

ISSN 0187 - 5779

TERRA

JULIO - SEPTIEMBRE DE 1998 · VOLUMEN 16 · NUMERO 3



Órgano 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

Vicepresidente

Secretario General

Tesorero

Secretario Técnico

Secretario de Relaciones Públicas

Secretario de Eventos Nacionales

e Internacionales

Vocal

Vocal

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

M.C. Francisco Gavi Reyes

Biól. Rogelio Oliver Guadarrama

M.C. Gaspar Romero Hernández

EDITOR EN JEFE

EDITOR ADJUNTO

EDITORES TECNICOS

EDITOR DE ESTILO

Dr. Andrés Aguilar Santelises

Dr. Javier Z. Castellanos

Dr. Gabriel Alcántar González

Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro

Dr. Juan José Peña Cabriales

Dr. Xavier X. Uvalle Bueno

Dra. Edna Alvarez Sánchez

M.C. Jorge Alvarado López

DIVISIONES Y DISCIPLINAS

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

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

División II: Relación Suelo - Clima - Biota

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

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

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

División IV: Educación y Asistencia Técnica

- a) Educación
- b) Crédito y Asistencia Técnica

TERRA registro en trámite.

Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Julio - Septiembre de 1998 Volumen 16 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: +(595) 4 60 24 **Fax:** +(595) 4 80 76

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

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

Diseño de portada

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Jesús Caballero Mellado
Dr. Lenom J. Cajuste
Dr. Ronald Ferrera Cerrato
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval
M.C. Margarita E. Gutiérrez Ruiz
Dr. Reggie J. Laird
Dr. Angel Martínez Garza
Dr. Roberto Núñez Escobar
Dr. José Luis Oropeza Mota
M.C. 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. Carlos Roquero	España
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Bernardo Van Raij	Brasil
Dr. Rafael Villegas	Cuba
Dr. Eduardo Zaffaroni	Brasil

TERRA

JULIO - SEPTIEMBRE DE 1998 • VOLUMEN 16 • NUMERO 3

DIVISION I

- 189 Participación de la arcilla y la materia orgánica en la capacidad de intercambio catiónico de Vertisoles de la provincia Granma.
Lázara Otero, Fernando Ortega Sastriquez y Marisol Morales
- 195 Unidades fisiográficas de la reserva de la biosfera Sierra de Manantlán bajo un sistema de información geográfica.
Luis M. Martínez R. y José M. Ramírez R.

DIVISION II

- 205 Fertilización foliar orgánica e inorgánica y rendimiento de sorgo en condiciones de salinidad.
Luis Felipe Ramírez Santoyo, Gabriel Alcántar González, Manuel Ortega Escobar, Alberto Escalante Estrada, Marcos Soto Hernández y Prometeo Sánchez García
- 211 Comportamiento nutrimental de frambuesa roja cultivada en un suelo alcalino y con aspersiones foliares de urea, Mn y Zn.
Ovidio Salazar Salazar y Gustavo Adolfo Baca Castillo
- 219 Estimación de la humedad del suelo para maíz de temporal mediante un balance hídrico.
H. E. Flores L. y J.A. Ruíz C.

DIVISION III

- 231 Cobertura vegetativa y fertilización nitrogenada en la producción de maíz.
Pedro Betancourt Yanez, Jesús González Ríos, Benjamín Figueroa Sandoval y Félix González Cossio
- 239 Respuesta del maíz de riego a humedad del suelo, nitrógeno y densidad de población en Cuauhtemoc, Chihuahua.
Jesús P. Amado Alvarez y Pedro Ortíz Franco

- 247 Estimación de diferentes modelos de regresión a experimentos de fertilización y su comparación con fines de generar recomendaciones óptimas económicas. I. Casos con un factor.
Héctor Hugo Rebolledo Robles
- 259 Comportamiento de la palma de coco en cinco sistemas de producción del estado de Colima, México.
Eleazar Ordáz Ordáz y Octavio Pérez Zamora
- 269 Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los valles centrales de Oaxaca. I. Determinación del potencial productivo.
Jaime Ruíz Vega

ENSAYOS

- 277 Geometría fractal en la ciencia del suelo.
Ricardo David Valdez-Cepeda y Emilio Olivares-Sáenz
- 289 Microorganismos y biodiversidad.
V. Olalde Portugal y L.I. Aguilera Gómez

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

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

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

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

EDITOR-IN-CHIEF
ASSOCIATE EDITOR
TECHNICAL EDITORS

Dr. Andrés Aguilar Santelises
Dr. Javier Z. Castellanos
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dr. Xavier X. Uvalle Bueno
Dra. Edna Álvarez Sánchez
M.C. Jorge Alvarado López

STYLE EDITOR

DIVISIONS AND DISCIPLINES

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

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

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

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

Division III: Use of the Soil Resource

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

Division IV: Education and Technical Assistance

- a) Education
- b) Credit and Technical Advise

TERRA Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
July - September, 1998 Volume 16 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: +(595) 4 60 24 **Fax:** +(595) 4 80 76

EDITORIAL STAFF

Cover design

Ina Aalmers de Aguilar
Sofía Blancas Cando
Ricarda Torres Estrada
María Elena Aguilar Sánchez
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. José Luis Oropeza Mota
M.C. 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. Morrás	Argentina
Dr. Christian Prat	France
Dr. Parker F. Pratt	U.S.A.
Dr. Paul Quantin	France
Dr. José Rodríguez	Chile
Dr. Carlos Roquero	Spain
Dr. Karl Stahr	Germany
Dr. Bernardo Van Raij	Brazil
Dr. Rafael Villegas	Cuba
Dr. Eduardo Zaffaroni	Brazil

TERRA

JULY - SEPTEMBER, 1998 • VOLUME 16 • NUMBER 3

DIVISION I

- 189 Participation of clay and organic matter on the cationic exchange of Vertisols of Granma province.
Lázara Otero, Fernando Ortega Sastriquez, and Marisol Morales
- 195 Physiographic Units of the biosphere reserve Sierra de Manantlan using a geographic information system.
Luis M. Martínez R. and José M. Ramírez R.

DIVISION II

- 205 Organic and inorganic foliar fertilization and grain sorghum yield under saline conditions.
Luis Felipe Ramírez Santoyo, Gabriel Alcántar González, Manuel Ortega Escobar, Alberto Escalante Estrada, Marcos Soto Hernández, and Prometeo Sánchez García
- 211 Nutritional behavior of raspberry cultivated in an alkaline soil and with urea, Mn and Zn foliar sprays.
Ovidio Salazar Salazar and Gustavo Adolfo Baca Castillo
- 219 Soil moisture estimation for rainfed corn by water balance.
H. E. Flores L. and J.A. Ruiz C.

DIVISION III

- 231 Vegetative cover and nitrogen fertilization in corn production.
Pedro Betancourt Yanez, Jesús González Ríos, Benjamín Figueroa Sandoval, and Félix González Cossio
- 239 Response of irrigated corn to humidity in the soil, nitrogen, plant populations in Cuauhtemoc, Chihuahua.
Jesús P. Amado Alvarez and Pedro Ortíz Franco

- 247 Estimation of different regression models in fertilizer experiments in order to obtain optimum economic rates. I. One factor examples.
Héctor Hugo Rebolledo Robles
- 259 Behavior of coconut palm in five agricultural systems of Colima state, Mexico.
Eleazar Ordáz Ordáz and Octavio Pérez Zamora
- 269 Agroecological zoning of rainfed maize in the central valleys of Oaxaca. I. Yield potential determination.
Jaime Ruíz Vega

ESSAYS

- 277 Fractal geometry in soil science.
Ricardo David Valdez-Cepeda and Emilio Olivares-Sáenz
- 289 Microorganisms and biodiversity.
V. Olalde Portugal and L.I. Aguilera Gómez

PARTICIPACION DE LA ARCILLA Y LA MATERIA ORGANICA EN LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DE VERTISOLES DE LA PROVINCIA GRANMA

Participation of Clay and Organic Matter on the Cationic Exchange of Vertisols of Granma Province

Lázara Otero¹, Fernando Ortega Sastriquez² y Marisol Morales¹

RESUMEN

Se determinó la parte del intercambio catiónico que corresponde a la fracción mineral y a la orgánica de los Vertisoles estudiados, así como la capacidad de intercambio específica de la materia orgánica y la arcilla. Estas evaluaciones se realizaron empleando un método analítico y un método de cálculo matemático.

Palabras clave: Cambiadores, capacidad de adsorción, intercambio específico.

SUMMARY

The influence of mineral and organic fractions on cation exchange capacity of soil was studied, so as the specific exchange capacity of clay and organic matter on Vertisols of Granma province. These evaluations were analyzed by chemical and mathematical methods.

Index words: Exchangers, adsorption capacity.

INTRODUCCION

En la Segunda Clasificación Genética de los suelos de Cuba (Academia de Ciencias, 1975) y en la Clasificación Genética de los Suelos de Cuba, 1979 (Instituto de Suelos, 1980) los Vertisoles fueron denominados Oscuros Plásticos (Vertisuelos), tomando como base para su clasificación el régimen hídrico relacionado con la evolución del paisaje.

