiento GLM del SAS, teniendo como covariable el diámetro inicial del tronco de los árboles en estudio. Asimismo, se corrieron pruebas de comparación de medias ajustadas, para ello se usó como estadístico de prueba una 't' con una probabilidad que varió de 0.01 a 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSION

Sintomatología Visual

En la primera observación, realizada el 25 de mayo de 1995, se encontraron diferencias significativas en la apariencia de los árboles (Cuadro 2).

En los Tratamientos 1, 2 y 3 el grado de deficiencia visual fue mayor que en los Tratamientos 4, 5 y 6. Al relacionar estos resultados con la concentración de zinc en las hojas muestreadas en las fechas dos y tres (Cuadro 3), las cuales correspondieron al período cuando se realizó la primera apreciación visual, las hojas de los árboles correspondientes a los tratamientos del primer grupo reportaron una concentración menor que las hojas de los Tratamientos 4, 5 y 6 (Cuadro 3).

Sin embargo, estas diferencias ya no fueron evidentes en la segunda fecha de observación. Ello se debió a que los grados de deficiencia fueron bajos en todos los casos (media de 1.08); no obstante, se puede observar que el grado de deficiencia en el testigo tendió a ser mayor. Aun cuando la concentración de zinc estuvo por abajo del intervalo de suficiencia en todos los tratamientos en la segunda observación, la sintomatología visual no se manifestó de forma intensa, por esta razón se considera que los árboles se encontraban en el umbral de hambre oculta (O'Barr y Hanson, 1978).

Al respecto, Spark y Payne (1982), al relacionar la sintomatología de deficiencia con la concentración de zinc en hojas de nogal pecanero, encontraron que en los árboles con cantidades menores que 46 mg kg^{-1} de zinc, el grado de deficiencia era mayor, lo cual coincide con lo encontrado en este trabajo en la

Cuadro 2. Efecto de las aspersiones foliares de zinc en otoño y estación de crecimiento vegetativo sobre el grado de deficiencia visual de zinc en nogal pecanero.

Tratamiento	Grado de deficiencia [†]	
	25 mayo 1995	15 sept. 1995
1 Testigo	1.70 a [‡]	1.34 a
2 Otoño	1.58 a	1.02 a
3 Otoño + 1 Primavera	1.80 a	1.15 a
4 Otoño + 2 Primavera	1.06 b	1.06 a
5 Otoño + 3 Primavera	1.07 b	0.97 a
6 Otoño + 3 Primavera + 1 Verano	1.09 b	0.98 a

[†] Sintomatología según Spark y Payne (1982).

[‡] Medias con la misma letra en columnas no difieren estadísticamente ($P \leq 0.05$).

primera fecha de apreciación visual. Resultados similares fueron reportados en el cultivo del aguacate por Aguilar *et al.* (1993), quienes mencionan que la sintomatología visual en este cultivo disminuyó al asperjar el follaje con soluciones sobre la base de zinc, las cuales incrementaron la concentración de este elemento en las hojas.

Concentración de Zinc en las Hojas

El análisis de los datos mostró que por fecha de muestreo (Cuadro 3) solamente hubo efectos significativos en la fecha dos, en la cual todos los tratamientos, con excepción del testigo, ya habían recibido la aspersión de otoño en 1994; el Tratamiento 3 ya había recibido una aspersión adicional en la primavera de 1995 y los Tratamientos 4, 5 y 6 dos aspersiones adicionales (Cuadro 3). La concentración de zinc en las hojas en los Tratamientos 4, 5 y 6 fue similar y significativamente mayor que en los Tratamientos 1, 2 y 3, entre los cuales tampoco hubo diferencias significativas. Estos resultados parecían indicar que con una aspersión de zinc en el otoño y dos más en la fase temprana de crecimiento era posible incrementar el nivel de zinc en las hojas y estar en el intervalo de suficiencia de 57 a 73 mg kg^{-1} , correspondiente a hojas muestreadas a mediados de julio para las zonas nogaleras del norte del país (Medina, 1995). Sin embargo, el análisis foliar de las muestras obtenidas en las dos fechas subsecuentes mostraron lo contrario.

La respuesta a la aplicación de Zn en la segunda fecha de muestreo está relacionada con lo que reportaron Storey *et al.* (1979), quienes mencionan que la absorción de zinc por las hojas en el cultivo de nogal pecanero es del orden de 1% de lo asperjado en hojas jóvenes, debido a que la cutícula de la hoja aún no se encuentra suberizada, lo que facilita la penetración y absorción de nutrimentos. Una vez que la cutícula de la hoja se ha suberizado, la absorción del zinc asperjado es solamente de 0.1%.

Chávez y Medina (1992) concluyeron que dos aspersiones foliares de zinc al 0.04%, al inicio de la brotación en árboles de nogal pecanero y sin síntomas visuales de deficiencia de zinc, son suficientes para mantener su concentración foliar de zinc por arriba de lo óptimo. Por lo tanto, estos resultados en la actualidad constituyen la recomendación para los

Cuadro 3. Concentración de zinc en las hojas de nogal pecanero en cinco fechas en respuesta a las aspersiones de zinc al follaje en el otoño y durante la estación de crecimiento de 1995.

Tratamiento	Fechas				
	1994 22 octubre	13 mayo	24 mayo	1995 29 julio	15 septiembre
	mg kg ⁻¹				
1 Testigo	35.07 a [†]	39.41 b	45.86 a	40.23 a	41.23 a
2 Otoño	36.49 a	39.77 b	39.03 a	42.12 a	44.60 a
3 Otoño+1 Primavera	40.61 a	41.50 b	40.42 a	34.73 a	48.60 a
4 Otoño+2 Primavera	36.44 a	52.61 a	45.12 a	48.18 a	45.54 a
5 Otoño+3 Primavera	44.83 a	50.90 a	48.97 a	42.21 a	41.37 a
6 Otoño+3 Primavera+1 Verano	40.20 a	50.12 a	43.24 a	47.15 a	52.63 a

[†] Promedio de seis repeticiones (Base peso seco).

[‡] Medias con la misma letra en columnas no difieren estadísticamente ($P \leq 0.05$).

nogaleros de la Comarca Lagunera (Chávez y Medina, 1994).

De acuerdo con lo reportado por Alexander (1986), la concentración de las aspersiones con zinc en el periodo de otoño en especies caducifolias puede ser hasta del orden de 1%. Ese valor de concentración debe contrarrestar a la menor capacidad para absorber nutrimentos de las hojas próximas a senescer y, de esta forma, lograr una absorción de zinc que satisfaga los requerimientos del árbol en el siguiente año (Marschner, 1986), y entonces prescindir de las aspersiones en primavera.

La explicación de por qué en ninguno de los cinco tratamientos se logró incrementar la concentración de zinc en las hojas a valores de suficiencia que satisfaga los requerimientos de una producción óptima en nogal pecanero, está relacionada con la concentración de la solución y el momento de aplicación. En el Tratamiento 2, que incluyó solamente la aspersión de otoño, la concentración inicial de zinc en las hojas fue de 36.5 mg kg⁻¹ antes de la aspersión y se incrementó a 42.1 mg kg⁻¹ en las hojas muestreadas en julio del año siguiente (Cuadro 3). De acuerdo con lo discutido, se considera que se deben de realizar algunas adecuaciones para la aspersión en el periodo de otoño en el cultivo del nogal. Esta debe aplicarse al menos un mes antes de la fecha en que se realizó en este trabajo, ya que el proceso de defoliación inicia a mediados de octubre y, por consiguiente, al asperjar en esta época las hojas se encuentran en la última etapa de la senescencia, tienen menor capacidad de absorción y hay menos oportunidad para la translocación del zinc absorbido a los órganos de reserva. También es recomendable estudiar la efectividad de las aspersiones en el periodo cuando existe 25% de la apertura del ruzno y finalización de la cosecha, que sería a

principios de diciembre de acuerdo con los trabajos de Uriu (1978), Johnson y Uriu (1989) y Ryugo (1993), en especies frutales caducifolias con hábitos de adaptación en climas similares al del nogal pecanero.

Longitud Total del Brote y Número de Nueces por Brote

La comparación de medias para estas dos variables no reportó diferencias significativas (Cuadro 4). Estadísticamente no hubo diferencias significativas en ambas variables de crecimiento y fructificación. En longitud de brote la media fue de 11.8 cm la que se considera baja en comparación con árboles normales que es de 20 cm.

Por otro lado, para el número de nueces por brote se considera normal, pero con un tamaño menor que el normal, ya que se cosechan aproximadamente 140 nueces por kilogramo (Arrcola y Lagarda, 1994), y en el presente trabajo se contaron 160 nueces por

Cuadro 4. Efecto de las aspersiones foliares de zinc en el otoño y durante la estación de crecimiento vegetativo sobre el crecimiento de brote y número de nueces por brote en el nogal pecanero.

Tratamiento	Longitud total de brote cm	Número de nueces por brote
1 Testigo	14.15 a [†]	2.88 a
2 Otoño	11.07 a	2.75 a
3 Otoño + 1 Primavera	12.85 a	2.67 a
4 Otoño + 2 Primavera	10.71 a	3.22 a
5 Otoño + 3 Primavera	11.64 a	2.78 a
6 Otoño + 3 Primavera + 1 Verano	10.68 a	3.25 a

[†] Medias con la misma letra en columnas no difieren estadísticamente ($P \leq 0.05$).

kilogramo. Estos resultados pueden atribuirse al bajo nivel de zinc en el árbol, cuyo contenido del nutrimento fue inferior al normal.

En el caso de longitud total del brote, los resultados coinciden con lo reportado por Favela (1990) y Aguilar *et al.* (1993), quienes no encontraron diferencias significativas en la longitud del brote en árboles de nogal pecanero y en aguacate, ambos tratados con diferentes fuentes de zinc.

CONCLUSIONES

La sintomatología visual para la deficiencia de zinc, al menos en la primera fecha de evaluación, coincidió con los niveles de concentración de zinc en las hojas. A una concentración mayor, el grado de deficiencia fue menor.

Una aspersión foliar de zinc a una concentración de 0.03% en otoño y dos en primavera incrementaron de manera significativa la concentración de este micronutrimento en la primera fase de la estación de crecimiento.

Las variables de crecimiento, como longitud total de brotes y número de nueces por brote no fueron afectadas por los tratamientos con zinc.

LITERATURA CITADA

- Aguilar M., J.J., A. López J., J.I. Cortés F. y E. Castillejos A. 1993. Evaluación preliminar del efecto de la aplicación de zinc al suelo, tronco y follaje en árboles de aguacate (*Persea americana*) cv. Fuerte. pp. 19-27. *In: Memorias CICTAMEX.*
- Alexander, A. 1986. Optimum timing of foliar nutrient sprays. pp. 44-59. *In: A. Alexander (ed.). Special fertilizer. Martinus Nijhoff, Berlin.*
- Arreola, A.J.G. y A. Lagarda M. 1994. Fenología. pp. 49-67. *In: INIFAP-CAELALA. El nogal pecanero. Libro Técnico No. 1.*
- Chávez G., J.F.J. y M.D.C. Medina M. 1992. Aplicaciones foliares de zinc en nogal pecanero. pp. 27-32. *In: INIFAP-CAELALA. Resúmenes 6º Día del Nogalero. Publicación especial N° 45.*
- Chávez G., J.F.J. y M.D.C. Medina M. 1994. Suelos y fertilidad. pp. 69-93. *In: INIFAP-CAELALA. El nogal pecanero. Libro Técnico No. 1.*
- Etchevers B., J.D. 1985. Determinación de nitrógeno en suelos. Serie Cuadernos de Edafología 5. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- FAO/UNESCO/ISRIC. 1990. Mapa mundial de suelos. Leyenda revisada. Trad. T. Carballas, F. Macías, F. Díaz-Ferro, M. Carballas y J.A. Fernández-Urrutia. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo.
- Fassbender, H.W. y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Favela Ch., E. 1990. Efecto de la aplicación foliar localizada de zinc sobre el crecimiento y la fisiología de plantas de nogal pecanero (*Carya illinoensis* W. Koch). Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Centro de Fruticultura, Montecillo, México.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Johnson, R.S. y K. Uriu. 1989. Mineral nutrition. p. 68. *In: J. LaRue y R.S. Johnson (eds.). Peach, plums and nectarine, growing and handling for fresh market. University of California.*
- Kabata, A. y H. Pendias. 1984. Trace elements in soils and plants. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida.
- Marschner, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich, Fla., USA.
- McEachern, G.R. 1990. Zinc deficiency: The silent killer. *Pecan South* 24(6): 20-21.
- Medina M., M.D.C. 1995. Deficiencia y toxicidad de nutrientes en el nogal. pp. 11-21. *In: Memorias del 3er Simposium Internacional Nogalero. Torreón, Coahuila.*
- O'Barr, R.D. y K. Hanson. 1978. Hidden hunger finding and correcting it. *Pecan South* 5(1): 20-24.
- Pimentel G., J.O. 1978. Estudio de la deficiencia de zinc en nogal pecanero (*Carya illinoensis* Koch.) en el municipio de Tasquillo Hidalgo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Rathore, P.S. 1991. Pecans. pp. 415-473. *In: Temperate fruits. S.K. Mitra, T.K. Bose y D.S. Rathore (eds.). Horticulture and Allied Publishers, Chakraberia Lane, India.*
- Rodríguez, S.F. 1989. Fertilizantes, nutrición vegetal. AGT Editor S.A., México. pp. 117-127.
- Ryugo, K. 1993. Fruticultura, ciencia y arte. Traducción J. Rodríguez Alcázar. AGT (ed.), México, DF.
- Smith, M.W. y J.B. Storey. 1979. Zinc concentration of pecan leaflets and yield as influenced by zinc source and adjuvants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 104(4): 474-477.
- Spark, D. y J.A. Payne. 1982. Zinc concentration in pecan leaflets associated with zinc deficiency symptoms. *HortScience* 17(4): 670-671.
- Storey, J.B., M.W. Smith, P.N. Westfall, J.D. Hanna, W. Gass y W.C. Anderson. 1973. A new method to increase zinc absorption by pecan leaves. *Pecan Quarterly* 17(2): 10-11.
- Storey, J.B., P.N. Westfall y M.W. Smith. 1979. Why do pecans need zinc? *Pecan Quarterly*. 13(2): 3-9.
- Swietlik, D. y M. Faust. 1984. Foliar nutrition of fruit crops. *Horticultural Reviews* 6: 287-375.
- Uriu, K. 1978. Soil and plant analysis and symptomology for diagnosis of mineral deficiencies and toxicities. p. 95 *In: Pub. 4092. Almond orchard management. Division of Agricultural Science. University of California.*

SURFACE RUNOFF, SOIL EROSION, AND LAND USE IN NORTHEASTERN MEXICO

Escorrentía Superficial, Erosión Edáfica y Uso del Suelo en el Noreste de México

José Návar¹ and Timmothy J. Synnott²

SUMMARY

This study was conducted to determine 1) the effect of changes in land use on surface runoff and soil loss and 2) to fit the Universal Soil Loss Equation to measured soil erosion. In total, 12 runoff plots were established in vertisols with four land uses: 1) agriculture, 2) grasslands, 3) native scrub forests, and 4) forest plantations. The volumes of surface runoff and amounts of eroded soil were measured during 1985. Agricultural lands produced approximately 10 and 40 times more surface runoff and soil erosion, respectively, than the undisturbed native scrub forest. Estimated soil loss for individual rainfalls by the universal soil loss equation deviated from observed amounts of soil erosion for the four types of land use stressing the temporal variations of soil erosion. This research demonstrates the need of establishing soil and water conservation practices in agricultural lands, as well as the need for further local research on these processes on vertisols of northeastern Mexico.

Index words: Land use, USLE, agriculture.