La provincia Granma, situada en el oriente de la República de Cuba, es una región de gran importancia económica para el país, puesto que en ella se cultivan la caña de azúcar, arroz, pastos y otras especies. De

acuerdo con los datos del mapa 1:25 000 (Dirección Provincial de Suelos y Fertilizantes, inédito)¹⁾ en esta provincia los suelos Oscuros Plásticos ocupan 41.38 % de la porción llana, por lo que representan 17.8 % del área agrícola total provincial (Hernández *et al.*, 1989).

A pesar de ocupar estos suelos un peso importante en la agricultura de la provincia, su alto potencial productivo se ve afectado por fenómenos degradantes como salinidad, alcalinidad, mal drenaje; en muchos de los casos, inducidos por la propia actividad antrópica, que determina particularidades específicas en el intercambio catiónico de los mismos. Resulta de gran importancia la caracterización y la participación de los "cambiadores" en el intercambio catiónico de los suelos, ya que permite evaluar la degradación y las medidas de mejoramiento.

La caracterización de la participación de la materia orgánica y la arcilla en la capacidad de intercambio catiónico total se realiza con el empleo de métodos analíticos y estadísticos, que conllevan en el primer caso a la remoción de uno de esos dos componentes y obtención por diferencia con la capacidad de intercambio catiónico total, el aporte de cada una de estas fracciones (Williams, 1932). La otra vía utilizada consiste en establecer correlaciones múltiples para obtener ecuaciones de regresión que relacionan estos componentes (Wright y Foss, 1972; Somani, 1983).

En el presente trabajo se caracteriza la participación de la fracción mineral y orgánica en la capacidad de intercambio de Vertisoles de la provincia Granma (República de Cuba), así como el intercambio específico de la materia orgánica y la arcilla que contienen, utilizando ambos métodos de estudio.

¹ Instituto de Suelos del MinAgr., Apartado Postal 8022, Ciudad Habana, Cuba.

² Centro de Arqueología y Etnografía, Buenos Aires 111, Ciudad Habana, Cuba.

¹⁾ Caracterización de los perfiles del mapa 1:25 000.

MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo fue realizado en ocho municipios (Media Luna, Río Cauto, Cauto Cristo, Bayamo, Jiguani, Manzanillo, Niquero y Yara), en los cuales hay existencia de los suelos en estudio. Se realizó la valoración de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los Vertisoles y de su relación con los contenidos de materia orgánica y arcilla evaluados para la realización del mapa 1:25 000 a nivel provincial, para lo cual se valoraron los resultados de 810 perfiles de Vertisuelos. Posteriormente se procedió a determinar las ecuaciones de regresión que correlacionan linealmente a estos parámetros zonalmente.

Para la determinación analítica de la participación de la materia orgánica y la arcilla en el intercambio catiónico, se efectuó un muestreo a nivel provincial teniendo en cuenta las variaciones espaciales y como base perfiles de Vertisuelos descritos por Vantour *et al.* (1988), Hernández *et al.* (1989) y Orellana *et al.* (1990). El intervalo de los contenidos de los principales parámetros que caracterizan a 20 muestras de 0 a 20 cm seleccionadas, aparecen en el Cuadro 1. Se eliminó la fracción orgánica mediante calcinación lenta a 350 °C, durante seis horas (Mitchell, 1932), determinándose la capacidad de intercambio catiónico total por el método Schatchabell (Instituto de Suelos, 1985) en la muestra inalterada y en la tratada con el procedimiento descrito. El intercambio de la fracción orgánica se obtuvo por la diferencia entre el intercambio catiónico de la muestra sin alterar y la muestra tratada.

El contenido de materia orgánica se determinó según Walkley Black y la arcilla dispersando el suelo con pirofosfato de sodio al 4 %, con uso de majador y lectura de dicha fracción por el método de la pipeta (Orellana *et al.*, 1984).

El intercambio catiónico específico de los cambiadores fue obtenido por cálculo, a partir de la participación de éstos en el intercambio, la CIC del suelo y los contenidos porcentuales de arcilla y materia orgánica en las muestras.

RESULTADOS Y DISCUSION

La valoración de los datos del mapa 1:25 000 informa que la capacidad de intercambio catiónico de estos suelos es alta, ya que en todos los horizontes genéticos más que 70 % de los suelos poseen una CIC entre 40 y 70 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, siendo más frecuente el

Cuadro 1. Rango de las propiedades fundamentales de las muestras a las cuales se les determinó la participación de la arcilla y la materia orgánica en el intercambio catiónico, por el método analítico.

Propiedades	Rango	Promedio	CV	S _x
			%	
CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	30-70	57.65	18.94	2.44
% V	57.7-98.9	80.15	13.05	2.33
pH	5.8-8.1	7.42	8.84	0.15
% Materia orgánica	2.45-13.22	4.66	51.08	0.53
% Arcilla	30.97-52.71	43.29	16.03	0.22
% CaCO_3	0.12-35	9.22	104.16	2.15

rango de 50 a 60 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, que se hace más probable a medida que aumenta la profundidad, y poco frecuentes valores menores y mayores que 40 y 70 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente (Cuadro 2).

El análisis de las tendencias de la CIC, la materia orgánica y la arcilla, indica la fuerte dependencia que tiene la fracción mineral en las características adsorbentes de estos suelos, ya que aunque la CIC tiene poca variación, tiende a aumentar con la profundidad, al igual que la arcilla; mientras que la materia orgánica tiende a decrecer. Son suelos saturados y de reacción muy débilmente alcalina en la superficie; con la profundidad aumenta el grado de alcalinidad y saturación por bases (Cuadro 3).

El horizonte Ap, que se refiere a la capa arable de los suelos arroceros tiende a tener menor CIC, porcentaje V, materia orgánica, porcentaje de arcilla y pH que el horizonte A1 de los suelos restantes dedicados a otros cultivos, por la influencia que provocan los ciclos sucesivos de oxidación-reducción en este horizonte (Navarro, 1988).

A nivel provincial no se encontró una ecuación de ajuste única que relacionara el valor de la CIC con el porcentaje de MO y el porcentaje de arcilla, lo que es debido a la anisotropía del intercambio catiónico (Otero, 1993); que presenta los valores mayores hacia Bayamo y Jiguani y los menores hacia Yara y Manzanillo. Esta tendencia puede ser explicada a que los suelos Oscuros Plásticos ubicados en la zona de Bayamo y Jiguani son los más arcillosos (en superficie 57.1 y 61.94 % como promedio, respectivamente), y son los de mayor contenido medio de materia orgánica (3.49 y 3.36 %, respectivamente); inversamente a la zona de Yara-Manzanillo que presenta empobrecimiento de arcilla en superficie (48.39 %), por su traslado a los horizontes inferiores y menor contenido medio de materia orgánica (2.13 %).

Las ecuaciones de regresión encontradas en el procesamiento estadístico de los contenidos de arcilla,

Cuadro 2. Intervalos de frecuencia (%) de los valores de la CIC ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) de los Vertisoles de la provincia Granma (según los datos del mapa 1:25 000).

Horizontes	Intervalos ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)					N
	<40	40-50	50-60	60-70	70-100	
	Frecuencia					
	----- % -----					
A _p	18.82	24.70	22.35	17.64	16.47	85
A ₁	11.71	23.45	29.71	21.99	12.84	725
A ₁₁	8.67	26.57	33.38	19.20	9.54	554
A ₁₂	8.79	22.70	36.16	17.92	11.05	293
AC	5.83	28.81	38.03	19.54	7.78	638

materia orgánica y capacidad de intercambio de los municipios en estudio se presentan en el Cuadro 4. La evaluación particular de las ecuaciones encontradas para cada zona indica que existen diferencias locales en la capacidad adsorbente de los suelos y en la interrelación arcilla-materia orgánica dado por el contenido arcilloso, y la cantidad y la calidad de la materia orgánica, que nos indica de la necesidad de realizar las labores de manejo y de mejoramiento de suelo diferenciadas para cada región, en lo cual incide el fondo de tierra ocupado por cada subtipo de suelo en cada localidad y otras características edafoclimáticas específicas.

Al respecto, Peñafuerte (1991) demostró que el manejo del suelo Oscuro Plástico producto del cultivo del arroz, conlleva a pérdida de grupos funcionales activos de la materia orgánica, lo que conduce a la disminución de la capacidad intercambiadora de los suelos. En las regiones norte y este de la provincia (municipios Río Cauto, Cauto-Cristo y municipio Jiguani, respectivamente), no fue posible ajustar los datos analizados a ecuaciones, lo que se atribuye a la influencia espacial que ejerce la salinidad en las propiedades adsorbente de los suelos. Estos tres municipios están comprendidos en la Faja I de clima relativamente seco, en que los Vertisuelos presentan características diferenciales con los ubicados en la Faja II de clima de humedad alternante (Hernández *et al.*, 1989) donde fueron ajustadas las ecuaciones por zonas particulares.

González *et al.* (1990) reportaron presencia de montmorillonita Na-Ca en perfiles de suelos ubicados en puntos de la zona norte, lo cual no sólo verifica la formación de esa arcilla en medio salino, sino también propiedades coloidales diferenciales de los suelos de esa región, heredados de ese mineral secundario.