RESUMEN

Este trabajo tuvo por objetivos: 1) determinar el efecto de cambios del uso del suelo en la escorrentía superficial y la erosión edáfica y 2) ajustar la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo de Wischmeier a la erosión observada. En total, 12 lotes de escorrentía superficial se establecieron en vertisoles con cuatro usos: 1) agrícolas, 2) pastizales, 3) matorrales y 4) plantaciones; con tres repeticiones. Los volúmenes de escorrentía superficial y cantidades

de suelo erosionado se midieron durante 1985. Los suelos agrícolas produjeron 10 y 40 veces más volúmenes de escorrentía superficial y cantidades de erosión, respectivamente, que los suelos con los otros usos descritos. La cantidad de suelo erosionado observada y estimada por la Ecuación Universal difirieron, lo cual indica la alta variación temporal de la erosión hídrica en los suelos estudiados. Este trabajo demuestra la necesidad de establecer medidas prácticas de conservación de suelos en terrenos agrícolas y enfatiza la necesidad de continuar investigando estos procesos en vertisoles.

Palabras clave: Uso del suelo, EUPS, agricultura.

INTRODUCTION

The potential disturbance of the hydrologic cycle by changing land use is well documented (Bennett, 1939; Wischmeier *et al.*, 1958; Rose, 1960; Hudson, 1971; Kirkby and Morgan, 1980). Land use changes frequently in the Planicie Costera del Golfo Norte of northeastern Mexico. According to official sources approximately 370 000 ha of forests are being cleared each year in Mexico (SARH, 1992). In the state of Nuevo Leon, 157 875 ha of native scrub forests had been cleared for farming purposes between 1981 and 1986 (Promotora del Desarrollo Rural, 1990). In the Planicie Costera del Golfo Norte of the state of Nuevo Leon, 11.8% of the native scrub forests was cleared between 1975 and 1986.

Degradation of the vegetative cover and increased soil disturbance lead to increasing surface runoff and soil erosion. The impact force of raindrops on bare soil may seal the soil surface, which results in low infiltration rates. Raindrops striking the soil detaches soil particles (Rose, 1960), the detached soil particles may clog soil pores forming a soil crust (Bryan *et al.*, 1984). Displaced fine soil particles are entrapped, which reduces the amount of soil conduits for water entry (Mannering, 1967). Surface runoff transports loose soil material, which increases surface drag, further increasing the amount of loose soil material

¹ Assistant Professor, Faculty of Forest Sciences. Autonomous University of Nuevo Leon. P.O. Box 41, 67700 Linares, N.L. Mexico. Tel. (+821) 24251 and 24895. Fax: (+821) 24251

² Forest Stewardship Council /FSC/Ave Hidalgo 502, 68000 Oaxaca, Oax. México. Tel. (+951) 46905 Fax: (+951) 62110.

Recibido: Abril de 1998.

Aceptado: Diciembre de 2000.

(Bennett, 1939; Hudson, 1971; Greenland and Lal, 1981; Kirkby and Morgan, 1980).

The conversion of native forests into grasslands or croplands also results in hydrological changes. Pereyra (1977) observed increased streamflow and soil moisture by replacing native forests with grasses in East Africa. Increased streamflow with reduced plant cover has also been reported by Hibbert (1967) and Swank *et al.* (1988). Most of these observations involve a great deal of spatial and temporal variations, which makes the hydrological response of a modified plant system unpredictable. This points out the need for further local research on these issues.

Surface runoff and soil erosion have received little attention in the Planicie Costera del Golfo Norte, where no research has been conducted on the vertisols. Consequently, the modeling technology available, in particular the Universal Soil Loss Equation (USLE) to predict these processes is of limited value. This report focuses on: 1) measuring surface runoff and soil erosion of four types of land use, and 2) fitting the USLE to measured soil loss in the four plant communities. The working hypothesis was that the conversion of native forest to agricultural uses would lead to greater amounts of surface runoff and soil loss.

MATERIALS AND METHODS

Study Area

The study was conducted on the property of the Facultad de Ciencias Forestales of Universidad Autónoma de Nuevo León, about 8 km south of Linares (24° 47' N, 99° 32' W; 355 m above sea level)

in the piedmont of the Sierra Madre Oriental in northeastern Mexico. The region belongs to the Planicie Costera del Golfo Norte.

Climate. The region has a subtropical semi-arid climate, with hot summers and severe frosts during some winters. Mean annual rainfall and temperature in Linares city are 805 mm (\pm one standard deviation of 260 mm) and 22.3 °C, respectively, but a strong climatic gradient exists in the region due to the orographic effect of the mountains and the gradual increase in elevation from east to west. Of the total annual precipitation, 80% falls in the period of May to October. Annual potential evapotranspiration, estimated by the method of Thornthwaite (Dunne and Leopold, 1978), is 1150 mm (Návar *et al.*, 1994).

Vegetation. The native vegetation is a diverse, often dense scrub dominated by woody plants (Heiseke, 1986). The dominant genera of sparse grasses are *Bautelova*, *Panicum*, *Setaria*, and *Chloris*. Many species of herbs and shrubs are armored with spines, thorns and prickles. Leguminous trees and shrubs constitute one third of the diverse woody flora (Reid *et al.*, 1990).

Soils. The main landforms are plains and gentle undulating slopes. Soils of the plains and lower slopes are deep, silty clay vertisols with smectite which shrink and swell noticeably in response to changes in soil moisture content. The soil structure is prismatic. On gentle hills and upper slopes, outcrops of Upper Cretaceous mudstone or shale occur, often overlain by silty-clay loams (Reid *et al.*, 1990). The soils are high in potassium, calcium, and magnesium because of their low hydraulic conductivity (Woerner, 1991). Other soil physical and chemical properties are reported in Table 1.

Table 1. Physical characteristics of four vertisols with different land use in northeastern Mexico.

Soil physical parameter	Land use			
	Native scrub forest	Grasslands	Plantations	Agricultural lands
Sand (%)	16.00	20.00	16.00	18.00
Fine sand (%)	11.70	09.80	07.40	08.20
Clay (%)	53.00	54.00	58.00	51.00
Silt (%)	31.00	26.00	26.00	31.00
Field capacity (%)	33.00	33.00	36.00	45.00
Wilting point (%)	24.00	26.00	28.00	24.00
Organic matter (%)	02.90	01.70	01.60	01.50
Slope (%)	04.00	03.50	03.50	04.00
Bulk density (1 to 10 cm)	01.14	01.10	01.04	01.07
Bulk density (30 to 40 cm)	01.20	01.22	01.11	01.47

Experimental Design

Twelve rectangular runoff plots of 2 x 10 m were placed on soils with similar texture on 4% slopes. The experimental plots were placed close together in an area with radius of approximately 200 m. In 1980, the area was cleared of the native plant cover for agriculture, grasslands and forest plantations. Thus, land use types tested were 1) native scrub forest, 2) agricultural land, 3) native grasslands, and 4) tree plantations each with three replicates. *Sorghum vulgare* and *Leucaena leucocephala* are the main crops in agricultural lands and experimental plantations, respectively. *Sorghum vulgare* was rainfed with a cropping period of about six months and a fallow of bare soil. Tree crops were only two years old. Soil is conventionally tilled in agricultural lands unlike the other treatments.

Rectangular erosion test plots have been used for more than 50 years (Hudson 1971; Kirkby and Morgan, 1980). The rectangular experimental plots were constructed with galvanized sheets inserted 15 cm into the soil and extending 15 cm above the soil. A trough for collection of water and sediments was located at the lower end of each sample plot. The trough had a lateral salient, which was inserted into the soil lateral face, to avoid leakage of water and sediments. The top part of the trough was covered with wood to avoid soil splashing. Collected water and sediments were conducted to the collection system via a 4 cm-diameter pipe. The collection system consisted of two tanks with a capacity of 300 L (15 mm of runoff from a given experimental unit). Rainfall intensity was measured with a recording raingauge placed in a climatological station located within 250 m of the soil erosion plots.

Data Analysis

Surface runoff and soil erosion data were collected during 1985, but only nine storms resulted in measurable surface runoff and soil erosion. The data were subjected to a randomized analysis of variance with subsamples. Some data was misleading because of flooding in some replicates and other anomalies. These data were discarded so the analysis of variance was applied to unequal subsample numbers. This type of analysis of variance contains the experimental and sampling errors. These are a measure of the variation within and between replicates, respectively. The analysis of variance resulted in a larger sampling error

than the experimental error although the F ratio between these two errors was not statistically significant. Therefore the denominator of the F ratio was tested with a pooled experimental error (Steel and Torrie, 1980). Orthogonal contrasts were used for planned comparisons. Comparisons involved native scrub forest versus the rest of the types of land use; native scrub forest and experimental plantation versus agricultural lands and grasslands and agricultural lands versus the rest of the other types of land use. Soil loss and surface runoff are a function of rainfall intensity, kinetic energy, and antecedent soil moisture, among others (Wischmeier *et al.*, 1958; Hudson 1971; Greenland and Lal, 1981). Hence the data must have been tested by a covariance analysis. The soil loss and surface runoff data, however, were not adequate to fit statistical relationships with rainfall intensity or kinetic energy.

The probabilities of the analysis of variance and the orthogonal contrasts are reported as $P > F = \int_0^F f(F) df$; the mathematical function $f(F)$ has the limits $0 \rightarrow F$.

Fitting the Universal Soil Loss Equation

The USLE has been described by Morgan (1979) and Kirkby and Morgan (1980) as follows:

$$E = (0.224)R.K.L.S.C.P$$

where:

E = Soil loss ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

R = Rainfall erosivity index (dmless)

K = Soil erodability index (dmless)

L = Factor of slope length (dmless)

S = Factor of slopes Steepness (dmless)

C = Crop factor (dmless)

P = Conservation practice factor (dmless).

The rainfall erosivity index, R, was estimated by the procedure described by Kirkby and Morgan (1980) as follows:

$$R = \frac{\left[\sum_{j=1}^n (1.213 + 0.890 \log_{10} I_j) (I_j T_j) \right] I_{30}}{(173.6)}$$

where:

I_j = Rainfall intensity for a specific time interval (mm h^{-1})

T_j = Time interval (h)

I_{30} = Maximum rainfall intensity in 30 minutes (mm h^{-1}).

The soil erodability index was estimated using the soil physical characteristics reported in Table 1, with a permeability factor of 3, and using the nomograph reported by Kirkby and Morgan (1980). This procedure assumes that the soil structure is similar for the land uses studied. The factor of slope and length were combined in a single index, which was estimated using the nomograph given by Kirkby and Morgan (1980). Because of a lack of information on the crop factor (C), it was estimated by fitting the USLE to measured soil erosion and using C values iteratively. The C value, which resulted in similar observed and estimated total soil loss, was used. The conservation practice factor, P, was 1.0 for all types of land use because of the lack of soil conservation measures on the land uses studied.

Procedure

Runoff and eroded soil were collected within 24 hours of each event. Volume of collected water was measured with a calibrated bucket. The sediments were collected and taken to the laboratory and the oven-dried weight of sediment was recorded. Using the rainfall intensity charts, hyetographs, the storms were divided in time intervals of 30 minutes to estimate R.

RESULTS AND DISCUSSION

Total annual precipitation for 1985 was 910 mm, which can be considered a normal rainfall year

because it was within one standard deviation of the annual average (805 ± 260 mm) for the climatological station at Linares, Nuevo Leon, Mexico. Of the 70 storms recorded during the year, 15 had more than 20 mm in rainfall amount and of these, 10 had rainfall intensities above 20 mm h^{-1} , considering the 30 minutes time interval. Only nine rainfall events produced measurable surface runoff and soil loss. The storms in March, April, early May, September, and October fell as a result of frontal activity in the area. Rains of June, July, and August were produced by convective and tropical systems in the region.

Collected depths of surface runoff and amounts of soil loss decreased in the following order: agricultural lands, forest plantations, grasslands and native scrub forest (Table 2). Surface runoff in the agricultural land, plantations and grasslands was respectively 21, 1.80, and 0.11 mm greater than in the native scrub forest. Soil loss increased approximately 7669, 610, and 592 $\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ in agricultural lands, experimental plantations, and grasslands, respectively, in relation to native scrub forests.

Surface runoff was greater in agricultural lands ($P > F = 0.0001$). The soil of agricultural land is tilled, which results in the compaction of lower soil horizons (note the higher soil bulk density at 35 cm of soil depth in agricultural lands in Table 1). Soil compaction decreases pore sizes and completely eliminates some of the largest pores (Van Doren, 1976; Hillel 1980; Reickoski *et al.*, 1981; Voorhes and Lindstrom 1984; Blackwell *et al.*, 1985; Allegre *et al.*, 1986). Hence, compaction increases water retention by the capillary effect. Therefore rainfalls

Table 2. Observed amounts of surface runoff and soil erosion for vertisols with four types of land use in northeastern Mexico.

Rainfall Event	Surface runoff				Soil erosion			
	Native scrub forest	Plantations	Agriculture	Grasslands	Native scrub forest	Plantations	Agriculture	Grasslands
mm					kg ha ⁻¹			
1	0.462	0.900	0.850	0.825	90.2	195.8	1600.0	124.3
2	0.317	0.116	0.088	0.096	12.4	064.5	0110.9	070.3
3	0.451	1.550	4.626	0.712	32.8	064.5	1125.8	163.0
4	0.280	0.627	0.325	0.176	25.2	399.3	0199.5	014.0
5	0.094	0.406	0.000	0.199	08.8	082.0	1985.0	013.3
6	0.000	0.055	0.299	0.000	00.0	009.8	0051.6	000.0
7	0.000	0.000	0.210	0.000	00.0	011.5	0017.5	000.0
8	0.243	0.080	13.240	0.000	17.4	000.0	2034.3	006.0
9	0.118	0.000	4.165	0.000	03.7	000.0	0735.3	000.0
Total	1.968	3.735	23.808	2.010	190.4	800.5	7859.0	781.9

saturate the soil profile quicker in agricultural lands than in the other types of land use producing more surface runoff.

Total annual surface runoff was 0.24, 0.46, 2.96, and 0.25% of the mean annual precipitation or 0.53, 1.00, 6.42, and 0.54% of the amount of the nine surface runoff-producing storms, for native scrub forest, experimental plantations, agricultural land, and grassland, respectively. These percentages are low in comparison to observations in other ecosystems (Bennett, 1939; Pereyra 1977; Dunne and Leopold, 1978; Swank *et al.*, 1988). However, the effect of vegetative cover was statistically significant ($P > F = 0.10$). Surface runoff was higher in agricultural lands and grasslands, herbaceous cover, in contrast to native scrub forest and forest plantations, shrubby cover. Surface runoff appears to be a function of the antecedent soil moisture content rather than on the infiltration rate. Because *Sorghum vulgare* and *Baulelova* spp and *Setaria* spp demand less soil moisture than native scrub forests and forest plantations, rainfalls satisfy quicker the soil moisture deficit generating more surface runoff in the former plant communities. Hibbert (1967), Pereyra (1977), and Swank *et al.* (1988), also pointed out that the replacement of shrubs and trees by grasses and crops increased stormflow in east Africa and eastern United States because of savings in soil moisture.

Soil loss in native scrub forest was the least ($P > F = 0.10$). Soil loss also was less in native scrub forest and experimental plantations than in agricultural lands and grasslands ($P > F = 0.05$). Even though plant cover was not measured, the type of vegetative

cover appears to be an important control of aggregate stability. Soil loss from agricultural land was the greatest in comparison to the other types of land use ($P > F = 0.0001$). Tillage operations break up the soil aggregates exposing soil particles to splashing and transport. These processes are however limited in time and space.

Other researchers have measured, in similar experimental plots, in Central Mexico, similar rates of soil loss in agricultural lands, but his measurements in grasslands and native forests were lower than our measurements in similar treatments.

Fitting the USLE

The crop factor, C, fitted to total measured soil loss were 0.00325, 0.0133, 0.0105, and 0.014 for native scrub forests, forest plantations, agricultural lands, and grasslands, respectively. The C factor for agricultural lands is much smaller than that observed in other places (Morgan, 1979; Kirkby and Morgan, 1980). However C figures reported in this paper are appropriate for daily rainfall events while C values reported by other researchers (Kirkby and Morgan, 1980) are appropriate for other temporal scales; monthly, seasonal or annual. Estimated soil loss for individual rainfalls did not match observed soil loss (Table 3). The standard deviations, estimated between measured and observed soil loss, for all nine rainfalls were 30, 167, 443, and 179 $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$, for native scrub forests, forest plantations, agricultural lands and grasslands, respectively. Rainfall Event 3 had similar rainfall intensity than rainfall Event 8, however, the

Table 3. Rainfall characteristics and estimated amounts of soil erosion in vertisols with four types of land use in northeastern Mexico.

Rainfall Event	Rainfall characteristics			Soil erosion estimated by USLE			
	Amount	Intensity	Erosivity	Native scrub forest	Plantations	Agriculture	Grasslands
	mm	mm h^{-1}	dmless	kg ha^{-1}			
1	60.0	22.0	096.9	33.8	144.4	1413.0	139.8
2	20.0	12.2	002.9	01.0	004.4	0042.8	004.2
3	34.0	62.6	033.5	11.7	049.9	0489.2	048.4
4	70.8	50.4	050.6	17.7	075.4	0737.8	072.9
5	50.4	36.8	126.2	44.1	188.0	1841.0	182.1
6	30.3	50.4	022.6	07.9	033.7	0330.1	032.7
7	21.0	23.0	005.6	01.9	008.4	0082.2	008.1
8	68.5	63.2	187.2	65.4	278.8	2729.0	270.0
9	28.8	40.0	015.8	05.5	023.6	0231.2	022.9
Total				189.2	806.8	7898.3	781.3

latter produced soil erosion five times larger. The difference is explained by the rainfall erosivity index of rainfall Event 8, which is also five times larger than that of rainfall Event 4. Observed soil erosion for rainfall Event 1 is the highest even though the rainfall erosivity index is 50% of the highest erosivity recorded. The spatial and temporal variations of detachment, transport and availability of soil to be transported, as well as of the temporal infiltration variability of the vertisols may explain the temporal variations of soil erosion as well as the lack of matching between measured and estimated soil loss.

Rainfall intensities larger than 20 mm h⁻¹ produced surface runoff and soil loss and only three rainfall events produced approximately 61% of the total annual soil erosion and 60% of the total surface runoff from agricultural lands. Hudson (1971) reported that one storm in Missouri and two storms in Zimbabwe produced 50% of soil loss in five years. Suárez De Castro (1980) observed, in tropical Colombia, that 9.9% of the annual precipitation produced 88.7% of the total soil loss. Kirkby and Morgan (1980) observed, in England, that one storm produced 17%, two storms 32% and 10 storms 99% of the total annual soil loss.

CONCLUSIONS

Surface runoff and soil loss increase when native scrub forests are cleared for agriculture, grasslands and forest plantations. In this study, the highest surface runoff and soil loss was produced in agricultural lands. Tillage operations appeared to be the single most important factor controlling these processes. However, more than half of the surface runoff and soil loss occurred during three rainfall events in agricultural lands, which must be considered for soil conservation practices. Additional research is needed on the spatial and temporal variations of these processes.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by Universidad Autónoma de Nuevo León at Linares through research grant CT99-203. Crecencio Reyna and Guadalupe Ramírez are thanked for their help in the data collection. Dr. E. Jurado is also thanked for the revision of the manuscript.

REFERENCES

- Allegre J., C., D.K. Cassel, and D.E. Brandy. 1986. Effects of land clearing on subsequent management on soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1379-1384.
- Bennett, H.H. 1939. *Soil conservation*. McGraw Hill, New York.
- Blackwell, P.J., M.A. Ward., R.N. Lefevre, and D.J. Cowan. 1985. Compaction of a swelling clay soil by agricultural traffic: effects upon conditions for growth of winter cereals and evidence for some recovery of structure. *Soil Sci.* 36: 633-650.
- Bryan, R.B., A.C. Imeson, and I.A. Campbell. 1984. Solute release and sediment entrainment on microcatchments in the Dinosaur Park Badlands Alberta, Canada. *Hydrology* 71: 79-106.
- Dunne, T. and L.B. Leopold. 1978. *Water in environmental planning*. W.H. Freeman, New York.
- Greenland, D.J. and R. Lal 1981. *Soil conservation and management in the humid tropics*. John Wiley, New York.
- Heiseke, D. 1986. Regeneración por rebrotes en dos tipos de matorral del noreste de México. *Scr. Forstl. Fak. Univ. Göttingen Niedersachi. Forstl. Versuchsanst* 84: 184-199.
- Hibbert, A.R. 1967. Forest treatment effects on water yield. pp 527-543. *In: Proc. Int. Symp. For. Hydrol.* Penn. State University. Pergamon Press, Toronto.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, New York.
- Hudson, N.W. 1971. *Soil conservation*. Cornell University Press, Ithaca, New York.
- Kirkby, M.J. and R.P.C. Morgan. 1980. *Erosión de suelos*. Limusa, México.
- Mannering, J.V. 1967. The relationships of some physical and chemical properties of soil to surface sealing. Unpublished Ph. D. Dissertation. Purdue University.
- Morgan, R.P.C. 1979. *Soil erosion. Topics in applied geography*. Longman, New York.
- Návar, J., T. Cavazos, and P. Domínguez A. 1994. Las precipitaciones mensuales con tres probabilidades estimadas por la distribución gamma y su regionalización en el estado de Nuevo León. *In: C. Pola S., J.A. Ramirez F., M.M. Angel R., and I. Navarro L. (eds.) UANL, Linares. Actas Fac. Ciencias Tierra* 8: 71-82.
- Pereyra, H.C. 1977. *Land use and water resources*. Cambridge University Press, New York.
- Promotora del Desarrollo Rural. 1990. *Cifras sobre los desmontes en el estado de Nuevo León*. Monterrey, N.L., México.
- Reickoski, D.C., W.B. Voorhes, and J.K. Radke. 1981. Unsaturated water flow through a simulated wheel track. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 3-8.
- Reid, N., D.M. Stafford Smith, P. Beyer-Munzel, and J. Marroquin. 1990. Floristic and structural variation in the rainfall intensity than rainfall Event 8, however, the Tamaulipan thornscrub, northeastern Mexico. *Vegetation Sci.* 1: 529-538.
- Rose, C.W. 1960. Soil detachment by rainfall. *Soil Sci.* 89:28-31.
- SARH (Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1992. *México forestal en cifras*. México.
- Steel, R.G.D. and J.H. Torrie. 1980. *Principles and procedures of statistics. A biometrical approach*. McGraw Hill, New York.

- Suárez De Castro, F. 1980. Conservación de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Swank, W.T., L.W. Swift, and J.E. Douglass. 1988. Streamflow changes associated with forest cutting, species conversions, and natural disturbances. pp. 297-312. *In*: W.T. Swank and D.A. Crossley Jr. (eds). Forest hydrology and ecology at Coweeta. Springer Verlag, New York.
- Van Doren, D.M. 1976. Influence of traffic on soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29: 595-597.
- Voorhes, W.B. and M.J. Lindstrom. 1984. Long-term effects of tillage on soil tilth independent on wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 152-156.
- Wischmeier, W.H., D.D. Smith, and R.E. Uhland. 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation. *Agric. Engin.* 39: 458-462.
- Woerner, M. 1991. Los suelos bajo vegetación de matorral del noreste de México, descritos a través de ejemplos en el campus universitario de la UANL, Linares, N.L. Reporte Científico No 22. Facultad de Ciencias Forestales, Linares, N.L., México.

SOIL INFILTRATION AND LAND USE IN LINARES, N.L., MEXICO

Infiltración y Uso del Suelo en Linares, N.L., México

José Nívar¹ and Timothy J. Synnott²

SUMMARY

The aim of this study was to fit four infiltration models to 96 observed infiltration trials, as well as to determine the effect of four types of land use on the infiltration rate of vertisols in the northeastern part of Mexico. Infiltration tests were conducted using double ring constant-head infiltrometers during the period July to November 1985 on the property of the Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). The land use types tested were agricultural lands, grasslands, native scrub forests and forest plantations. The infiltration models of Green and Ampt, modified from Kostiakov, Horton, and Philip, were fitted to observed infiltration data. The statistical parameters of the infiltration models were estimated using non-linear least square techniques. A covariance analysis was conducted on the best fitting model to test for differences in the infiltration rate among the studied land uses. The results showed, based on the coefficients of determination, the standard errors, the probability of the fitted parameters and the independence, normality and common variance of errors, that the modified model of Kostiakov fitted the observed infiltration data best. The variance analysis indicated that the final infiltration rates were higher and more variable in vertisols of agricultural lands, grasslands, and forest plantations than in vertisols of native scrub forests. The likely explanation for this behavior was the differential dynamic contribution of soil cracks to the infiltration of water among land uses.

Index words: Tamaulipan thornscrub, agriculture, grasslands, forest plantations, Kostiakov model, plains of the northern Gulf of Mexico.

¹ Corresponding author. Forest Hydrology and Watershed Management, Facultad de Ciencias Forestales-UANL. Apartado Postal 41, 67700 Linares, N.L. México.

² F.S.C. Director Ejecutivo. Avenida Hidalgo 502. Oaxaca, Oaxaca, México.

Recibido: Mayo de 1998.

Aceptado: Diciembre de 2000.

RESUMEN

Los objetivos de este estudio fueron ajustar cuatro modelos no-lineales a 96 pruebas de infiltración y determinar el efecto del uso del suelo en la tasa de infiltración de vertisoles del nordeste de México. Las pruebas de infiltración se realizaron con el uso de infiltómetros dobles de carga constante durante el periodo de julio a noviembre de 1985 en la propiedad agrícola de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Los usos del suelo probados fueron: terrenos agrícolas, pastizales, matorrales y plantaciones forestales. Los modelos de infiltración de Green and Ampt, modificado de Kostiakov, Horton y Philip fueron ajustados a los datos de infiltración. Los parámetros estadísticos de los modelos fueron estimados usando mínimos cuadrados en regresión no-lineal. Las diferencias en las tasas de infiltración fueron probadas por medio de un análisis de varianza realizado con las tasas finales de infiltración. Los resultados demostraron, basados en el coeficiente de determinación, el error estándar, la probabilidad de los parámetros ajustados y la independencia, normalidad y varianza común de los errores, que el modelo modificado de Kostiakov se ajustó mejor a las tasas de infiltración observadas. El análisis de varianza indicó que las tasas finales de infiltración fueron mayores y más variables en vertisoles con usos agrícolas, plantaciones forestales o pastizales que aquellas de los vertisoles de los matorrales. La explicación probable a este comportamiento fue la contribución dinámica diferencial de las grietas de desecación en la infiltración de suelos entre los usos del suelo.

Palabras clave: Matorral tamaulipeco, agricultura, pastizales, plantaciones forestales, modelo de Kostiakov, planicies del norte del Golfo de México.

INTRODUCTION

Infiltration is the process of water entry into the soil (Hillel, 1980). The rate of this process, relative to the rate of water supply, determines how much water

will enter the unsaturated soil zone, and how much, if any, will runoff (Hillel, 1982). Therefore, this soil physical parameter is of paramount importance to the water economy of plant communities, recharge of aquifers, surface runoff, soil erosion, and the fate of pollutants in the environment.

Land use controls the infiltration of soils. Plowing agricultural lands produces soil compaction (Voorhes and Lindstrom, 1984; Blackwell *et al.*, 1985; Allegre *et al.*, 1986; Hartge, 1988), reducing soil porosity through the partial expulsion of permeating fluids, air and water. Because density of the largest soil pores is reduced by the compaction mechanism, the infiltration rate is also diminished (Hillel, 1982; Hartge, 1988).

Livestock grazing on rangelands has the potential effect of reducing the infiltration of soils (Thurow *et al.*, 1988; Wood *et al.*, 1989; Takar *et al.*, 1990) because of disturbances on soil and plant cover. Trampling promotes surface soil compaction and sealing (Warren *et al.*, 1986). Grazing pressure removes shrubs, herbs, and grasses and controls the major input of organic matter to the soil surface. The exposure of bare soil to climate variations enhances soil crusting and slaking. Therefore, infiltration of soils is lower on bare soil than beneath trees and shrubs (Blackburn, 1984).

Land use frequently changes in vertisolic soils of northeastern Mexico. In the state of 'Nuevo Leon', the Undersecretary for Rural Development reported that 157 875 ha had been cleared for farming purposes between 1981 and 1986. Maldonado (1992) observed that 11.8 % of the land in the Coastal Plain of the northern Gulf of Mexico of the state of 'Nuevo Leon' was cleared between 1975 and 1986.

Considering the dynamic change in land use, it is of critical importance to study and forecast the infiltration rate of vertisols in the Coastal Plain of the northern Gulf of Mexico, where no research has been conducted on this issue. But forecasting infiltration in vertisols is complicated because of swelling and shrinking in response to soil moisture content. Swelling processes cause expansion of soil particles and close soil pores to water entry (Hillel, 1980). Soil shrinkage promotes cracks, changing the distribution of pore size, and increases water entry into the soil (Beven and Germann, 1982). Hence, physically-based models describing the infiltration rate of vertisols are scarce and complicated. However, several empirically-based equations describing the infiltration process, including

Green & Ampt, Kostiakov, Horton, and Holtan, as well as the more physically-based equation of Philip (Hillel, 1982), are available to be fitted to observed infiltration data.

This study focused on: 1) fitting four infiltration models to observed infiltration data and 2) determining the effect of land use on the infiltration rate.

MATERIALS AND METHODS

Characteristics of the Research Area

The research was conducted on the property of the Faculty of Forest Sciences of the 'Universidad Autónoma de Nuevo León' (UANL), about 8 km south of Linares (24° 47' N 99° 32' W; 355 m above sea level) in the piedmont of the Sierra Madre Oriental in the northeastern of Mexico. The region is located on the Coastal Plain of the northern Gulf of Mexico. The region has a subtropical semi-arid climate, with hot summers and severe frosts in some winters. Mean annual rainfall in Linares is 805 mm (\pm s.d. = 260 mm) and mean annual temperature of 22.3 °C. A strong climatic gradient exists on the coastal plain due to the orographic effect of the Sierra and the gradual increase in elevation from East to West (Návar *et al.*, 1994a). Of the total annual precipitation, 80 % falls during May-October. Annual potential evapotranspiration, estimated by the method of Thornthwaite, is 1150 mm (Návar *et al.*, 1994b).

Approximately 80 % of the UANL-property (1500 ha) was cleared in 1980 for agriculture, grazing, and forest plantations. *Sorghum vulgare*, *Leucaena leucocephala*, and *Cenchrus ciliaris* are the main crops, in agricultural lands, experimental plantations, and introduced grasslands, respectively. *Sorghum vulgare* was growing in agricultural lands when the infiltration trials were conducted. Native grasses in cleared lands include the genera *Bouteloua*, *Panicum*, *Setaria*, and *Chloris*.

The native scrub forest, named Tamaulipan thorn scrub, is a diverse, often dense vegetation, dominated by woody plants (Heiseke, 1986). Some 80 species of shrubs and trees, ranging in height from 1 to 5 m, are commonly encountered. Legume trees and shrubs constitute one third of the diverse woody flora (Reid *et al.*, 1990).

The infiltration tests were conducted on vertisols of similar texture and content of organic matter (Table 1),

Table 1. Physical parameters measured in vertisols with four land uses in northeastern Mexico.

Soil physical parameter	Land use			
	Native scrub forest	Grasslands	Plantations	Agriculture
Sand (%)	16.00	20.00	16.00	18.00
Fine sand (%)	11.70	09.80	07.40	08.20
Clay (%)	53.00	54.00	58.00	51.00
Silt (%)	31.00	26.00	26.00	31.00
Field capacity (%)	33.00	33.00	36.00	45.00
Wilting point (%)	24.00	26.00	28.00	24.00
Organic matter (%)	02.90	01.70	01.60	01.50
Slope (%)	04.00	03.50	03.50	04.00
Bulk density (0 to 15 cm) (g cm ⁻³)	01.14	01.10	01.04	01.07
Bulk density (25 to 40 cm) (g cm ⁻³)	01.20	01.22	01.11	01.47

in an area with a radius of approximately 200 m, where the four major types of land use converge. Infiltration tests were carried out on gentle plains with 2 to 4 % of average slope. Soils of the plains and lower slopes are mainly dark gray, deep, silty clay vertisols with smectite, which shrink and swell noticeably in response to changes in soil moisture content (Woerner, 1991), and present structure of the prismatic type.