Dada la alta significación estadística de las ecuaciones obtenidas, es posible cuantificar la participación de la arcilla y la materia orgánica en el intercambio catiónico de los suelos Oscuros Plásticos comprendidos dentro de la zona demarcada para cada ecuación; así como evaluar la influencia del uso y manejo de los mismos sobre sus propiedades fisicoquímicas. En sentido general éstas indican, que a la arcilla le corresponde de 44.6 a 60.7 % del intercambio total, con una capacidad específica media de 42.54 a 68.6 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, siendo la fracción orgánica de 6.7 a 16.2 veces más reactiva que la arcilla (Cuadro 5). Las diferencias obtenidas divide la provincia en cuatro zonas diferenciadas en relación con las propiedades adsorbentes de los Vertisoles: la región de clima más seco (Río Cauto, Cauto-Cristo y Jiguani), Manzanillo, Bayamo y Guacanayabo (Yara, Niquero y Media Luna).

Drake y Mato (1982) han señalado que el método regresivo resulta más exacto que los que conllevan remoción de la arcilla o de la materia orgánica, ya que se trabaja con datos analíticos procedentes de muestras sin alterar, siendo su única limitante que no siempre se cuenta con un número suficiente de

Cuadro 3. Valores medios de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de V, de materia orgánica, de arcilla y pH de los Vertisoles de la provincia Granma (según los datos del mapa 1:25 000).

Propiedades Horizontes	CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	V	Materia orgánica	Arcilla	pH
			----- % -----		
A _p	53.96	90.04	2.56	54.04	6.92
A ₁	55.57	97.18	2.98	54.42	7.35
A ₁₁	55.62	98.06	1.59	59.77	7.49
A ₁₂	57.09	98.34	0.92	65.14	7.71
AC	54.97	98.58	-	57.80	7.66

Cuadro 4. Ecuaciones de regresión entre los contenidos de arcilla, materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico total en Vertisoles de la provincia Granma.

Localización	Número de muestras	CIC cmol _c kg ⁻¹ Rango	%			Ecuación de regresión	R ²
			X	X ₁	X ₂		
Manzanillo	24	20.8-58.0	43.76	44.61	2.73	Y = 4.8121 + 0.4256X ₁ + 6.8856X ₂	0.94**
Bayamo	34	33.2-88.8	59.29	52.46	3.09	Y = 13.3514 + 0.4938X ₁ + 21.4173X ₂	0.46**
Guacanayabo	66	20.8-95.4	56.11	53.90	3.03	Y = 12.8913 + 0.5287X ₁ + 4.8913X ₂	0.65**

Y = CIC cmol_c kg⁻¹. X₁ = porcentaje de arcilla. X₂ = porcentaje de materia orgánica.
* = significancia 0.05. ** = significancia 0.01.

muestras bajo una situación dada para realizar un análisis estadístico preciso.

En el Cuadro 6 se presentan algunos resultados encontrados en el análisis de las muestras individuales a las cuales se les determinó la capacidad de intercambio catiónico de la fracción mineral y total de los suelos. De acuerdo con el resultado obtenido en las fracciones analizadas, es mayor el intercambio por la parte arcilla, ya que representa de 51 a 69 % de la capacidad de cambio total de las muestras analizadas. Por este método se obtienen valores de la CIC de la arcilla un poco mayor que por el método estadístico, puesto que cuantificamos parte de las cargas utilizadas en interactuar con la materia orgánica, por lo que se debe referir con relación a él, como "CIC aparente de la fracción" (Boizzezon, 1973).

Dado este análisis, se puede ver que la capacidad de intercambio de la arcilla estuvo entre 55 y 94 cmol_c kg⁻¹.

La arcilla predominante en los suelos estudiados es la montmorillonita, lo cual determina que la mayor parte del intercambio sea mineral. Fernández (1988) encontró en los Vertisoles estudiados presencia de caolinita, lo cual justifica que la capacidad de cambio específico de la arcilla por ambos métodos esté por debajo de la reportada para la montmorillonita que es de 80 a 120 cmol_c kg⁻¹ (Fassbender, 1975; Cairo y Quitero, 1980).

Martínez *et al.* (1988) demostraron que el complejo organo-mineral de estos suelos está formado por una mezcla íntima entre el humus y el mineral arcilloso del tipo esmectita donde una parte

importante de las sustancias orgánicas está unida fuertemente a la red cristalina del mineral arcilloso, y una cantidad menor está en los espacios interlaminares que pudiera limitar la participación de la materia orgánica en el intercambio catiónico de los suelos.

Por ambos métodos de estimación de puede inferir que la materia orgánica de los Vertisoles estudiados deben poseer mayor cantidad de grupos ácidos en la periferia de su estructura (Ortega, 1982), que la de suelos similares en otras regiones, pues posee una reactividad mayor. Al respecto, Garcés y Fernández (1990) reportaron que los ácidos húmicos de Cuba son más reactivos que los de otros lugares del mundo.

Los resultados encontrados en las ecuaciones se enmarcan dentro de los reportados por Garcés (1987), quien cuantificó en suelos cubanos capacidad de cambio catiónico para el humus de 191 a 898 cmol_c kg⁻¹ y para la arcilla de 3 a 65 cmol_c kg⁻¹.

La valoración integral de los resultados encontrados para estos suelos en la provincia Granma permiten destacar que, en los mismos, la participación de la fracción mineral en la capacidad de intercambio catiónico total resulta, en general, mayor que el aporte que realiza la fracción orgánica, sin embargo, Otero (1993) encontró que cuando estos suelos no se cultivan, ambas fracciones presentan una participación equilibrada en la capacidad de intercambio catiónico, por lo cual recomendó para cada municipio, el contenido de materia orgánica que debe ser preservado con el manejo diferenciado para que evite efectos degradativos en su fertilidad.

Cuadro 5. Participación de la materia orgánica y la arcilla según el método regresivo en la capacidad de intercambio catiónico en el horizonte A₁ de Vertisoles de la provincia Granma.

Localización	CIC Relativa				CIC Específica	
	Arcilla		Materia orgánica		Arcilla	Materia orgánica
	cmol _c kg ⁻¹	%	cmol _c kg ⁻¹	%	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹
Manzanillo	18.98	44.57	18.79	44.12	42.54	688
Bayamo	35.99	60.70	14.13	23.83	68.60	457
Guacanayabo	28.50	50.70	14.82	26.36	52.87	489

Cuadro 6. Participación de la materia orgánica y la arcilla en la capacidad de intercambio catiónico de la profundidad de 0 a 20 cm de Vertisoles de la provincia Granma por el método analítico.

Localización	Materia orgánica		CIC Relativa		CIC Específica			
	Arcilla	Materia orgánica	Arcilla	Materia orgánica	Arcilla	Materia orgánica		
	----- % -----	----- % -----	cmol _c kg ⁻¹					
Punta salina A	52.12	2.81	35.7	51.0	34.3	49.0	67.15	1245
Punta salina B	50.58	2.64	34.0	66.6	26.0	43.4	67.22	984
Jucarito	43.20	3.03	24.0	60.0	16.0	40.0	55.55	528
Central Grito de Yara	49.24	4.43	40.0	57.14	30.0	42.9	77.63	677
G ₃	47.63	3.77	45.0	69.0	20.0	31.0	94.47	530

CONCLUSIONES

La CIC de la mayoría de los Vertisoles de la provincia Granma está comprendida entre 40 y 70 cmol_c kg⁻¹, lo que se considera alta, dada por el predominio de la arcilla en el intercambio catiónico; aunque la materia orgánica tiene una participación destacada en dicho proceso, cuantificado a través de su participación relativa en el proceso de adsorción como por su capacidad de intercambio específica, por lo cual es recomendable la aplicación de medidas de manejo que preserven su contenido.

La diversidad en los resultados recomienda el manejo diferencial regional de los Vertisoles de la provincia Granma; así como la aplicación del análisis de la participación de las fracciones intercambiadoras en la evaluación de la fertilidad de dichos suelos.

AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros Madelín Fernández y Antonio Hernández de la Dirección Provincial de Suelos y Fertilizantes de la Provincia Granma por su apoyo y colaboración en la realización de este trabajo.

Al Ingeniero Antonio Vantour Causse y al Dr. Gustavo Urbano del Instituto de Suelos por sus acertadas recomendaciones.

LITERATURA CITADA

- Academia de Ciencias de Cuba. 1975. II Clasificación genética de los suelos de Cuba. Serie Suelos 23. La Habana.
- Boizzeson, P. 1973. Les matières organiques des sols ferrallitiques. ORSTOM. Initiation Docum. Tech.21: 9-66.
- Cairo, P. y G. Quitero. 1980. Suelos. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba.
- Drake, E. y H.L. Moto. 1982. An analysis of the effect of clay and organic matter content on the cation exchange capacity of New Jersey soils. *Soil Sci.* 133(5): 281-288.
- Fassbender, H.W. 1975. Química de suelos. IICA. Turrialba.
- Fernández, L. 1988. Caracterización física y mineralógica de los principales subtipos de suelos Oscuros Plásticos de las provincias orientales cultivados con caña de azúcar. Tesis de Doctorado. Ministerio de Educación Superior. ISCAH, Habana, Cuba.
- Garcés, N. 1987. Características actuales del humus de los principales tipos de suelos de Cuba. Tesis de Doctorado. Universidad Agrícola. NITRA. Checoslovaquia.
- Garcés, N. y L. Fernández. 1990. Composición elemental de los ácidos húmicos y fúlvicos de algunos suelos de Cuba. *Cienc. Agric.* 39: 113-121.
- González, J.E., A. Marrero, J.M. Pérez y colab. 1990. Disponer de una clasificación para los suelos hidromórficos, así como los factores que inciden en su distribución. Informe del Resultado de Investigación 004-01-02 del Instituto de Suelos, Cuba.
- Hernández, A., J. Ruiz, J.M. Torres Font y colab. 1989. Regionalización geográfica de los suelos de Granma en escala 1:250 000 con elementos de mejoramiento para la caña de azúcar. Informe del Resultado de Investigación 004-01-06 del Instituto de Suelos, Cuba.
- Instituto de Suelos. 1980. Clasificación genética de los suelos de Cuba. La Habana.
- Instituto de Suelos. 1985. Manual de técnicas analíticas del Departamento de Química de Suelos.
- Martínez, F., I. Stepanov, F. Ortega Sastriques y N. Marrero. 1988. Fracciones organo-minerales de un suelo Oscuro Plástico (Vertisuelo) dispersadas con ultrasonido. *Cien. Agric.* 34-35: 114-121.
- Mitchell, J. 1932. Origin, nature and importance of soil organic constituents having base exchange properties. *J. Amer. Soc. Agron.* 24: 256-275.
- Navarro, H. 1988. El potencial Redox y su influencia en las propiedades químicas de los suelos en condiciones de inundación. Tesis de Doctorado. Instituto de Suelos, Ciudad Habana, Cuba.
- Orellana, R., L. Rivero, R. Delgado, H. Bouza, E. Valero e I. Martínez. 1984. Métodos físicos de investigaciones de los suelos. Instituto de Suelos.
- Orellana, R., F. Ortega Sastriques y T. Forbes. 1990. Métodos para caracterizar el estado físico de los suelos Vérticos y el régimen hídrico de los mismos. Informe del Resultado de Investigación 436-01 del Instituto de Suelos, Cuba.
- Ortega, F. 1982. La materia orgánica de los suelos y el humus de los suelos de Cuba. Editorial Academia. La Habana, Cuba.
- Otero, L. 1993. Particularidades del intercambio catiónico de los suelos Oscuros Plásticos de la provincia Granma relacionado con su manejo. Tesis de Doctorado. Ministerio de Agricultura. Instituto de Suelos. Ciudad Habana, Cuba.
- Peñafuerte, F. 1991. Influencia del cultivo continuado del arroz sobre el contenido y composición de la materia orgánica en

- un suelo Oscuro Plástico Gleyzoso Gris. Tesis de diploma. Universidad de la Habana, Facultad de Química, Cuba.
- Somani, L. 1983. The computation of the cation exchange capacity of soils from clay and organic matter content. *An. Edafol. Agrobiol.* 42(3/4): 463-470.
- Vantour, A., L. Otero y M. Morales. 1988. Característica de la fertilidad de los suelos de la provincia Granma. I Resultados de experimentos de macetas. Informa del Resultado de Investigación 436-05. Instituto de Suelos. Cuba.
- Williams, R. 1932. The contribution of organic matter to the base exchange capacity of soils. *J. Agr. Sci.* 22: 845-851.
- Wright, W. y J. Foss E. 1972. Contribution of clay and organic matter to the cation exchange capacity of Maryland soils. *Soil Sci. Amer. Proc.* 36: 115-118.

UNIDADES FISIOGRAFICAS DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA DE MANANTLAN BAJO UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA

Physiographic Units of the Biosphere Reserve Sierra de Manantlan using a Geographic Information System

Luis M. Martínez R. y José M. Ramírez R.¹

RESUMEN

La Sierra de Manantlán presenta una gran variabilidad de suelos, geología, topografía y climas, que en forma combinada dan una gama de hábitat importante para el desarrollo de la alta diversidad biótica existente. El objetivo de este trabajo fue definir unidades fisiográficas utilizando un sistema de información geográfica basado en las características edafológicas, geológicas y de pendiente de la sierra. La idea es que estas unidades puedan ser utilizadas como referencia en la clasificación de vegetación y que también sean un elemento que proporcione información para el manejo de los recursos naturales de la reserva de la biosfera. Se digitalizó cartografía de la región a escala 1:100 000 de las cartas de suelos y geología. El mapa de pendientes fue generado con base en un modelo digital de elevación. Se sobrepusieron las unidades utilizando el sistema de información geográfica IDRISI, en donde se analizaron y filtraron las imágenes hasta generar unidades que presentaran patrones definidos en cuanto a los factores físicos antes mencionados. Para evaluar el nivel de asociación de las unidades fisiográficas con la distribución de la vegetación, se corrieron los índices de asociación utilizando el coeficiente de correlación de Cramer y el índice de Kappa, dando valores de 0.44 y 0.38, respectivamente.

Palabras clave: Unidades fisiográficas, sistema de información geográfica.

¹Instituto Manantlán de Ecología y Conservación de la Biodiversidad, Universidad de Guadalajara, Independencia Nacional 151, 48900 Autlán, Jal. México

Aceptado: Septiembre de 1998.

SUMMARY

The Sierra de Manantlán presents a large variability in terms of soils, geology, topography, and climate, which together give a wide type of habitats with a large biotic diversity existing in the area. The main objective of this paper was to define physiographic units using a geographical information system based on the soil, geology, and slope characteristics of the Sierra. The idea is that these units could be used both as a reference to make a classification of the natural vegetation, and to provide information at the unit level for environmental management in the biosphere reserve. Soils and geology maps, scale 1:100 000, were digitized to generate these units. The slope map was obtained using a digital elevation model. Overlaying of the three maps was done using IDRISI, a raster geographic information analysis system, in which the digital images were analyzed and filtered to obtain the final physiographic units. Finally, to know the association between the generated units and the vegetation, Cramer's V correlation coefficient and the Kappa Index of Agreement were used, rendering values of 0.44 and 0.38, respectively.

Index words: Physiographic units, geographical information system.

INTRODUCCION.

El manejo de la cartografía digitalizada bajo sistemas de información geográfica se ha convertido en una importante herramienta para la planificación y manejo de los recursos naturales de las áreas protegidas. La Sierra de Manantlán, por su diversidad en el relieve, topografía, suelos y geología, conforma una gran diversidad de patrones geomorfológicos, que requieren de un manejo especial. Es por esto la

importancia de definir unidades que coadyuven a un manejo y conservación adecuado de los recursos de la sierra. Las unidades fisiográficas son una importante clasificación del paisaje, aunado con el uso del suelo y las características climáticas en que se desarrollan los recursos naturales de la sierra. Dichas unidades también pueden servir como base para la re zonificación de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM), que permitan proponer áreas con diferentes uso y manejo que faciliten el desarrollo tanto de actividades de investigación y conservación, así como el aprovechamiento y manejo de los recursos naturales del área por los pobladores de la misma.

Descripción del Area de Estudio

La Sierra de Manantlán (SM) pertenece a la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, a la subprovincia Sierra de la Costa de Jalisco y Colima dentro de la Sierra de Cumbres Tendidas, enclavada entre los paralelos $19^{\circ}26'47''$ a $19^{\circ}42'05''$ norte y los meridianos $104^{\circ}27'05''$ a $103^{\circ}51'12''$ oeste (Figura 1). Su extensión cubre una superficie aproximada de 140 000 ha (SPP, 1985).

Geología y Geomorfología

De acuerdo con la tectónica de la región, el levantamiento de la SM se inició a fines del cretácico siendo parte de los eventos orogénicos que dieron origen a la Sierra Madre del Sur y probablemente asociados a la trinchera mesoamericana, la cual se localiza a 8 km de la costa, formando un abismo marino de 4 a 5 km de profundidad. Esta estructura es activa, y se extiende desde la costa de Jalisco hasta Centroamérica y es causa de la alta sismicidad que presenta la región, así mismo, el tectonismo durante el cuaternario se manifestó por la presencia de gran cantidad de volcanes, destacando el Volcán del Fuego. Además, la región (Sierra de Manantlán) está formada por la unidad tectónica denominada Batolito de Tomatlán (Consejo de Recursos Minerales, CRM, 1988).

Por su parte, Lazcano (1988) menciona que la actividad endógena relacionada con el vulcanismo del eje neovolcánico y la presencia de la trinchera neovolcánica, están teniendo gran influencia en el modelado actual de la región.