Experimental Design

Infiltration tests were conducted using double ring, constant head, infiltrometers. The sizes of the inner and outer infiltrometer rings were 20.5 and 31.0 cm in diameter and 23 and 39 cm in height, respectively. The water depth above the soil surface was kept constant, approximately between 7 and 13 cm, during the infiltration tests. In total, 96 infiltration tests; four treatments, eight trials, and three replicates, were conducted from July to November, 1985. Land uses, considered as treatments, tested were the following: 1) native scrub forests, 2) agricultural lands, 3) native grasslands, and 4) forest plantations. Trials were considered the different dates when infiltration tests were conducted. Three replicates were conducted in each of eight dates in each of four treatments.

Procedure

The depth of water in the inner infiltrometer ring and the depth of added water were recorded every minute during the first 20 minutes and every two to five minutes thereafter for 125 minutes. Readings of water depth were taken using a ruler attached to the inner infiltrometer ring. Antecedent soil moisture content was measured weekly from volumetric soil

samples and neutron probes from June to December of 1985. Volumetric soil samples and neutron probe readings were taken at 0.30, 0.60, and 0.90 m of soil depths.

Statistical Analysis

Fitting four infiltration models. The infiltration models of Green and Ampt, the modified Kostiakov, Horton, and Philip were fitted to the collected infiltration data. The model proposed by Green and Ampt (Hillel, 1980) is:

$$i = ic + \frac{b}{I}$$

The model of Kostiakov has been subsequently modified to predict the vertical infiltration rate as follows:

$$i = Bt^n + ic$$

The third infiltration model is due to Horton (1940),

$$i = (i_0 - ic)e^{-kt} + ic$$

The fourth equation is a truncated form of the series presented by Philip (1957),

$$i = ic + \frac{S}{2t^{1/2}}$$

Where: i = the infiltration rate (LT⁻¹), ic = the asymptotic steady infiltration flux (LT⁻¹), I = the

cumulative infiltration rate: $I = \sum i dt$, $t =$ time (T), $i_0 =$ the initial infiltration rate (LT^{-1}), b , B , n , k , and s are characterizing constants.

Two characterizing constants, to carry out the appropriate comparisons, were statistically estimated using least square technique in nonlinear models by the simplex methodology (Wilkinson, 1989). These were: i_0 and b , B and n , i_0 and k , and i_0 and s for the Green & Ampt, Kostiakov, Horton and Philip infiltration models, respectively. The other parameters were graphically estimated from the observed data. The goodness of fit tests were conducted by comparing the coefficients of determination, r^2 , standard error, S_x , and the probability of the estimated parameters, as well as by revising the errors for normality, independence, and common variance. Normality tests were conducted using the Shapiro-Wilks test in SAS (1985), whereas independence and common variance were studied by checking plots of predicted *versus* observed infiltration rates.

To test the differences on the infiltration rates of vertisols among land uses, a covariance analysis was conducted on the best fitting infiltration model. This statistical procedure was conducted in SAS using the GLM procedure. Because i_0 was graphically estimated on the best fitted model of Kostiakov, a variance analysis was conducted to test the effect of land uses on the final infiltration rate. The analysis was conducted with the log transformed i_0 data because it distributed log-normally. The abbreviations used in this report are: $X_p =$ mean, $X_g =$ geometric mean, S.D = standard deviation, C.V = coefficient of variation, $P > F =$ probability of a larger value than F.

RESULTS AND DISCUSSION

The infiltration rates of studied vertisols for all land uses for four trials are displayed herein for observation (Figure 1). However, the discussion focuses on all 24 infiltration tests for all four treatments. The infiltration rates were highly variable and declined at different rates between and within treatments. Infiltration curves decayed and attained a steady final infiltration rate quickly, in less than 10 minutes, for vertisols of native scrub forest. Vertisols of agricultural lands, forest plantations, and grasslands achieved the final steady infiltration rate in less than 35 minutes. In the latter treatments, the

infiltration curves also declined quickly but only when the antecedent soil moisture content was high.

Fitting the Infiltration Models

An example of the four models fitted to infiltration data for all treatments is reported in Figure 2. The average statistics, r^2 and S_x , for the four infiltration models for all 96 infiltration tests showed that Kostiakov's model fitted best the infiltration data (Table 2). The average coefficients of determination were: 0.79, 0.87, 0.86, and 0.84 for the infiltration models of Green and Ampt, Kostiakov, Horton, and Philip, respectively. The average standard errors due to the model prediction were: 123, 85, 116, and 127 $mm\ h^{-1}$ for the Green and Ampt, modified Kostiakov, Horton and Philip, respectively. The deviations between observed and predicted infiltration rates distributed more normally and showed themselves to be more independent in the model of Kostiakov than those of the other infiltration models.

The number of estimated parameters with no statistical significance ($P > t > 0.05$) for the infiltration models of Green and Ampt, modified Kostiakov, Horton, and Philip were: 18, 26, 6, and 23, or the 9.3%, 13.5%, 3.2%, and 11.5% of the number of parameters estimated, respectively. That is, the Horton's infiltration model consistently showed statistically significant estimated parameters.

Fitted parameters i_0 , n , i_0 , and i_0 for the infiltration models of Green and Ampt, Kostiakov, Horton, and Philip, respectively, showed the least statistical significance. The final steady infiltration rate, i_0 , estimated by the infiltration model of Horton, approached more closely the observed final infiltration rate. Estimated and observed average figures were 154 and 158 $mm\ h^{-1}$ with standard deviations of 180 and 120 $mm\ h^{-1}$, respectively. Estimated final infiltration rates estimated by the Green and Ampt or Philip infiltration models were sometimes positive and sometimes negative, indicating the inappropriateness of the statistical estimation.

Problems in fitting the modified Kostiakov parameters, B and n , to observed infiltration data arose when infiltration trials were conducted on dry antecedent soil moisture contents, where the final infiltration rates took more time to attain a steady infiltration rate. It was also more problematic to fit this

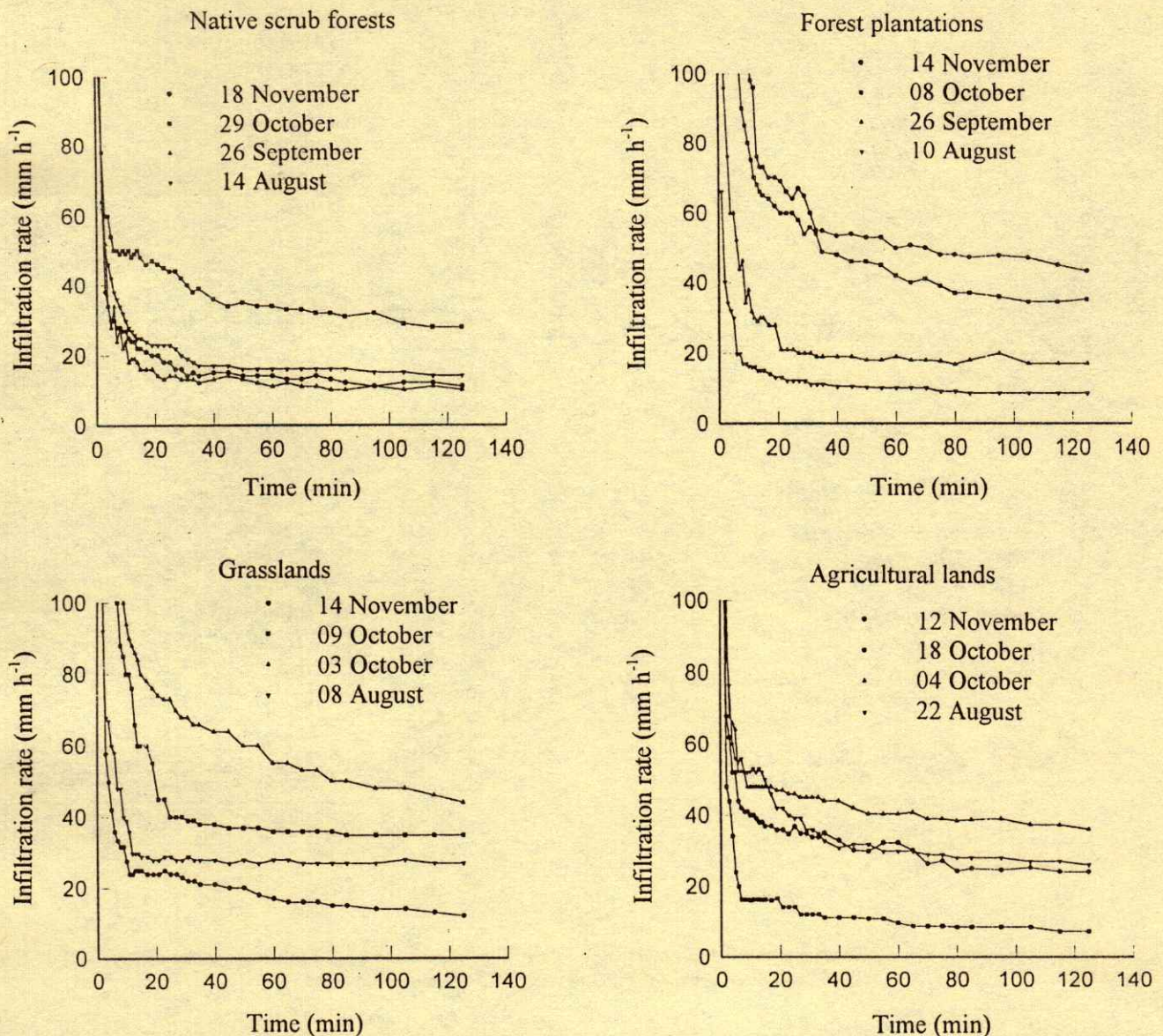


Figure 1. Infiltration curves for four trials and four land uses in vertisols of northeastern Mexico.

model to infiltration rates of vertisols of grasslands and forests plantations than to infiltration rates of vertisols of agricultural lands and native scrub forests. Problems in fitting the models of Green and Ampt and Philip to observed infiltration data became apparent when the final infiltration data did not attain a steady, final constant value.

The covariance analysis conducted on the modified model of Kostikov showed that the intercepts and slopes did not show a statistical difference ($P > F = 0.25$; $P > F = 0.18$, respectively). However, the analysis of variance on the final infiltration rates

presented statistical differences among the various land uses. Vertisols of native scrub forest showed a lower mean final infiltration rate than vertisols with the other types of land use ($P > F = 0.021$). The final infiltration rates of the studied vertisols suited a log-normal distribution better. Thus, the geometric mean for each type of land use decreased in the following order: agricultural lands ($X_g = 257.3 \text{ mm h}^{-1}$ s.d = 102 mm h^{-1}), grasslands ($X_g = 215.7 \text{ mm h}^{-1}$ s.d = 139 mm h^{-1}), forest plantations ($X_g = 201.4 \text{ mm h}^{-1}$ s.d = 131 mm h^{-1}) and native scrub forest ($X_g = 112.8 \text{ mm h}^{-1}$ s.d = 73 mm h^{-1}).

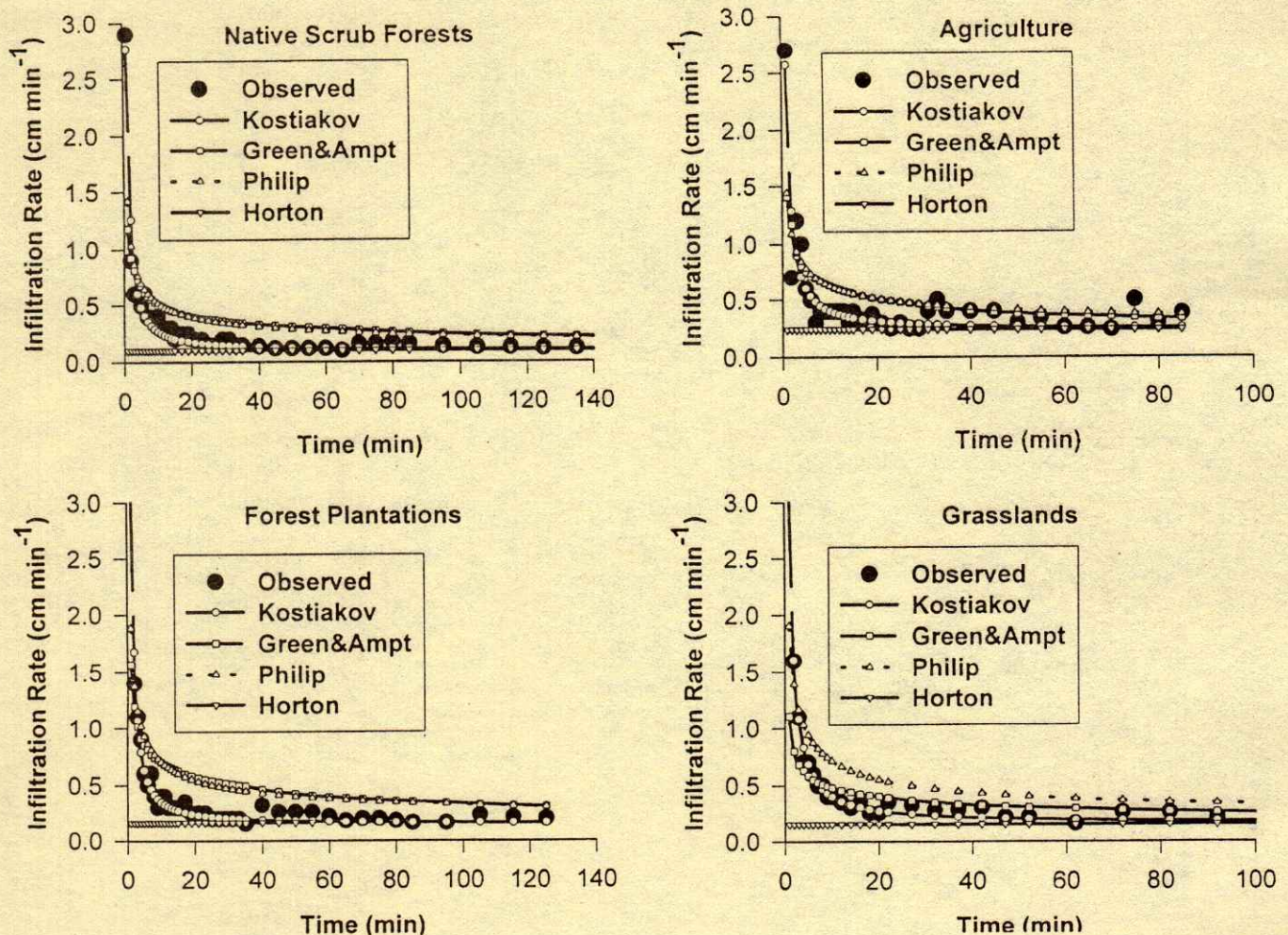


Figure 2. The models of Green and Ampt, Kostiakov, Horton and Philip fitted to observed infiltration data for one trial in vertisolic soils of Linares, NL, Mexico.

Fitting the modified version of Kostiakov's model has the disadvantage of statistically estimating three parameters. Parameters B and n , which describes the initial infiltration rate, at times $t=1$ and the rate of decay, fitted a lognormal distribution better with a geometric average of 1575 mm h^{-1} and $-0.9513 \text{ mm h}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ with a standard deviation of 1491 mm h^{-1} and $0.61 \text{ mm h}^{-1} \text{ sec}^{-1}$, respectively. The mean observed and estimated final infiltration rate appeared to fit a bimodal probabilistic distribution function. It could have been the result of soil shrinkage cracks on dry soils contributing to the infiltration of water beneath the infiltrometers. In general, this version of Kostiakov's model describes physically better the vertical infiltration rate of the vertisols studied than the

two parameter empirical equation of Kostiakov used by Naeth *et al.* (1991) in Alberta.