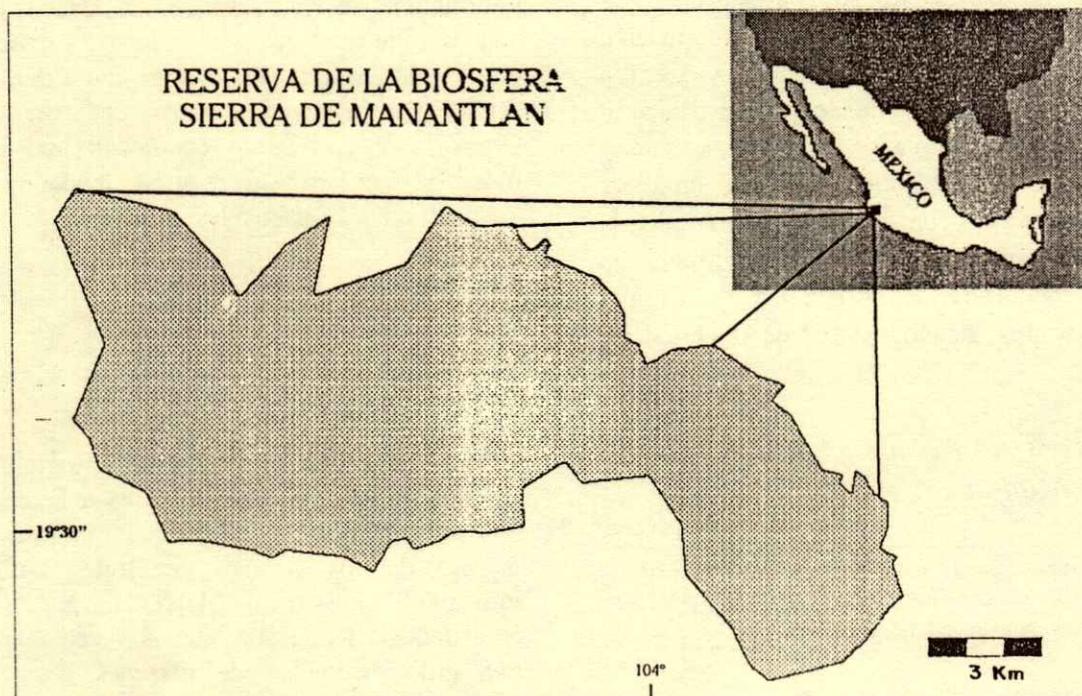


Figura 1. Localización de la Sierra de Manantlán.

La litología de la SM está constituida por calizas del cretácico, rocas plutónicas ácidas de dimensiones batolíticas, piroclastos y derrames de composición variable. Lazcano (1988) describe la parte oriente de la sierra, representada por un alineamiento montañoso calcáreo llamado Cerro Grande y en la cual las rocas aflorantes más antiguas pertenecen al cretácico, correspondiendo (CRM, 1988; Munguía, 1989) a sedimentos marinos de las formaciones Madrid (Albiano Medio-Tardío) y Morelos (Cenomaniano). La primera consta de caliza arcillosa o lutita y la segunda de calizas arrecifales, estando ambas en contacto concordante.

La parte occidental de la SM está formada principalmente de rocas volcánica ígneas intrusivas y extrusivas del Terciario entre las que se encuentran andesitas, tobas, brechas, riolitas y basaltos (Solis, 1965; Sandoval, 1984). El basalto es el producto final del vulcanismo del Cenozoico. Existen aparatos volcánicos que han tenido actividad en los últimos 500 años y el volcán de Colima es un ejemplo de ello: aún se encuentra activo y ha dado lugar a la formación de lahares, cenizas, lapilli, tobas y derrames de

carácter andesítico-basáltico que se han agrupado en las formaciones Colima y Atenquique (CRM, 1988).

De acuerdo con la carta geológica (INEGI, 1984), la SM presenta nueve diferentes tipos de rocas: rocas ígneas intrusivas, ígneas extrusivas, calizas, tobas, basalto, granito, conglomerados, areniscas-conglomerado y aluvión (Figura 2).

En la expresión geomorfológica que exhibe la SM, la parte occidental corresponde a una topografía rugosa, donde destacan grandes cantiles, cordones delgados, fuerte disección de arroyos y fuerte gradiente de pendiente. Podemos encontrar algunas planicies aluviales en algunas cuencas como Cuzalapa, La Yerbabuena y Manantlán y muy pequeñas áreas en otras cuencas. La parte oriental constituida por el macizo montañoso de Cerro Grande es semiplana. La Sierra encaja en un ciclo erosional juvenil de etapa temprana (Quintero *et al.*, 1993).

De acuerdo con Luna (1985), la meseta de Cerro Grande presenta dos tipos de formas de relieve: laderas de montaña, que se encuentran en el flanco occidental y oriental de la estructura montañosa cortada por un red paralela de barrancos, cuya disección vertical es de

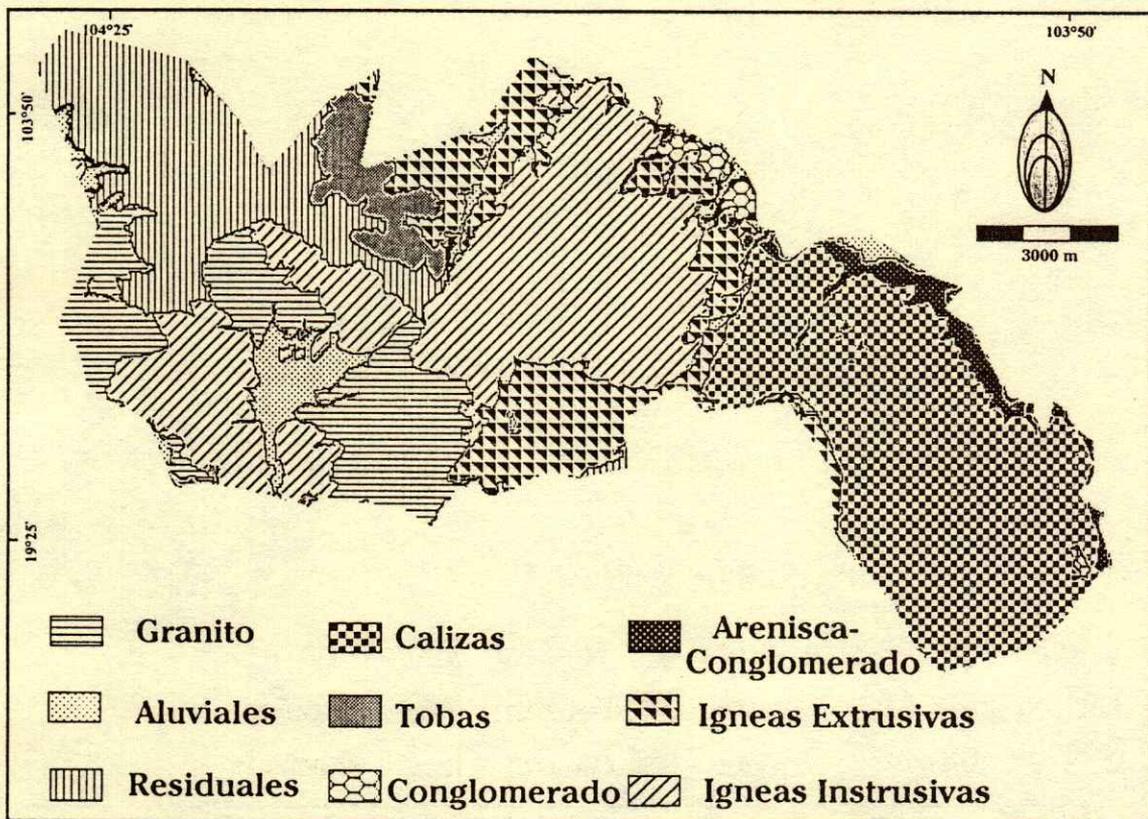


Figura 2. Geología superficial de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán.

débil a intensa y es en general del orden de 40 a 150 m. La otra forma corresponde a una zona montañosa con fuerte desarrollo cárstico. Es prácticamente la mayor parte de la meseta de Cerro Grande. Esta zona se encuentra generalmente entre 1100 y 2200 msnm y se encuentra afectada por una gran cantidad de formas negativas cársticas cuyas dimensiones varían desde 150 m a 3 km.

Suelos

La complejidad fisiográfica de la SM y la variabilidad de la pendiente ocasionan una gran diversidad de geformas, dando como parte de esta combinación un total de 13 órdenes de suelo de acuerdo con la clasificación de FAO (INEGI, 1984). Los órdenes de suelos existentes son Litosoles, Regosoles, Fluvisoles, Rendzinas, Acrisoles, Gleysoles, Feozems, Luvisoles, Castañozems, Andosoles, Cambisoles, Chernozems y Vertisoles (Figura 3). Del total de suelos existentes, 66 % está cubierta por litosoles y regosoles, que son suelos someros, de poca fertilidad, textura arenosa y muy

susceptibles a la erosión. Los cambisoles, que son suelos de desarrollo incipiente y coloración rojiza presentan 17.5 %. Los andosoles cubren 5.4 %, concentrados en la meseta de Cerro Grande, con fuerte influencia del Volcán de Colima por la deposición de cenizas volcánicas. Los fluvisoles, gleysoles y feozems que constituyen 5.1 % son los suelos dedicados a la actividad agrícola de riego y temporal con presencia de pendientes relativamente planas. Los acrisoles y luvisoles, suelos forestales, constituyen 4.2 % de la superficie y se encuentran principalmente en la parte central de la sierra.

Metodología

Para la definición de las unidades fisiográficas se utilizó cartografía edafológica, geológica y de pendientes. Los mapas edafológicos y geológicos fueron digitalizados de una escala 1:100 000 con base en la cartografía del INEGI (1976, 1984). El mapa de pendientes fue generado a través del uso de un modelo digital de elevación con resolución de 3"x3" de arco.

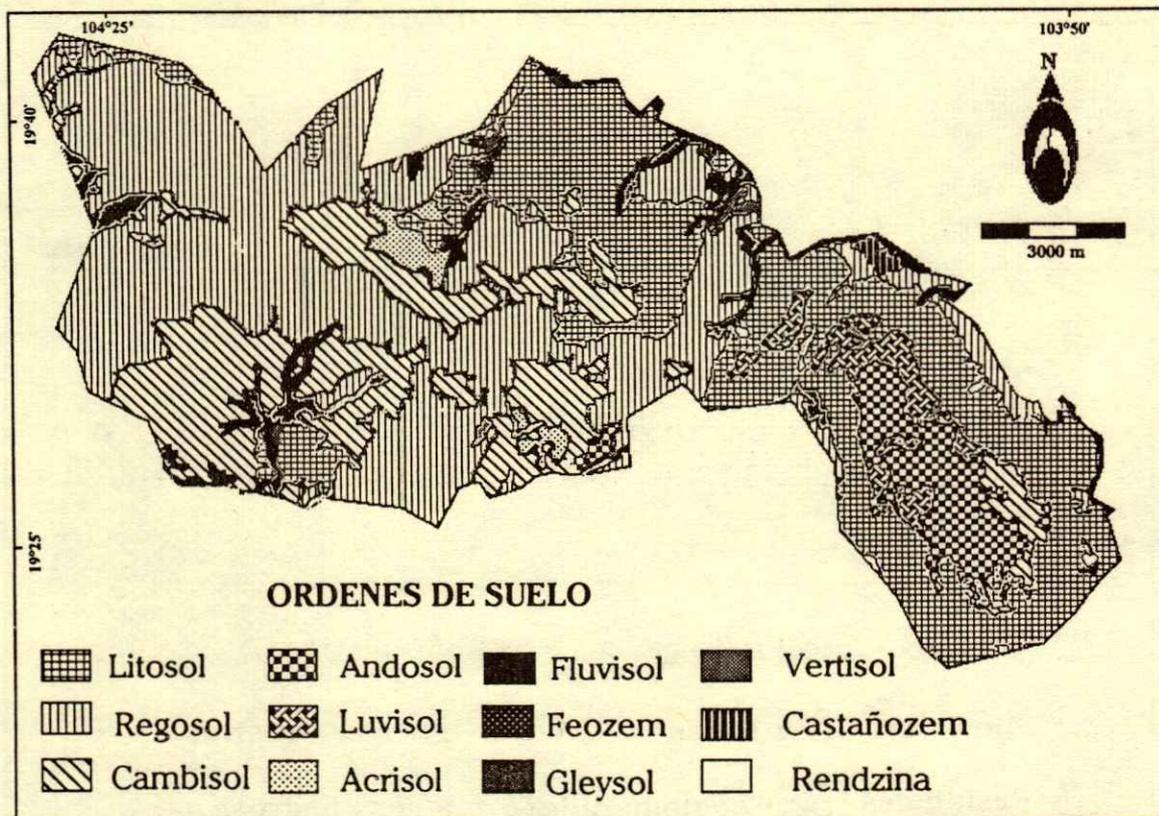


Figura 3. Unidades de suelos existentes en la Sierra de Manantlán.

Se digitalizó además el mapa de vegetación escala 1:100 000 (obtenido sobre la base de los mapas del INEGI a escala 1:50 000) para ser comparado con las unidades fisiográficas resultantes.

Para la digitalización y manejo de la información cartográfica digital se utilizó un sistema de información geográfica (SIG), basado en el programa de cómputo IDRISI 1.0 (Eastman, 1992) para el manejo de la cartografía en formato digital y el análisis y procesamiento de la misma. El mapa de pendientes fue generado a través del uso de un modelo digital de elevación (MDE), con una resolución de 3"x3" de arco. El mapa de pendientes generado fue clasificado en cuatro rangos de pendiente: de 0 a 15 %, 15 a 30 %, 30 a 45 % y >45 % (Figura 4). Estos rangos fueron definidos con base en la apreciación visual de un mapa topográfico en donde estas pendientes indican en forma general los patrones geomorfológicos. Esto fue basado principalmente en cuatro grandes patrones geomorfológicos, valles (0 a 15 %), piedemonte (15 a 30 %), ladera (30 a 45 %) y áreas escarpadas (>45 %).

Dentro del SIG se realizó una sobreposición de las imágenes de geología y suelos, generando una imagen

con un total de 69 unidades geoedafológicas. Debido a la complejidad de la imagen generada con cientos de polígonos por cada unidad, algunos formados únicamente por un pixel, se realizó una depuración a través de un filtrado de la imagen utilizando el parámetro estadístico de la moda para el filtrado. Se utilizó la moda ya que interesaba que los polígonos de las 69 unidades a filtrar se integraran a la unidad mayor dominante; un segundo paso fue eliminar las unidades menores que 100 ha, debido a que unidades menores a la escala de la Sierra de Manantlán, son pequeñas para considerarlas en el manejo. Este proceso mantuvo las 69 unidades, pero limpiadas de un numeroso número de pixeles que limitaban la integración de unidades mayores. Además, que si no se realizaba esta operación, en la combinación con el mapa de pendientes, daba como resultado la combinación de miles de polígonos.

A la imagen obtenida después del filtrado y depuración, se le sobrepuso la imagen de pendientes, dando un total de 166 combinaciones, a las cuales se les siguió un proceso similar de filtrado que a la imagen anterior, quedando un total de 90 unidades

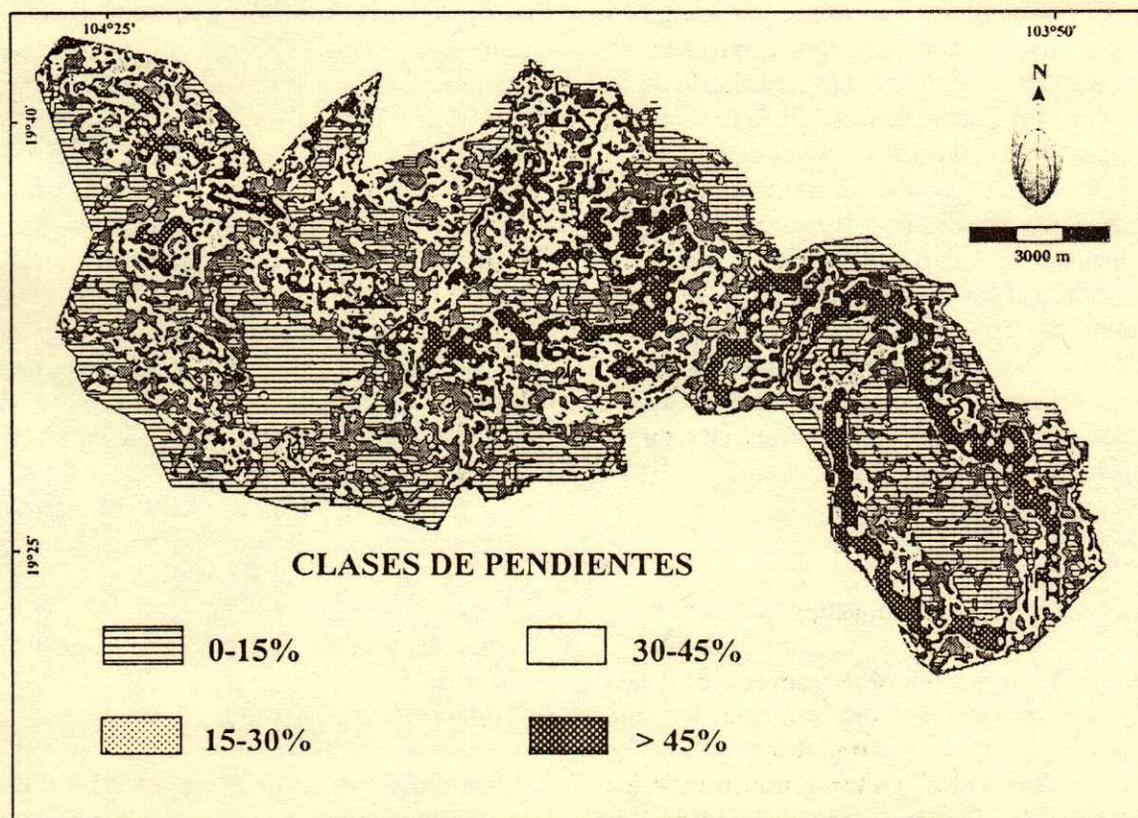


Figura 4. Mapa de pendientes obtenido a través de un Sistema de Información Geográfica.

de suelos-geología-pendiente. Estas unidades ya presentaban una interrelación entre los tres mapas de suelo, es decir, que presentaban una relación del tipo de suelo como un factor producto de la geología y la pendiente.

Al mapa de suelo-geología-pendiente generado se le realizó una agrupación de clases con base en las siguientes condiciones:

- a) Se agruparon aquellas clases de suelos que presentaban características similares para el manejo de los mismos. Dichas características fueron: 1) Suelos relacionados con valles, terrazas o planicies aluviales, entre los que se incluyeron los fluvisoles, vertisoles, feozems y gleysoles. 2) Suelos de zonas montañosas, desarrollados bajo pendientes pronunciadas y someros, en donde se incluyeron los litosoles y regosoles. 3) Suelos de zonas montañosas en zonas con pendiente moderada, profundos y bien desarrollados en los que se incluyeron los acrisoles, luvisoles y andosoles. 4) Suelos incipientes, someros a profundos, en pendientes de 15 a 30 %, en los que se incluyó únicamente los cambisoles. 5) Los demás suelos fueron dejados en una sola clase cada uno, entre los que se encuentran los chernozems, castañozems y rendzinas.
- b) Para el caso de las características geológicas, se agruparon las rocas de similar origen, quedando de la siguiente forma: 1) Rocas calizas. 2) Rocas ígneas intrusivas (rocas ígneas intrusivas ácidas e intermedias granito). 3) Rocas ígneas extrusivas (rocas ígneas extrusivas ácidas e intermedias y basaltos). 4) Tobas. 5) Conglomerados. 6) Arenisca. 7) Aluviales, residuales.