The final infiltration rates were smaller and less variable in vertisols of native scrub forest than those of grasslands, forest plantations and agricultural lands. This presents a strong contrast to previous experience in this field. Lower final infiltration rates in soils of native scrub forests may be partially explained by the organic matter content of the vertisols studied (Table 1). Fewer or smaller soil cracks of desiccation, which dominate the infiltration rate, develop in vertisols with higher contents of organic matter. Davidson and Page (1956), El-Swaify and Emerson (1975), and Kimmer and Greenland (1976) associated the magnitude of the potential volume change of

Table 2. Average statistics of four infiltration models fitted to 96 trials conducted in vertisolic soils with four land uses.

Model	Parameter	Land use			
		Agriculture	Plantations	Native scrub forests	Grasslands
Green and Ampt	r^2	0.80	0.80	0.80	0.76
	S_x	91	109	105	188
Kostiakov	r^2	0.79	0.84	0.96	0.87
	S_x	67	119	48	106
Horton	r^2	0.80	0.96	0.85	0.82
	S_x	101	48	107	209
Philip	r^2	0.83	0.87	0.86	0.78
	S_x	88	106	113	200

vertisols to their organic matter content. Changes in pore size distribution have been associated to the potential volume of soils (Blake *et al.*, 1973; Kissel *et al.*, 1973). That is, dry vertisols with high contents of organic matter would have a more rigid soil matrix with fewer and/or smaller soil desiccation cracks. Therefore, the final infiltration rate would be less dependent on antecedent soil moisture content (there was statistical evidence on this relation for vertisols of native scrub forest). The rate of closing soil desiccation cracks during the wetting process may also be different in vertisols with different land uses. Therefore, soil desiccation cracks may not have closed during the 125 minutes of having conducted the infiltration tests. This probably explains the large final infiltration rates observed in this study for antecedent soil moisture contents below field capacity.

CONCLUSIONS

This report showed that the infiltration rate can be predicted by using the modified model of Kostiakov and that there was statistical evidence that land use plays a key role on the infiltration process in the UANL property. Higher and more variable final infiltration rates were observed in vertisols of agricultural lands, grasslands and forest plantations than in vertisols of native scrub forests. The differential development of desiccation cracks among land use could have resulted in differential infiltration rates in vertisolic soils.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by Facultad de Ciencias Forestales and UANL through the PAICyT program under grant No CT 99-203. The authors of this study

would like to thank Mr. Crecencio Reyna for their help in the data collection.

REFERENCES

- Allegre, J.C., D.K. Cassel, and D.E. Brandy. 1986. Effects of land clearing on subsequent management on soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1379-1384.
- Beven, K. and P. Germann. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Res. Res.* 18: 1311-1325.
- Blackburn, W.H. 1984. Impacts of grazing intensity and specialized grazing systems on watershed characteristics and responses. pp. 927-985. *In: National Research Council. Developing strategies for rangeland management.* Westview Press, Boulder, CO.
- Blackwell, P.J., M.A. Ward, R.N. Lefevre, and D.J. Cowan. 1985. Compaction of a swelling clay soil by agricultural traffic: effects upon conditions for growth of winter cereals and evidence for some recovery of structure. *J. Soil Sci.* 36: 633-650.
- Blake, G., E. Schilching, and U. Zimmerman. 1973. Water recharge in a soil with shrinkage cracks. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37: 669-672.
- Dadvidson, S.E. and J.B. Page. 1956. Factors influencing swelling and shrinkage in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20: 320-324.
- El-Swaify, S.A. and W.W. Emerson. 1975. Changes in the physical properties of soil clays due to precipitation aluminum and iron hydroxides. I. Swelling and aggregate stability after drying. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 1056-1063.
- Hartge, H.K. 1988. The problem of compaction on agricultural lands. *Applied Geography and Development* 32: 44-50.
- Heiseke, D. 1986. Regeneración por rebrotes en dos tipos de matorral del noreste de México. *Scr. Forstl. Fak. Univ. Göttingen Niedersachsi. Forstl. Versuchsanst.* 84: 184-199.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics.* Academic Press Inc., New York, USA.
- Hillel, D. 1982. *Introduction to soil physics.* Academic Press Inc., New York, USA.
- Horton, R.E. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 5: 339-417.
- Kimmer, D.L. and D.J. Greenland. 1976. Effects of calcium carbonate on the swelling behavior of a soil clay. *J. Soil Sci.* 27: 129-139.

- Kissel, D.E., J.T. Ritchie, and E. Burnett. 1973. Chloride movement in undisturbed swelling clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37: 21-24.
- Maldonado, H.A. 1992. Modelo para la evaluación cuantitativa de la desertificación. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Mexico.
- Naeth, M.A., D.S. Chanasyk, and A.W. Bailey. 1991. Applicability of the Kostiakov equation to mixed prairie and fescue grasslands of Alberta. *J. Range Manag.* 44(1): 18-21.
- Návar, J., T. Cavazos, and P.A. Domínguez. 1994a. Los balances hidrológicos mensuales con tres probabilidades en el estado de Nuevo León. *In: C. Pola S., J.A. Ramírez F., M.M. Rangel, and I. Navarro-L. (eds). Actas Fac. Ciencias de la Tierra UANL. Linares* 8: 71-82.
- Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.* 84: 257-264.
- Reid, N., D.M. Stafford Smith, P. Beyer-Munzel, and Marroquin, J. 1990. Floristic and structural variation in the Tamaulipan thornscrub, northeastern Mexico. *J. Veg. Sci.* 1: 529-538.
- SAS/STAT. 1985. User's Guide: Basics. SAS Institute Inc. Cary, N.C.
- Takar, A.A., J.P. Dobrowski, and T.L. Thurow. 1990. Influence of grazing, vegetation life-form, and soil type on infiltration rates and inter-rill erosion on Somalian rangeland. *J. of Range Manag.* 43(6): 486-490.
- Thurow, T.L., W.H. Blackburn, and C.A. Taylor Jr. 1988. Infiltration and interrill erosion response to selected livestock grazing strategies, Edwards Plateau, Texas. *J. of Range Manag.* 41(4): 296-302.
- Voorhes, W.B. and M.J. Lindstrom. 1984. Long-term effects of tillage on soil tilth independent on wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 152-156.
- Warren, S.D., W.H. Blackburn, and C.A. Taylor. 1986. Effects of season and stage of rotation cycle on hydrological condition of rangeland under intensive rotation grazing. *J. of Range Manag.* 39(6): 486-491.
- Wilkinson, L. 1989. SYSTAT: The System for Statistics. Evanston, IL: SYSTAT, Inc., USA.
- Woerner, M. 1991. Los suelos bajo vegetación de matorral del noreste de México, descritos a través de ejemplos en el campus universitario de la UANL, Linares, N.L. Reporte Científico No 22. Facultad de Ciencias Forestales, Linares, NL. México.
- Wood, J.C., W.H. Blackburn, H.A. Pearson, and T.K. Hunter. 1989. Infiltration and runoff water quality response to silvicultural and grazing treatments on a longleaf pine forest. *J. of Range Manag.* 42(5): 378-381.

PERDIDAS DE SUELO Y POTENCIAL HIDROLOGICO EN PARCELAS CON COBERTURAS VEGETATIVAS DE ESPECIES FORRAJERAS

Soil Loss and Hydrologic Potential in Plots with Vegetative Cover of Fodder Species

Pedro Betancourt Yanez¹, José Luis Oropeza Mota², Benjamín Figueroa Sandoval², Víctor Ordaz Chaparro², Carlos Ortiz Solorio² y Alfonso Hernández Garay³

RESUMEN

En México, los terrenos degradados por la erosión, en los que la agricultura deja de ser rentable, se convierten en praderas, en su mayoría con pastos nativos. En estos suelos el proceso erosivo continúa debido al manejo inadecuado de la pradera (sobrepastoreo), a tal grado que el daño a las condiciones edáficas se hace irreversible. Lo anterior condujo a realizar esta investigación, donde se evalúa la capacidad de protección al suelo de especies forrajeras gramíneas y leguminosas de uso común en la cuenca del río Coxacoaco en el estado de México. Se utilizó un simulador de lluvias tipo Morin a intensidades de 50, 70 y 120 mm h⁻¹, en dos condiciones de humedad del suelo, para determinar la infiltración, el escurrimiento superficial y las pérdidas de suelo en lotes de escurrimiento de 1.44 m². Se realizó también un muestreo de suelo a dos profundidades para cuantificar humedad inicial y final en cada simulación. Los resultados indican que son necesarias lluvias mayores que 50 mm h⁻¹ en suelos con cobertura vegetativa de pasto rhodes (*Chloris gayana* cv. Bell) y pasto nativo (*Hilaria cenchroides*) para producir escurrimiento. Así mismo, las tasas de infiltración más altas para las intensidades de lluvia estudiadas se observaron en praderas de pasto rhodes, por otro lado, praderas con alfalfa (*Medicago sativa*) presentaron mayor pérdida de suelo comparada con las demás especies. Los valores más altos de pérdidas de suelo en las tres intensidades de lluvia se observaron en condición de suelo húmedo, siendo los mayores valores correspondiente a suelo desnudo y los menores a las praderas con cobertura de pasto rhodes.

Palabras clave: Erosión hídrica, escurrimiento superficial, pastos, lluvia simulada.

SUMMARY

In Mexico, the areas degraded by erosion, on which agriculture is not longer profitable, are converted into prairies mostly covered with native pasture. In such areas erosive processes continue due to inadequate prairie management (overgrazing) to such degree that damage to soil condition becomes irreversible. The objective of this work was to evaluate grass and legumes pastures of common use as vegetative cover in the Coxacoaco riverbasin, in Mexico State. A rainfall simulator type Morin was used with intensities of 50, 70, and 120 mm h⁻¹, under two conditions of soil moisture to determine infiltration, runoff and soil loss in experimental plots of 1.44 m². Soil moisture was sampled at two depths to quantify initial and final moisture contents in each simulation. Results showed that rainfall intensities over 50 mm h⁻¹ are necessary to produce runoff in soil with vegetative cover of rhodes (*Chloris gayana* cv. Bell) and native (*Hilaria cenchroides*) grass. The highest infiltration rates for different rainfall intensities were observed in rhodes grass. The alfalfa (*Medicago sativa*) cover showed the highest rate of soil loss when compared with other species. The highest rates of soil loss were observed for all rainfall intensities with the wet runs. Bare soil and rhodes grass coverage showed the highest and lowest erosion rates, respectively.

Index words: Water erosion, runoff, grass, simulated rainfall.

¹ Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP), CIAE-Lara, 592 Barquisimeto, estado Lara, Venezuela.

² Instituto de Recursos Naturales, Especialidad de Edafología;

³ Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Especialidad de Ganadería, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México.

Recibido: Mayo de 2000.

Aceptado: Octubre de 2000.

INTRODUCCION

A pesar del gran número de programas de desarrollo emprendidos por el gobierno y los apoyos internacionales recibidos, la pobreza, la falta de alimentos, la desnutrición, el deterioro de las

condiciones de salud y la degradación ambiental siguen siendo los problemas más comunes en la población rural. Esta situación plantea la necesidad de buscar nuevas alternativas para el uso correcto de los recursos, tomando en consideración que uno de los aspectos prioritarios a atender para lograr una producción sostenida de alimentos es la erosión hídrica de los suelos. Al respecto, Duarte (1990) indica que la erosión de los suelos es uno de los principales problemas que afronta la humanidad y México no está exento de él; por el contrario, se reporta como uno de los países latinoamericanos con la más alta tasa de erosión severa (Lal, 1979). Por su orografía accidentada, gran parte del territorio mexicano está expuesto a la erosión del suelo, debido a que la mayor parte de la superficie es de relieve irregular y sus terrenos planos sólo alcanzan 12% de la superficie total (Alcalá *et al.*, 1998). La pérdida de suelo repercute en una gran cantidad de problemas, siendo los más importantes el descenso de la productividad de los suelos y la pérdida de capacidad de almacenamiento en obras hidroagrícolas. En México, 80% de la superficie agrícola es de temporal y gran parte de la producción proviene de estas zonas y es en esos sitios donde se acentúan las pérdidas de suelo por efecto de la erosión, debido principalmente al régimen de lluvia y al uso de prácticas inadecuadas de labranza.

La mayoría de las investigaciones de erosión se han realizado en terrenos agrícolas, sin embargo, el estudio de la erosión en suelos con praderas se puede considerar de relevante importancia, lo que constituye el objetivo básico de este trabajo. Al respecto, FAO-PNUMA (1996) indican que a nivel mundial existen alrededor de 3.3 millones de hectáreas, de las cuales 70% se encuentra en proceso de sobrepastoreo desde el nivel más ligero hasta el más severo. El sobrepastoreo es, entonces, uno de los procesos que induce la erosión en los suelos de praderas al reportarse que cerca de 2.2 millones de hectáreas de la ganadería mundial se encuentran en proceso de sobrepastoreo. Por otro lado, la cantidad de agua que se infiltra en el perfil del suelo está en función del tipo de suelo, de la humedad, de la permeabilidad, de la cobertura, de las condiciones de drenaje y de la intensidad y lámina de precipitación. De tal manera, que el potencial hidrológico de un suelo define la capacidad potencial que presenta un terreno para generar escurrimiento superficial, después de haber satisfecho el almacenamiento superficial en pequeñas depresiones, la infiltración y movimiento del agua en

el suelo (Rivera *et al.*, 1999), de allí la importancia de su estudio.

MATERIALES Y METODOS

La investigación se realizó en la parte este de la cuenca del río Coxacoaco, localizada en el piedemonte de la Sierra Nevada, entre los paralelos 98°47'55'' de longitud oeste y 19°29'53'' de latitud norte, en el estado de México. La zona está a 2550 msnm, con un clima, de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1981), que se define como C(Wo)(w)b(i'); es templado subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano, verano fresco y largo con cociente P/T menor que 43.2 y porcentaje de lluvia invernal menor que 5% del total anual. La temperatura media anual oscila entre 12 y 18 °C y la del mes más caliente entre 6.5 y 22 °C. Está situada sobre una ladera de interflujo perpendicular a la pendiente principal y presenta pendiente promedio de 8 a 10%.

Utilizando el simulador de lluvias tipo Morin se realizaron 24 pruebas en total, correspondientes a tres intensidades (50, 70 y 120 mm h⁻¹), tres especies vegetativas (pasto nativo, pasto rhodes y alfalfa), más un testigo (suelo desnudo), con dos condiciones de humedad (suelo seco y suelo húmedo). El tiempo de simulación fue variable; se consideró como tiempo final el momento cuando el escurrimiento fue constante. Este simulador utiliza una boquilla que funciona bajo presión por medio de la cual las características de la lluvia pueden ser controladas con un rango de intensidad de 20 hasta 1500 mm h⁻¹.

Medición del Escurrimiento Superficial

Para cada intensidad de lluvia simulada se determinó el escurrimiento superficial a intervalos de cinco minutos, en cada prueba en los lotes de escurrimientos de 1.44 m² hasta que éste se hizo constante. Para los cálculos se aplicaron las relaciones siguientes (Oropeza, 1999):

Lámina aplicada (La)

$$La = I t$$

Donde: I = Intensidad (mm h⁻¹) y t = Tiempo (h)

Lámina escurrida (Le)

$$Le = \frac{Veo}{A}$$

Donde: Veo = Volumen de agua escurrida (m^3),
 A = Area del lote de escurrimiento (m^2)

Intensidad de escurrimiento (Ie)

$$Ie = \frac{Le}{t}$$

Donde: Le = Lámina escurrida (mm) y t =Tiempo (h)

Coefficiente de Escurrimiento (CE)

$$CE = \frac{Le}{La} \times 100$$

Donde: La = Lámina precipitada (mm)

Infiltración

La infiltración del suelo se determinó utilizando el simulador de lluvias, básicamente relacionando la lámina de agua aplicada en cada lluvia con la lámina escurrida medida en los lotes de escurrimiento de $1.44 m^2$. Para los cálculos se aplicaron las relaciones siguientes:

Lámina infiltrada (Li)

$$Li = La - Le$$

Coefficiente de Infiltración (CI)

$$CI = \frac{Li}{La} \times 100$$

Producción de Sedimentos

Las pérdidas de suelo (sedimentos en suspensión) se determinaron por el procedimiento siguiente: desde el inicio del escurrimiento superficial se tomaron muestras cada cinco minutos en un recipiente con capacidad de 1 L, hasta que el tiempo de llenado del recipiente se hizo constante. Estas muestras se llevaron al laboratorio donde a cada una se le agregó

alumbre al 10% (sulfato doble de potasio y aluminio) para precipitar los sólidos, se eliminó el sobrenadante y en un frasco de vidrio se colocaron los sólidos que luego se llevaron a la estufa a $105^\circ C$ durante 48 h; posteriormente, se pesó en una balanza el suelo seco de cada muestra.

Los demás sedimentos se colectaron, para cada prueba, en un colector de la base de la parcela de escurrimiento y en el recipiente del limnógrafo. El cálculo se basó en la siguiente ecuación:

Producción de sedimentos (As)

$$As = Ps \ Veo$$

Donde: Ps = Peso de los sedimentos (kg) y Veo = Volumen de agua escurrida (L)

Determinación de las Características Físicas Relacionadas con el Potencial Hidrológico del Suelo

En cada parcela y para cada intensidad de lluvia simulada se tomaron muestras de humedad a dos profundidades (5 y 10 cm) antes y después de cada simulación; para determinar humedad inicial y final se utilizó una barrena de cilindros. Las muestras se pesaron en el campo y luego se llevaron al laboratorio para secarse en la estufa a $105^\circ C$, hasta peso constante.

Posteriormente se determinó el potencial hidrológico de los suelos mediante la metodología del Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos (McGuinness y Edwards, 1975) adicionando las determinaciones de Rawls *et al.* (1982).

RESULTADOS Y DISCUSION

Duración de la Simulación y del Escurrimiento Superficial

El tiempo de lluvia simulada en cada tratamiento fue variable, de acuerdo con la condición de humedad del suelo, y representa el lapso desde el inicio de la simulación hasta que el escurrimiento superficial se hizo constante.

El mayor tiempo para que el escurrimiento fuera constante correspondió a las menores intensidades de lluvia en condición seca del suelo en los tratamientos con coberturas de pasto nativo y pasto rhodes, presentando tiempos de 60 y 62 min, respectivamente.

Para esta misma intensidad de lluvia, las parcelas con cobertura vegetativa de alfalfa sólo necesitaron 54 y 55% del tiempo para generar escurrimientos, comparado con las parcelas de pasto rhodes y pasto nativo. El tiempo necesario para el inicio del escurrimiento fue mayor en la intensidad de 50 mm h⁻¹ en suelo seco para pasto rhodes y pasto nativo. Por otro lado, el escurrimiento se presentó más rápido en las parcelas con suelo desnudo, siendo apenas entre 1 y 4 min los tiempos para inicio de éste, en las dos condiciones de humedad del suelo. También correspondió a los tratamientos de suelo desnudo, menores tiempos para alcanzar un escurrimiento estable. La mayor lámina de agua escurrida correspondió a una intensidad de 120 mm h⁻¹ aplicada en suelo seco en pasto nativo, también presentaron valores altos las intensidades de 120 mm h⁻¹ en suelo húmedo en pasto rhodes, en alfalfa con intensidad de 120 mm h⁻¹ y en pasto nativo con intensidad de 50 mm h⁻¹ en condición de suelo seco.

Se puede indicar que una cobertura de pasto nativo y pasto rhodes no permite escurrimientos hasta después de una hora de lluvia cuando es de 50 mm h⁻¹, sólo lluvias de mayor intensidad producirán escurrimiento superficial. Al respecto, Alcalá *et al.* (1998) indican que con intensidades de 40 y 60 mm h⁻¹ en parcelas de pastos no se presenta escurrimiento con lluvia de menos de una hora de duración. En la alfalfa son necesarios tiempos mayores que 30 min para que se dé el escurrimiento (Cuadro 1).

Escurrimiento Superficial e Infiltración

Cuando se aplicó una lluvia simulada de 50 mm h⁻¹, las láminas de infiltración más altas se observaron en las parcelas de pasto rhodes y alfalfa en condición de suelo seco (Figuras 1c y 1e), mientras que las láminas más bajas se presentaron en suelo desnudo, en ambas condiciones de humedad del

Cuadro 1. Lámina de lluvia aplicada, tiempo de inicio de escurrimiento y duración de la simulación para cada tratamiento.

Tratamiento	Intensidad de lluvia mm h ⁻¹	Condición del suelo	Inicio de escurrimiento	Tiempo de simulación	Lámina aplicada
			----- min -----		mm
Pasto nativo	50	Seco	60	125	102
Pasto nativo	50	Húmedo	7	42	36
Pasto nativo	70	Seco	12	40	47
Pasto nativo	70	Húmedo	7	48	56
Pasto nativo	120	Seco	23	61	122
Pasto nativo	120	Húmedo	10	40	80
Pasto rhodes	50	Seco	62	114	95
Pasto rhodes	50	Húmedo	10	47	39
Pasto rhodes	70	Seco	21	77	91
Pasto rhodes	70	Húmedo	5	37	43
Pasto rhodes	120	Seco	6	49	98
Pasto rhodes	120	Húmedo	4	56	112
Alfalfa	50	Seco	33	114	87
Alfalfa	50	Húmedo	5	54	45
Alfalfa	70	Seco	10	49	57
Alfalfa	70	Húmedo	5	44	51
Alfalfa	120	Seco	8	51	102
Alfalfa	120	Húmedo	3	33	66
Suelo desnudo	50	Seco	4	44	37
Suelo desnudo	50	Húmedo	2	42	35
Suelo desnudo	70	Seco	3	43	50
Suelo desnudo	70	Húmedo	2	42	49
Suelo desnudo	120	Seco	1	41	82
Suelo desnudo	120	Húmedo	1	41	82

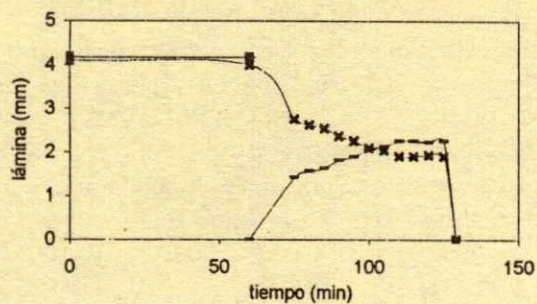


Fig. a: Pasto nativo en suelo seco

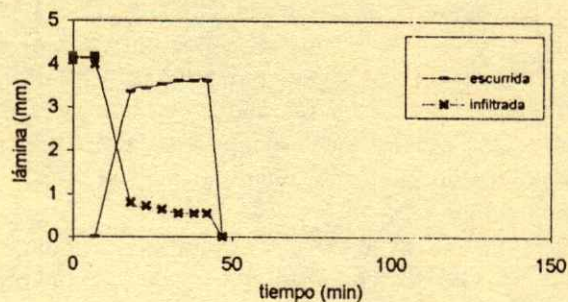


Fig. b: Pasto nativo en suelo húmedo

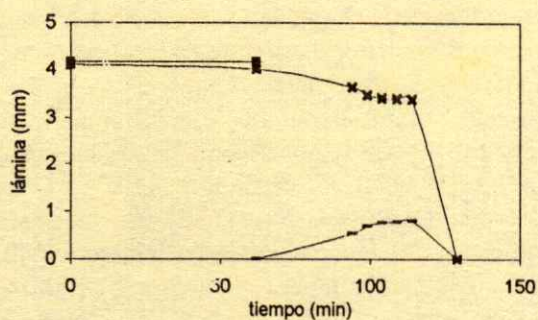


Fig. c: Pasto rhodes en suelo seco

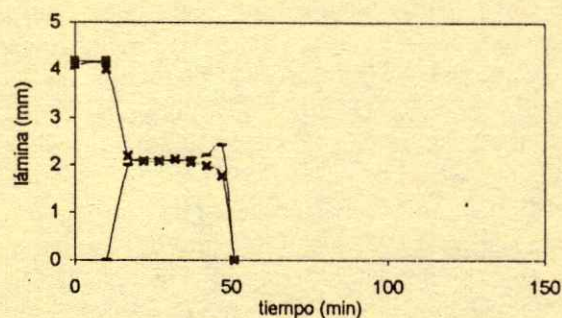


Fig. d: Pasto rhodes en suelo húmedo

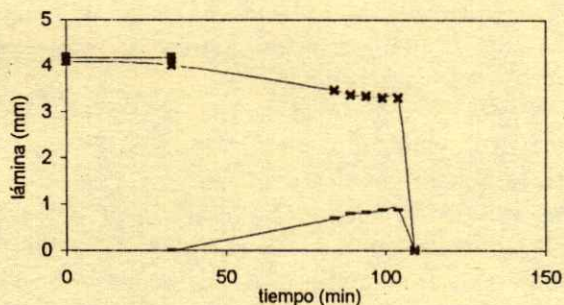


Fig. e: Alfalfa en suelo seco

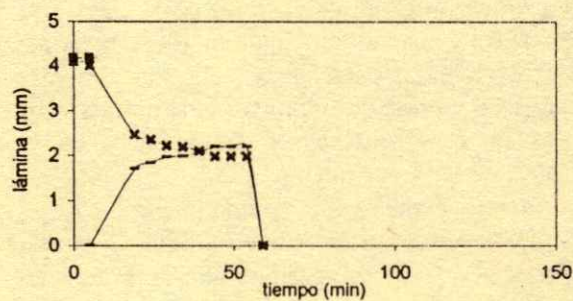


Fig. f: Alfalfa en suelo húmedo

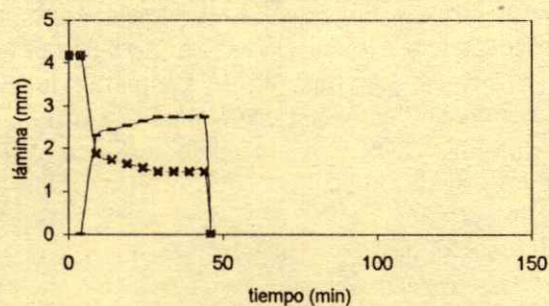


Fig. g: Suelo desnudo en seco

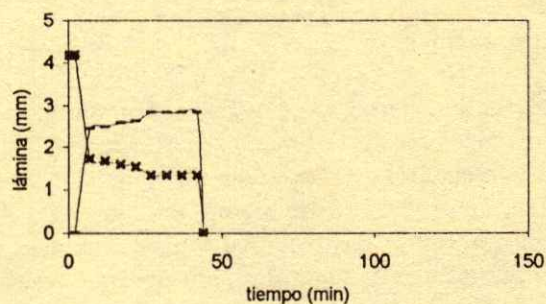


Fig. h: Suelo desnudo en húmedo

Figura 1. Variables hidrológicas medidas cada 5 min correspondientes a lluvia simulada de 50 mm h^{-1} en parcelas de pasto nativo, pasto rhodes, alfalfa y suelo desnudo en dos condiciones de humedad.

suelo (Figuras 1g y 1h), y en las parcelas de pasto nativo en condición de suelo húmedo (Figura 1b). Así mismo, las menores láminas de escurrimiento se observaron en las parcelas de pasto rhodes y alfalfa en suelo seco (Figuras 1c y 1e), indicando que estas dos especies forrajeras, bien manejadas, proporcionan buena protección al suelo, disminuyendo el efecto de los escurrimientos.

Al aumentar la intensidad de lluvia a 70 mm h^{-1} , las láminas más altas de infiltración y las más bajas de escurrimiento se observaron en las parcelas de pasto rhodes en suelo seco (Figura 2c), siendo las correspondientes a parcelas de alfalfa también de valor alto, pero menor que del pasto rhodes (Figura 2e). Las láminas más bajas de infiltración correspondieron a las parcelas de suelo desnudo en seco y húmedo (Figuras 2g y 2h) y a las de pasto nativo en condición de suelo seco (Figura 2b). Con la máxima intensidad de lluvia (120 mm h^{-1}), las láminas de infiltración más elevadas se observaron en las parcelas de pasto rhodes y de alfalfa en las dos condiciones de humedad del suelo (Figuras 3c, 3d, 3e y 3f), correspondiendo, a la vez, con menores láminas escurridas. Las parcelas de suelo desnudo, tanto en condición seca como en húmeda, presentaron las menores láminas de infiltración y las mayores láminas de escurrimientos (Figuras 3g y 3h).

De manera general, las altas tasas de infiltración se observaron en las parcelas de pasto rhodes y alfalfa en suelo seco y presentan al mismo tiempo los valores menores de escurrimiento. Figueroa *et al.* (1991) indican que el mecanismo para el control del escurrimiento no es la velocidad de infiltración sino el contenido de humedad del suelo, el cual, si es mayor que cierto valor crítico, ocasiona una reducción en la succión del agua de los poros del suelo a cero, permitiendo la formación de almacenamiento superficial.

Pérdidas de Suelo

Para la intensidad de lluvia de 50 mm h^{-1} , la mayor producción de sedimentos correspondió a las parcelas de suelo desnudo en las dos condiciones de humedad del suelo, le siguieron en magnitud las parcelas de alfalfa, pasto nativo y pasto rhodes, en orden decreciente. El suelo desnudo presentó valores de 264.2 y 217.5 g m^{-2} para suelo húmedo y seco, respectivamente, mientras que los valores del pasto rhodes fueron 101.3 y 60.1 g m^{-2} en suelo húmedo y seco, respectivamente. La producción de sedimentos

se redujo 38.4% en húmedo y 27.7% en seco cuando se compara el suelo protegido por pasto rhodes con un suelo desnudo. En esta intensidad de lluvia (50 mm h^{-1}) la producción de sedimentos en suelo seco fue de 217.5 , 169.3 , 148.9 y 60.1 g m^{-2} para suelo desnudo, pasto nativo, alfalfa y pasto rhodes, respectivamente. Para suelo húmedo fue de 264.2 , 179.3 , 126.9 y 101.3 g m^{-2} para suelo desnudo, alfalfa, pasto nativo y pasto rhodes, respectivamente (Figura 4a).

Para la intensidad de lluvia de 70 mm h^{-1} la mayor cantidad de sedimentos producidos correspondió también a las parcelas de suelo desnudo en las dos condiciones de humedad del suelo, le siguen en magnitud las parcelas de alfalfa, pasto nativo y pasto rhodes en orden decreciente. El suelo desnudo presentó valores de 284.6 y 221.8 g m^{-2} para suelo húmedo y seco, respectivamente, mientras que los valores del pasto rhodes fueron 111.9 y 97.2 g m^{-2} en húmedo y seco, respectivamente. La producción de sedimentos se redujo 39.3% en húmedo y 43.8% en seco cuando se compara el suelo protegido por pasto rhodes con un suelo desnudo. La producción de sedimentos en suelo seco fue de 221.8 , 187.0 , 156.0 y 97.2 g m^{-2} para suelo desnudo, alfalfa, pasto nativo y pasto rhodes, respectivamente. Para suelo húmedo fue de 284.6 , 241.2 , 158.4 y 111.9 g m^{-2} para suelo desnudo, alfalfa, pasto nativo y pasto rhodes, respectivamente (Figura 4b).