Con esta reclasificación se generó un nuevo mapa con un total de 66 unidades, las cuales fueron agrupadas con base en características geomorfológicas, de origen y pendiente que fueran determinantes y que las separaran de las demás en un total de nueve unidades fisiográficas.

RESULTADOS

Descripción de Unidades Fisiográficas

Por su origen, se separan dos grandes zonas, una constituida por formaciones de origen volcánico, formado por la parte occidental de la Sierra de Manantlán y la Sierra del Perote; la otra constituida por formaciones de origen sedimentario, donde se incluyen el Cerro de Enmedio y el domo calcáreo de Cerro Grande. Se determinaron un total de nueve

unidades (Figura 5), agrupándose éstas con base en sus características de formación y pendiente o geoforma. De estas nueve unidades, cinco corresponden a las formaciones de origen volcánico, tres de origen sedimentario y una unidad que tiene confluencia con ambas formaciones. La descripción de estas unidades se detalla a continuación:

Unidad 1 (Ayuquila). Esta unidad es la que presenta la confluencia entre ambas formaciones y está asociada con los márgenes de los ríos, principalmente del Río Ayuquila-Armeria en su mayor proporción, aunque también se encuentran pequeñas áreas de los arroyos Manantlán, El Tecolote y la Pasión. Esta unidad se caracteriza por tener suelos de origen aluvial en pendientes menores que 5 % tales como fluvisoles y feozems. Suelos fértiles dedicados principalmente a la agricultura de riego y constituyen 32 % de esta unidad. En pendientes mayores que 5 % y hasta 15 %, los suelos se caracterizan por ser muy someros, menores que 50 cm, constituidos por litosoles y regosoles. Es importante indicar que en esta unidad, aun cuando está asociada con ríos, predominan los suelos someros, pudiendo ser debido a varias causas: Una es la degradación de los márgenes de los ríos y otra a cambios abruptos de pendiente en los márgenes de los mismos. Esta zona se desarrolla entre cañones y valles. El material parental de esta unidad está constituido dependiendo de la zona por donde va pasando el río, predominando el aluvión, pero además con materiales como basalto, areniscas, conglomerados y calizas.

Unidad 2 (Toxin). Esta unidad se localiza en el macizo de Cerro Grande, principalmente en las zonas arriba de la unidad Ayuquila, la parte baja de la cuenca endorreica de Toxin y una zona de transición entre las Unidades 3 y 4. Predominan los suelos someros (litosol y regosol), aunque en la parte alta de la meseta, encontramos algunos cambisoles, andosoles y en menor proporción acrisoles. El material parental es de origen sedimentario predominando las calizas, seguido por areniscas y conglomerados. La pendiente es muy irregular variando de 15 a 45 %. Las geoformas predominantes de esta unidad son laderas cóncavas.

Unidad 3 (Cerro Grande). Esta unidad circunda el macizo de Cerro Grande y se caracteriza principalmente por su pendiente abrupta (>45 %), desarrollado sobre material calizo, que lo hace altamente susceptible a la erosión y disección. Los suelos están dominados por litosoles y regosoles.

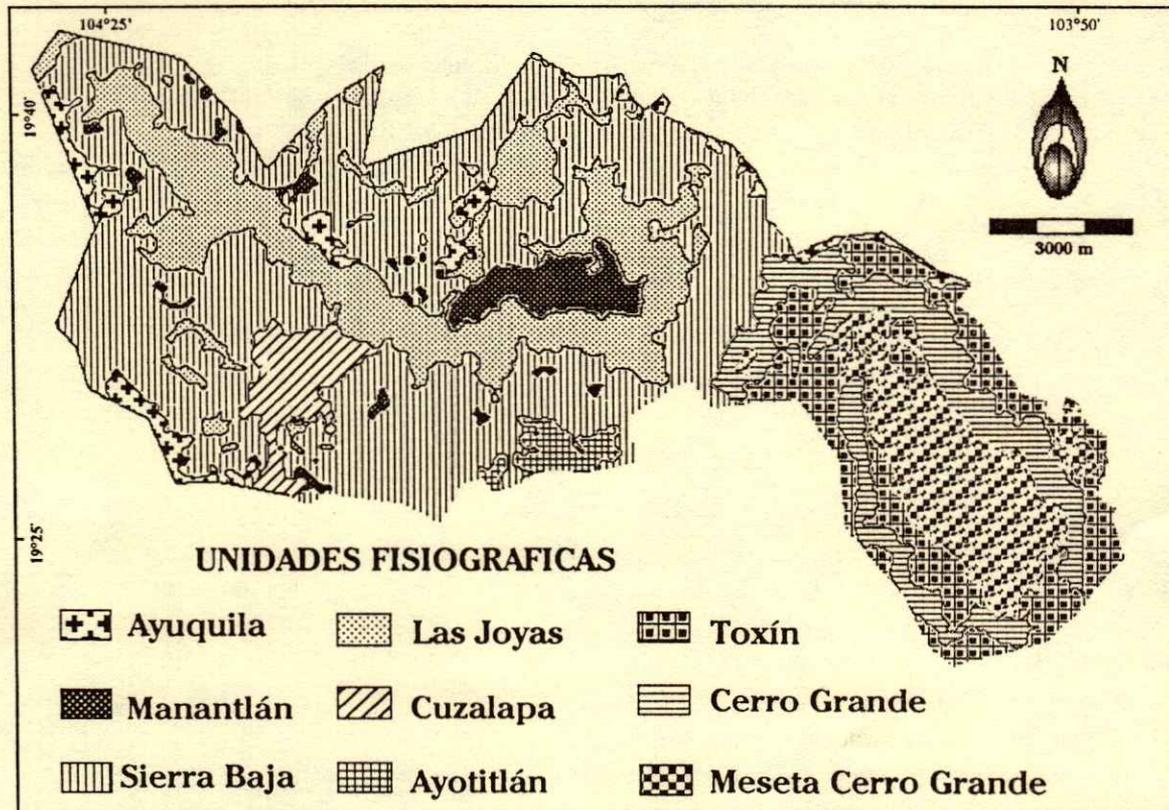


Figura 5. Unidades fisiográficas obtenidas para la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán.

Unidad 4 (Meseta de Cerro Grande). Esta unidad se localiza en la meseta de Cerro Grande, con una topografía irregular, caracterizada por lomeríos, con pendientes que oscilan entre 0 y 15 %. Esta zona presenta un desarrollo cárstico muy intenso, con presencia de dolinas, resumideros y poljes. El material parental de esta unidad es de calizas y los suelos desarrollados varían en profundidad y tipo, dependiendo de las condiciones microclimáticas y de pendientes en donde fueron desarrollados, predominando los andosoles, que presentan una influencia de las cenizas volcánicas, seguido de los cambisoles que son suelos incipientes, rojos, de moderada fertilidad y con menor superficie los acrisoles, suelos profundos y desarrollados. Los suelos someros existentes son los litosoles y regosoles. En esta unidad se encuentra la zona núcleo Manantlán-Las Joyas y es la área en donde se realiza el aprovechamiento forestal dentro de la unidad de conservación.

Unidad 5 (Sierra Baja). Esta unidad se encuentra circundando la formación de origen volcánica y se caracteriza por una zona montañosa baja, con

topografía irregular y pendientes que varían de 15 a 45 %. Predominan los suelos litosoles, regosoles y cambisoles. El material parental está constituido principalmente de rocas ígneas intrusiva y extrusivas. En esta zona se desarrolla principalmente la actividad agrícola de temporal y la ganadería extensiva tanto en zonas de vegetación natural como de pastizal inducido.

Unidad 6 (Las Joyas). Esta unidad se encuentra en el corazón de la SM, en la parte más alta de la misma, caracterizado por pendientes abruptas mayores que 45 %. Esta unidad prácticamente constituye un corredor en la zona occidental de la Sierra. Sus suelos son predominantemente someros (litosoles y regosoles), con presencia de cambisoles desarrollados en pequeñas áreas que por su pendiente o vegetación permitió el desarrollo de los mismos. El material parental es de origen ígneo intrusivo y extrusivo, además de que presenta un área con material tobacéo. En esta zona se encuentran áreas naturales de las mejor conservadas de la zona, entre la mayor parte de la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán.

Unidad 7 (Manantlán). Esta unidad, al igual que el anterior, se localiza en la parte alta de la SM, constituida por mesetas en la parte alta de cerros o laderas. Presenta pendientes relativamente bajas, con pendientes de 0 a 15 %. Presenta suelos cambisoles en su mayor proporción, seguido por litosoles y regosoles. El material parental es de origen ígneo extrusivo.