Para la intensidad de lluvia de 120 mm h^{-1} la mayor cantidad de sedimentos producidos correspondió también a las parcelas de suelo desnudo en las dos condiciones de humedad del suelo, le siguen en magnitud las parcelas de alfalfa, pasto nativo y pasto rhodes en orden decreciente. El suelo desnudo presentó valores de 1002.9 y 890.3 g m^{-2} para suelo húmedo y seco, respectivamente, mientras que los valores del pasto rhodes fueron 188.5 y 161.8 g m^{-2} en húmedo y seco, respectivamente. La producción de sedimentos se redujo 18.8% en húmedo y 18.2% en seco cuando se comparan los valores extremos que corresponden a un suelo con cobertura de pasto rhodes y a un suelo desnudo. Con esta intensidad de lluvia la producción de sedimentos en suelo seco fue de 890.3 , 205.8 , 200.5 y 161.8 g m^{-2} para suelo desnudo, alfalfa, pasto nativo y pasto rhodes, respectivamente. Para suelo húmedo fue de 1002.9 , 298.8 , 287.2 y 188.5 g m^{-2} para suelo desnudo, alfalfa, pasto nativo y pasto rhodes, respectivamente (Figura 4c). Las mayores pérdidas de suelo correspondieron al tratamiento de suelo desnudo

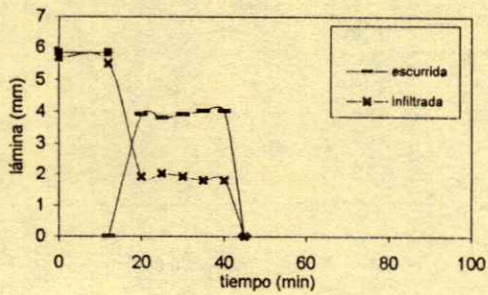


Fig. a: Pasto nativo en suelo seco

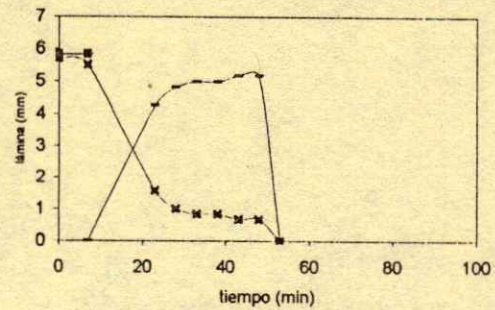


Fig. b: Pasto nativo en suelo húmedo

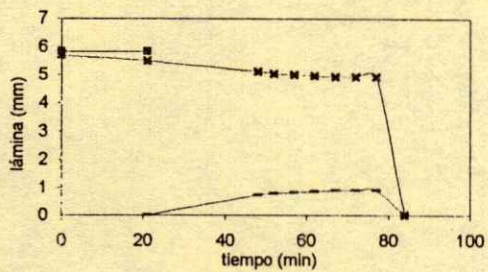


Fig. c: Pasto rhodes en suelo seco

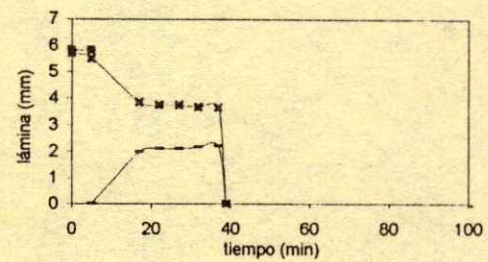


Fig. d: Pasto rhodes en suelo húmedo

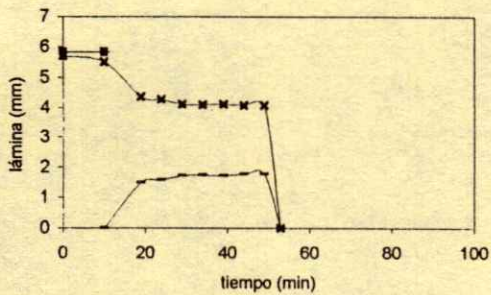


Fig. e: Alfalfa en suelo seco

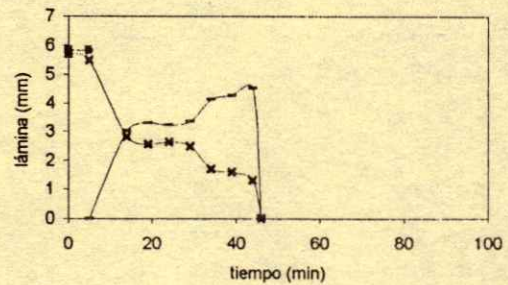


Fig. f: Alfalfa en suelo húmedo

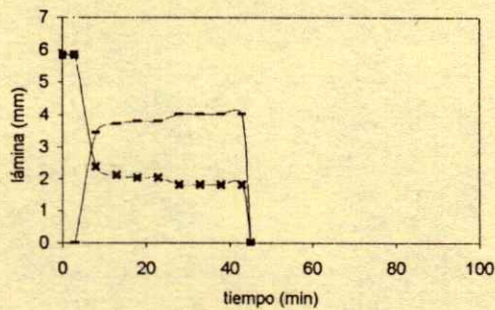


Fig. g: Suelo desnudo en seco

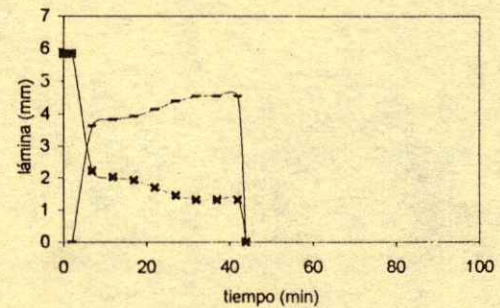


Fig. h: Suelo desnudo en húmedo

Figura 2. Variables hidrológicas medidas cada 5 min correspondientes a lluvia simulada de 70 mm h^{-1} en parcelas de pasto nativo, pasto rhodes, alfalfa y suelo desnudo en dos condiciones de humedad.

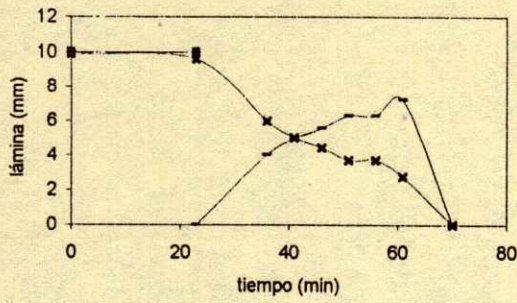


Fig. a: Pasto nativo en suelo seco

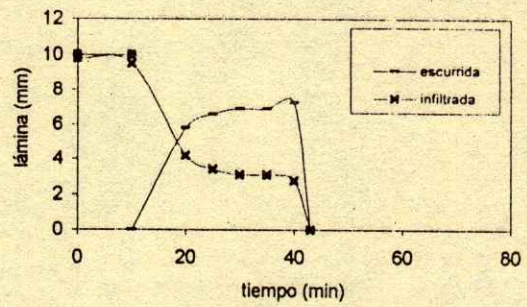


Fig. b: Pasto nativo en suelo húmedo

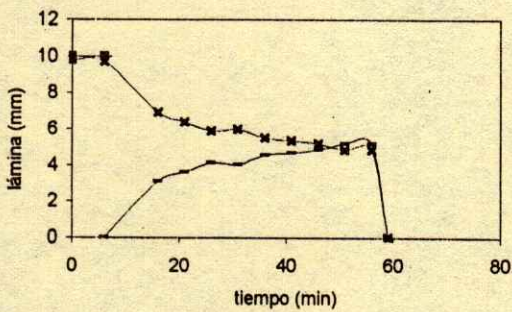


Fig. c: Pasto rhodes en suelo seco

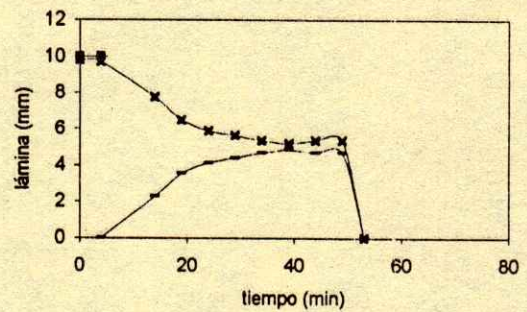


Fig. d: Pasto rhodes en suelo húmedo

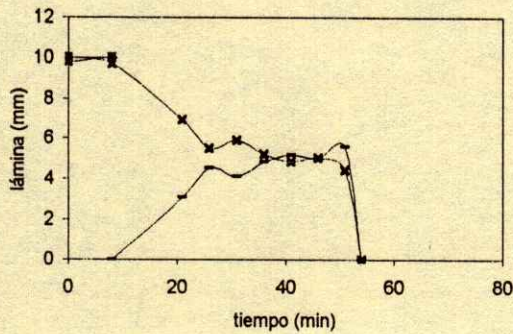


Fig. e: Alfalfa en suelo seco

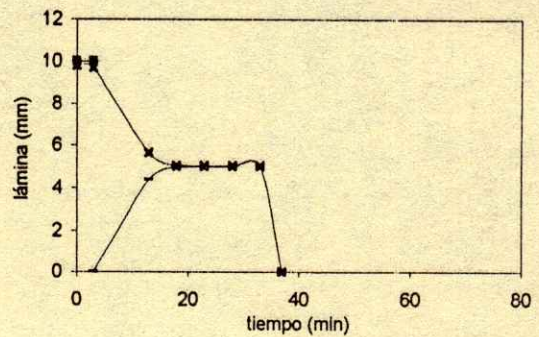


Fig. f: Alfalfa en suelo húmedo

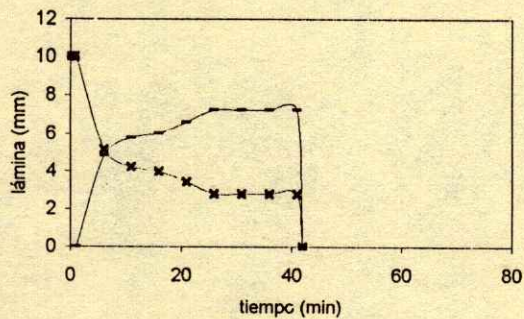


Fig. g: Suelo desnudo seco

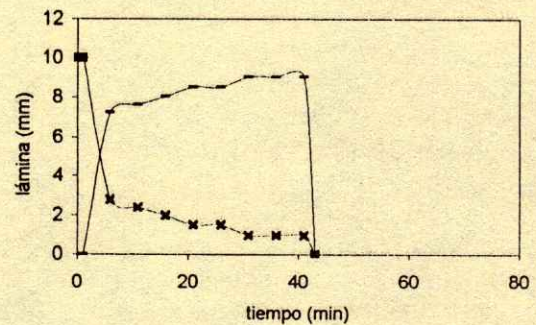


Fig. h: Suelo desnudo húmedo

Figura 3. Variables hidrológicas medidas cada 5 min correspondientes a lluvia simulada de 120 mm h^{-1} en parcelas de pasto nativo, pasto rhodes, alfalfa y suelo desnudo en dos condiciones de humedad.

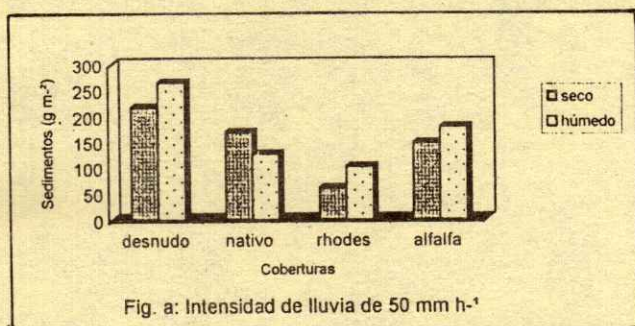
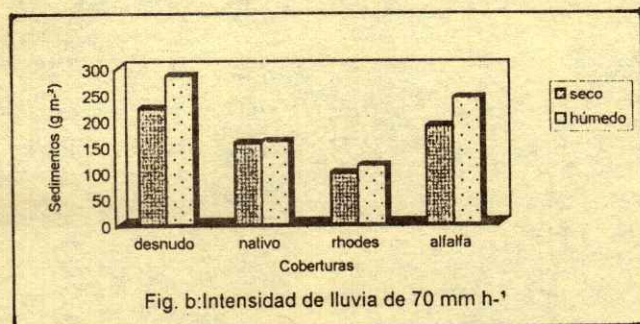
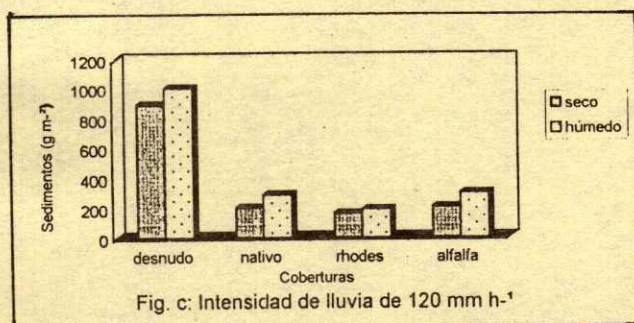
Fig. a: Intensity de lluvia de 50 mm h⁻¹Fig. b: Intensity de lluvia de 70 mm h⁻¹Fig. c: Intensity de lluvia de 120 mm h⁻¹

Figura 4. Producción total de sedimentos con aplicación de lluvia simulada de 50, 70 y 120 mm h⁻¹ en las diferentes parcelas en dos condiciones de humedad.

y Figueroa *et al.* (1991) indican que el desprendimiento de las partículas de suelo causado por la lluvia, son resultado del golpeteo sobre el suelo desnudo, de tal forma que las partículas son dispersadas al aire a distancias variables, por lo tanto, en un suelo desnudo el proceso de erosión por salpicado es sustancialmente incrementado.

Los valores más altos de producción de sedimentos se presentaron, para las tres intensidades de lluvia, en condición de suelo húmedo, siendo las parcelas de pasto rhodes las de menor cantidad producida. La tendencia de los resultados obtenidos, en esta parte del trabajo, concuerda con la reportada

por Tapia (1999) quien, trabajando con intensidades variables de 45 a 120 mm h⁻¹ de lluvia simulada, indica que en suelo seco las pérdidas de suelo fueron 0.14 g s⁻¹ m⁻² y para suelo húmedo fueron 0.70 g s⁻¹ m⁻² para los primeros 20 min de simulación, pero no así con los resultados reportados por Meyer y Harmon (1992), quienes encontraron una mayor salida de sedimentos con lluvia simulada en suelo seco (94.8 t ha⁻¹) que en condición de suelo húmedo (33.3 t ha⁻¹) indicando como responsable a las diferencias en erosionabilidad del suelo.

Características Físicas y Potencial Hidrológico

Para suelo desnudo en condición de suelo seco, en los primeros 5 cm de profundidad se observó un incremento de la humedad de 21 a 25% con la aplicación de lluvia de intensidades de 50, 70 y 120 mm h⁻¹, mientras que a una profundidad de 10 cm el incremento estuvo alrededor de 5 a 10%. Para una condición de suelo húmedo sólo se presentó un incremento de humedad considerable a 10 cm con una intensidad de 70 y 120 mm h⁻¹.

Por otro lado, las láminas de agua se incrementaron mayormente en los primeros 5 cm de profundidad en condición de suelo seco para las tres intensidades. Así mismo, las láminas de aire presentaron un comportamiento inverso, pues las laminas antes de la lluvia fueron más altas, en su mayoría, y su dimensión se redujo cuando su espacio fue ocupado por el agua retenida.

Los mayores incrementos en la capacidad de retención de humedad se presentaron en los primeros 5 cm de profundidad en condición de suelo seco, siendo 12, 11 y 14% para intensidad de lluvia de 50, 70 y 120 mm h⁻¹, respectivamente (Cuadro 2).

Para suelo con pasto nativo en condición de suelo seco, en los primeros 5 cm de profundidad se observó un incremento de la humedad de 25, 10 y 24% con la aplicación de lluvia de intensidades de 50, 70 y 120 mm h⁻¹, respectivamente, mientras que a una profundidad de 10 cm el incremento fue de 14, 6 y 11%. Para una condición de suelo húmedo sólo se presentó un incremento de humedad considerable (>10%) a 5 cm con intensidades de 50 y 120 mm h⁻¹. Las láminas de agua se incrementaron con la aplicación de las diferentes intensidades de lluvia, siendo los mayores valores correspondientes a intensidades de 50 y 120 mm h⁻¹ en las dos profundidades y en ambas condiciones de humedad del suelo. Las láminas de aire presentaron

Cuadro 2. Características hidrológicas del suelo en las diferentes parcelas con intensidades de lluvia de 50, 70 y 120 mm h⁻¹ en dos condiciones de humedad.

Tratamiento	Int.	Prof.	θ_g inicial	θ_g final	Láminas						θ_{ms} inicial	θ_{ms} final
					aire i.	aire f.	agua i.	agua f.	suelo i.	suelo f.		
	mm h ⁻¹	cm			cm						%	
SDS	50	5	0.12	0.37	2.34	1.68	0.39	1.07	2.27	2.25	7.03	19.43
SDS	50	10	0.23	0.33	1.99	2.02	0.64	0.68	2.37	2.30	10.99	12.05
SDH	50	5	0.37	0.35	1.21	1.33	1.07	0.97	2.72	2.70	16.07	14.65
SDH	50	10	0.33	0.33	1.80	1.57	0.68	0.93	2.52	2.50	11.01	15.13
SDS	70	5	0.12	0.33	2.34	1.78	0.39	0.97	2.27	2.25	7.03	17.68
SDS	70	10	0.18	0.23	1.65	1.72	0.64	0.58	2.71	2.70	9.61	8.73
SDH	70	5	0.33	0.40	1.56	1.47	0.97	1.13	2.47	2.40	16.11	19.24
SDH	70	10	0.18	0.33	2.05	1.60	0.58	1.10	2.37	2.30	9.95	19.54
SDS	120	5	0.12	0.36	2.34	1.67	0.39	1.13	2.27	2.20	7.03	20.99
SDS	120	10	0.23	0.33	1.99	1.76	0.64	0.94	2.37	2.30	10.99	16.66
SDH	120	5	0.40	0.45	1.44	1.04	1.13	1.56	2.43	2.40	19.00	26.61
SDH	120	10	0.33	0.42	1.03	0.43	1.51	2.17	2.46	2.40	25.10	36.84
PNS	50	5	0.12	0.37	1.77	0.70	0.70	1.80	2.53	2.50	11.30	29.39
PNS	50	10	0.13	0.27	1.88	1.10	0.70	1.45	2.42	2.45	11.80	24.16
PNH	50	5	0.34	0.42	1.07	0.80	1.45	1.80	2.48	2.40	23.90	30.61
PNH	50	10	0.29	0.28	1.33	1.10	1.25	1.45	2.42	2.45	21.10	24.16
PNS	70	5	0.22	0.32	1.42	1.03	1.10	1.50	2.48	2.47	18.10	24.79
PNS	70	10	0.21	0.27	1.33	1.25	1.20	1.30	2.47	2.45	19.80	21.66
PNH	70	5	0.33	0.37	0.92	0.80	1.60	1.80	2.48	2.40	26.30	30.61
PNH	70	10	0.25	0.27	1.32	0.74	1.25	1.85	2.43	2.41	21.00	31.33
PNS	120	5	0.07	0.31	1.78	0.55	0.30	1.65	2.92	2.80	4.20	51.25
PNS	120	10	0.11	0.22	2.03	1.40	0.45	1.10	2.52	2.50	7.30	17.96
PNH	120	5	0.22	0.37	1.28	0.95	1.30	1.65	2.42	2.40	21.90	28.06
PNH	120	10	0.20	0.24	1.26	1.20	1.25	1.35	2.49	2.45	20.50	22.49
PRS	50	5	0.13	0.52	1.85	0.95	0.60	1.55	2.55	2.50	9.60	25.31
PRS	50	10	0.15	0.36	1.93	0.77	0.55	1.70	2.52	2.53	8.90	27.43
PRH	50	5	0.35	0.35	1.10	1.13	1.40	1.35	2.50	2.52	22.90	21.89
PRH	50	10	0.24	0.31	1.35	1.25	1.20	1.35	2.45	2.40	20.00	22.96
PRS	70	5	0.27	0.28	1.16	1.17	1.35	1.35	2.49	2.48	22.10	22.20
PRS	70	10	0.22	0.26	1.37	1.25	1.15	1.30	2.48	2.45	18.90	21.66
PRH	70	5	0.41	0.58	1.29	1.04	1.25	1.55	2.46	2.41	20.70	26.25
PRH	70	10	0.30	0.40	1.20	0.90	1.30	1.60	2.50	2.50	21.20	26.12
PRS	120	5	0.20	0.27	1.74	1.55	0.80	1.00	2.46	2.45	13.30	16.66
PRS	120	10	0.17	0.24	1.82	1.50	0.80	1.15	2.38	2.35	13.70	19.97
PRH	120	5	0.47	0.64	1.08	0.70	1.45	1.85	2.47	2.45	24.00	30.82
PRH	120	10	0.32	0.40	0.61	0.60	1.90	2.00	2.49	2.40	31.20	34.01
AS	50	5	0.10	0.33	2.16	0.97	0.40	1.25	2.44	2.78	6.70	18.35
AS	50	10	0.13	0.30	1.98	1.35	0.65	1.35	2.37	2.30	11.20	23.96
AH	50	5	0.30	0.36	1.08	1.13	1.45	1.45	2.47	2.42	24.00	24.50
AH	50	10	0.28	0.34	1.27	1.15	1.30	1.45	2.43	2.40	21.80	24.66
AS	70	5	0.22	0.28	1.49	1.35	1.10	1.25	2.41	2.40	18.60	21.26
AS	70	10	0.15	0.37	1.82	0.85	0.65	1.65	2.53	2.50	10.50	26.94
AH	70	5	0.31	0.35	1.14	1.15	1.40	1.40	2.46	2.45	23.20	23.30
AH	70	10	0.28	0.34	1.30	1.15	1.20	1.40	2.50	2.45	19.60	23.32
AS	120	5	0.14	0.28	1.85	0.90	0.60	1.60	2.55	2.50	9.60	26.12
AS	120	10	0.12	0.30	2.00	0.93	0.45	1.55	2.55	2.52	7.20	25.11
AH	120	5	0.30	0.31	1.06	0.90	1.50	1.70	2.44	2.40	25.10	28.91
AH	120	10	0.28	0.31	1.15	1.06	1.40	1.50	2.45	2.44	23.30	25.09

Int. = Intensidad de lluvia. Prof. = Profundidad de muestreo. θ_g = Humedad gravimétrica. θ_{ms} = Capacidad de retención de agua. SD = Suelo desnudo. PN = Pasto nativo. PR = Pasto rhodes. A = Alfalfa. S = Suelo seco. H = Suelo húmedo. i = Inicial. f = Final.

un comportamiento inverso, pues con la aplicación de la lluvia se redujo la lámina de aire, al ser ocupado su espacio por el agua. Los mayores incrementos en la capacidad de retención de humedad se presentaron en condición de suelo seco para intensidades de 50 y 120 mm h⁻¹ en las dos profundidades. Estos incrementos fueron de 18.09 y 12.36% para 50 mm h⁻¹ y 47.05 y 10.66 % para intensidad de lluvia de 120 mm h⁻¹ (Cuadro 2).

Para suelo con pasto rhodes, en condición de suelo seco, se observó un incremento de la humedad de 39 y 21% con la aplicación de lluvia de intensidad 50 mm h⁻¹, a 5 y 10 cm de profundidad, respectivamente, mientras que con una intensidad de 120 mm h⁻¹ en suelo seco, se observó un incremento de 17% a una profundidad de 5 cm. Para una condición de suelo húmedo no se presentó un incremento de humedad considerable con ninguna intensidad. Las láminas de agua se incrementaron con la aplicación de las diferentes intensidades de lluvia en las dos profundidades y en ambas condiciones de humedad del suelo, siendo los mayores valores correspondientes a la intensidad de 50 mm h⁻¹ a 5 y 10 cm en suelo seco. Así mismo, las láminas de aire presentaron un comportamiento inverso, pues con la aplicación de la lluvia se redujo la lámina de aire al ser ocupado su espacio por el agua. Los mayores incrementos en la capacidad de retención de humedad se presentaron en condición de suelo seco para la intensidad de 50 mm h⁻¹ en las dos profundidades. Estos incrementos fueron 15.75 y 18.53% para 5 y 10 cm, respectivamente (Cuadro 2).

Para suelo con alfalfa se observó un incremento de la humedad en todas las intensidades de lluvia aplicada, siendo las de mayores valores las siguientes: 23 y 17% con la aplicación de la intensidad de lluvia de 50 mm h⁻¹, a 5 y 10 cm de profundidad, respectivamente, mientras que con una intensidad de 120 mm h⁻¹ se observó un incremento de 14 y 18% a una profundidad de 5 y 10 cm, y para la intensidad de 70 mm h⁻¹ se presentó un incremento de 22% a 10 cm de profundidad, todos en suelo seco. Para una condición de suelo húmedo se presentaron también incrementos de humedad, pero no de considerable importancia para ninguna intensidad.

Las láminas de agua se incrementaron con la aplicación de las diferentes intensidades de lluvia en las dos profundidades y en ambas condiciones de humedad del suelo, siendo los mayores valores correspondientes a la intensidad de 50 y 120 mm h⁻¹ a 5 y 10 cm, y a 10 cm con intensidad de 70 mm h⁻¹ en

suelo seco. Las láminas de aire presentaron un comportamiento inverso, pues con la aplicación de la lluvia se redujo la lámina de aire, al ser ocupado su espacio por el agua. Los mayores incrementos en la capacidad de retención de humedad se presentaron en la condición de suelo seco para la intensidad de 50, 70 y 120 mm h⁻¹. Estos incrementos fueron 11.65 y 12.76% para 50 mm h⁻¹ a 5 y 10 cm respectivamente, 16.64% para 70 mm h⁻¹ a 10 cm y para intensidad de 120 mm h⁻¹ fueron de 16.52 y 17.91% a 5 y 10 cm (Cuadro 2).

Al determinar el potencial hidrológico de los suelos con las diferentes coberturas, incluyendo las parcelas de suelo desnudo se presentó lo siguiente: a) para suelo desnudo se observó un alto potencial de escurrimiento y una muy baja tasa de infiltración, en las diferentes intensidades de lluvia estudiadas; b) para suelo con cobertura de pasto nativo se presentaron valores de alto a moderadamente alto potencial de escurrimiento y muy baja tasa de infiltración; c) para los suelos con pasto rhodes y alfalfa se redujo el escurrimiento superficial en mayor proporción y sus potenciales de escurrimiento fueron moderados, con una tasa moderada de infiltración, (Cuadro 3). A pesar de que las coberturas de pasto rhodes y la alfalfa no presentaron un alto potencial para reducir el escurrimiento superficial, que sería lo ideal, sí presentaron los mejores resultados comparado con el efecto producido por la cobertura del pasto nativo en cuanto a la generación de escurrimiento superficial.

CONCLUSIONES

En suelos con coberturas vegetativas de pasto rhodes y pasto nativo, al presentarse precipitaciones con intensidades de lluvia de 50 mm h⁻¹, es necesario que ésta tenga una duración mayor que 60 minutos para que se presente el escurrimiento superficial.

Las altas tasas de infiltración y las bajas tasas de escurrimiento en las tres intensidades de lluvia correspondieron a las parcelas de pasto rhodes y de alfalfa, lo que indica que estas especies pueden mejorar las condiciones hidrológicas del suelo en los sistemas de explotación pecuarios.

Las mayores pérdidas de suelo se observaron en suelo desnudo, pero con respecto a las coberturas vegetativas, la parcela más erosionada fue la de alfalfa y la de menor erosión la correspondiente al pasto rhodes.

Cuadro 3. Grupos hidrológicos correspondientes a cada parcela para dos condiciones de humedad del suelo.

Tratamiento	Textura	Ce	Escurrimiento	Infiltración	Grupo hidrológico
			----- mm h ⁻¹ -----		
Desnudo 50 S	franco arenoso	0.66	32.76	1.96	
Desnudo 50 H	franco arenoso	0.68	34.04	1.90	D
Desnudo 70 S	franco arenoso	0.69	48.23	2.53	
Desnudo 70 H	franco arenoso	0.78	54.25	1.87	D
Desnudo 120 S	franco arenoso	0.72	86.81	4.05	
Desnudo 120 S	franco arenoso	0.90	108.50	1.40	D
Nativo 50 S	franco arc.aren.	0.54	27.13	0.92	
Nativo 50 H	franco arcilloso	0.87	43.40	0.81	D
Nativo 70 S	franco arcilloso	0.67	48.23	2.72	
Nativo 70 H	franco arc.aren.	0.63	62.00	0.84	D
Nativo 120 S	franco arcilloso	0.69	86.81	3.98	
Nativo 120 H	franco arc.aren.	0.72	86.81	5.33	C
Rhodes 50 S	franco arc.aren.	0.19	9.49	1.78	
Rhodes 50 H	franco arc.aren.	0.58	28.94	2.51	C
Rhodes 70 S	franco arc.aren.	0.16	10.85	5.53	
Rhodes 70 H	franco arc.aren.	0.38	26.30	8.50	B/C
Rhodes 120 S	franco arc.aren.	0.47	56.00	9.40	
Rhodes 120 H	franco arc.aren.	0.52	62.00	8.19	B/C
Alfalfa 50 S	franco arc.aren.	0.21	10.46	2.49	
Alfalfa 50 H	franco arcilloso	0.53	26.30	3.16	C
Alfalfa 70 S	franco arcilloso	0.30	21.17	7.18	
Alfalfa 70 H	franco arc.aren.	0.78	54.25	2.58	C/B
Alfalfa 120 S	franco arcilloso	0.56	66.77	5.79	
Alfalfa 120 H	franco arc.aren.	0.50	59.87	9.11	B/C

S = Seco. H = Húmedo. Ce = Coeficiente de escurrimiento. 50, 70, 120 = Intensidad de lluvia (mm h⁻¹).

B = Bajo potencial de escurrimiento y alta infiltración. C = Moderado potencial de escurrimiento e infiltración. D = Alto potencial de escurrimiento y baja infiltración.

El mayor incremento en la capacidad de retención de humedad se presentó en suelo seco para las tres intensidades de lluvia estudiadas, resaltando las coberturas de pasto rhodes y alfalfa que presentaron un menor potencial de escurrimiento con una moderada tasa de infiltración.

LITERATURA CITADA

- Alcalá, M., J.L. Oropeza y J.L. Tovar 1998. Producción de sedimentos en diferentes usos del suelo, en la cuenca del río Los Sauces, Michoacan. *Agrociencia* 32: 225-231.
- Duarte, R. 1990. Contribución del representante de la misión diplomática de la FAO en México al primer simposium nacional sobre degradación de suelos. *Memorias*. México. pp. 97-103.
- FAO-PNUMA. 1996. Estudios de casos de especies vegetales para las zonas áridas y semi-áridas de Chile y México. Santiago, Chile.
- Figueroa, S. B., A.A. Orozco, H.G. Cortés, J.P. López, E.S. Osuna, J.M. Rodríguez y F.J. Morales. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Colegio de Postgraduados. 1a edición. Salinas, SLP, México.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen (adaptado a la condiciones de la República Mexicana). 3a. ed. Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- Lal, R. 1979. Review of soil erosion research in Latin America. pp. 232-240. *In*: Greenland, D.J. y R. Lal. (eds.). Soil conservation and management in the humid tropics. John Wiley.
- McGuinness, J.L. y W. Edwards. 1975. A watershed soils index of runoff potential. *J. Soil and Water Conservation* : 184-186.
- Meyer, L.D y W.C. Harmon 1992. Soil erosion variation during the crop year. *Transactions of the ASAE*. 35(2): 459-464.
- Oropeza M., J.L. 1999. Determinación de las características físicas en conservación del suelo y del agua. *Dinámica de sedimentos en cuencas hidrográficas*. Colegio de Postgraduados, México.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek y K.E Saxton 1982. Estimation of soil properties. *Transactions of the Am. Soc. Agric. Engineers*. 25 (5): 1316-1320.
- Rivera, R.P., J.L. Oropeza, J.D. Ríos y M. Martínez. 1999. Determinación del potencial hidrológico en tepetates tipo T3 con lluvia simulada. *Agrociencia* 33: 183-189.

Tapia V., M. 1999. Escurrimiento y producción de sedimentos en sistemas de manejo agrícola en la cuenca del lago de

Patzcuaro. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.