Unidad 8 (Cuzalapa). Esta unidad corresponde al valle de la subcuenca de Cuzalapa y a pesar de que presenta algunas zonas con características similares a las clases 1 y 5, fue separada de éstas debido a su geoforma bien definida. La pendiente es variable en esta zona, ya que podemos encontrar rangos de pendientes que van de 0 a 2 % en las terrazas aluviales con suelos fluvisoles y feozems en forma predominante. Esta área presenta la mayor superficie de riego de la SM. En las zonas con pendientes entre 2 y 15 %, se encuentran suelos Cambisoles. Esta área está cubierta principalmente de pastizales inducidos.

Unidad 9 (Ayotitlán). Esta unidad se localiza en el valle de la subcuenca Ayotitlán. Se desarrolla bajo rocas ígneas intrusivas ácidas, en pendientes onduladas de 10 a 15 %, con pequeñas áreas con pendientes menores que 5 %. Los cambisoles son los suelos predominantes. En las zonas con pendientes menores que 10 %, encontramos suelos bien desarrollados como acrisoles.

Para evaluar el nivel de asociación de las unidades fisiográficas generadas con la distribución de la vegetación en la Sierra de Manantlán, se compararon las imágenes en formato digital de la unidades fisiográficas con la de vegetación. Para conocer el nivel de asociación se utilizaron el coeficiente de correlación de Cramer y el índice de similaridad de Kappa. El índice de Kappa varía de -1 a 1 indicando el grado de similaridad entre las imágenes. Si las dos imágenes son similares, el valor de Kappa es 1. Si una imagen es completamente diferente de la otra, el valor de Kappa es -1 (Eastman *et al.*, 1995). Encontramos valores de correlación de 0.44 y valores de Kappa de 0.38. Considerando el nivel de detalle de la escala utilizada, creemos que estos valores representan un buen indicador de la asociación o similaridad que las unidades fisiográficas, elaboradas con solo parámetros físicos, tienen con la vegetación.

CONCLUSIONES

El uso de la cartografía automatizada manejada bajo un sistema de información geográfica nos permitió realizar un trabajo con mayor detalle, manejando una combinación de unidades que difícilmente se podría manejar manualmente. Además, el uso de modelos digitales de elevación facilitó la generación de un mapa de pendientes sumamente detallado que permitió delimitar las unidades con mayor precisión.

Las unidades generadas a través de los aspectos físicos suelo, geología y pendientes son una base importante para la interpretación de la vegetación existente y la distribución de la misma. Esto fue demostrado a través del uso de índices de correlación y similaridad. El conocer la relación entre las unidades fisiográficas y la vegetación es un aspecto importante a considerar en la conservación y manejo de los recursos naturales y en la toma de decisiones para el uso de los mismos. Esto es importante porque las unidades fisiográficas obtenidas pueden ser utilizadas como unidades para el manejo de la vegetación forestal de la Sierra de Manantlán.

LITERATURA CITADA

- Consejo de Recursos Minerales (CRM). 1988. Información Geológica Minera del Estado de Jalisco. Residencia Jalisco. Guadalajara, Jal. Informe Técnico.
- Eastman, J.R., J.E. McKendry y M.A. Fulk. 1995. Change and time series analysis. United Nations Institute for Training and Research. Geneva, Switzerland.
- Eastman, J.R. 1992. IDRISI. Clark University. Worcester, MA. USA. 213 p.
- INEGI. Instituto Nacional de Geografía e Informática. (1984). Cartas edafológicas. Escala 1:50 000. E13B22, E13B23, E13B24, E13B32, E13B33, E13B34. 2da. reimpresión. Mexico.
- Quintero A., A.L., L.M. Martínez R. y David Sponda. 1993. Levantamiento geológico de la Estación Científica Las Joyas, Sierra de Manantlán, Jalisco. *Tiempos de Ciencia* 31: 41-49.
- Lazcano S., C. 1988. Las cavernas de Cerro Grande. Estados de Colima y Jalisco. Editorial Universidad de Guadalajara. Laboratorio Natural Las Joyas.
- Luna L., L.M. 1985. Bosquejo geomofológico de la zona norte del estado de Colima y la porción contigua de Jalisco. Tesis profesional. UNAM. Facultad de Filosofía y Letras. Colegio de Geografía.

- Munguía, R. 1989. Informe geológico Potencial de los Recursos Minerales del Estado de Colima. Consejo de Recursos Minerales. Zona Centro. Guadalajara, Jal. Informe Técnico.
- Sandoval S., H. 1984. Informe geológico de algunos prospectos mineros ubicados en las inmediaciones de las Rancherías Rincón de Luisa, Ahuacapan, Queserías y Tecopatlan, Municipios del Grullo, Jalisco. Consejo de Recursos Minerales. Zona Centro. Guadalajara, Jal. Informe Técnico.
- Solis V., J. 1965. Geología regional y yacimientos minerales de una porción de los estados de Jalisco y Colima. Guadalajara, Jal. Consejo de Recursos Minerales - Zona Centro. Informe técnico.
- SPP. 1985. Síntesis Geográfica del Estado de Jalisco. Secretaria de Programación y Presupuesto. México.

FERTILIZACION FOLIAR ORGANICA E INORGANICA Y RENDIMIENTO DE SORGO EN CONDICIONES DE SALINIDAD

Organic and Inorganic Foliar Fertilization and Grain Sorghum Yield under Saline Conditions

Luis Felipe Ramírez Santoyo¹, Gabriel Alcántar González², Manuel Ortega Escobar³, Alberto Escalante Estrada⁴, Marcos Soto Hernández⁴, Prometeo Sánchez García²

RESUMEN

En plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) cultivadas en invernadero, dentro de un sistema integral de manejo agronómico para suelos salinos, se determinaron y compararon los efectos de la aplicación foliar de soluciones orgánicas e inorgánicas. Las soluciones empleadas fueron: sustancias húmicas a 0.125 %, solución inorgánica sola y adicionada con 10 mg L⁻¹ de *myo*-inositol o ácido fítico. Los resultados mostraron que los compuestos de inositol no actúan solos en la activación metabólica para sobrevivir a la presión nutrimental de la salinidad, las sustancias húmicas contienen pseudoauxinas y pseudocitocininas, que tienen efecto sinérgico en el metabolismo vegetal. Los parámetros medidos: área foliar, peso seco total, peso seco de panoja, índice de cosecha, altura final y potencial osmótico, presentaron una tendencia estadística ($p=0.05$) y numérica de dominancia para los tratamientos asperjados con sustancias húmicas. Para producir sorgo en sistemas afectados por presiones nutrimentales, se requiere un sistema integral de manejo que incluya estrategias fisiológicas, ecológicas y agronómicas.

Palabras clave: Sustancias húmicas, *myo*-Inositol, *Sorghum bicolor* L. Moench.

SUMMARY

In sorghum plants (*Sorghum bicolor* L. Moench) grown under an agronomic management system for saline soils in greenhouse, the effects of foliar sprays

with organic and inorganic solutions were evaluated and compared. The used solutions were humic substances at 0.125 %, an inorganic solution alone, and added with (10 mg L⁻¹) *myo*-inositol or phytic acid. The results demonstrated that inositol compounds do not act alone in the plant metabolic activation to survive under nutrimental stress of salinity. The humic substances contain related-auxin and related-cytokinin compounds which have a synergetic effect on the plant metabolism. The measured parameters (foliar area, total dry weight, panicle dry weight, final plant height, yield index and osmotic potential) demonstrated a statistical ($p=0.05$) and numerical dominant trend for the treatments in which a spray with humic substances was used. To produce sorghum in systems affected by nutrimental stresses, an integral management system is required which includes physiological, ecological and agronomic strategies.

Index words: Humic substances, *myo*-Inositol, *Sorghum bicolor* L. Moench.

INTRODUCCION

El sorgo para grano ha adquirido gran importancia dentro de la producción nacional de cereales, ocupando el tercer lugar después del maíz y el frijol, respecto a superficie sembrada. Debido a que sus características fisiológicas y morfológicas le confieren adaptabilidad y resistencia a problemas de salinidad.

Las investigaciones actuales de fisiología vegetal referentes a la adaptación a condiciones de estrés, como la salinidad, responsabilizan al inositol y a sus ésteres fosfatados del mecanismo de señalización celular y como detector de estímulos adversos (Baker, 1977; Berridge, 1993; Davies *et al.*, 1993; Drøbak, 1993; Thompson *et al.*, 1989).

Las necesidades presentes de la agricultura y el manejo ambiental exigen mayor conocimiento de dichas sustancias. La Sociedad Internacional de las Sustancias Húmicas (IHSS) surge con el propósito de

¹ Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad de Guanajuato, Apartado Postal 311, 36500 Irapuato, Guanajuato.
e-mail: santoyo@ducinea.ugto.mx

² Programa de Edafología, ³ Programa de Hidrociencias,

⁴ Programa de Botánica, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Estado de México.

avanzar en el conocimiento, investigación y aplicación de las sustancias húmicas. Además, la existencia de productos que contienen sustancias húmicas y la atribución de propiedades de mejoría en el desarrollo vegetal, hacen imprescindible la investigación (Narro, 1994). En México, dicha línea de investigación está en proceso y sin lugar a dudas aún faltan evidencias experimentales para confirmar sus bondades.

El presente estudio tuvo como finalidad incrementar el crecimiento y rendimiento de sorgo cultivado bajo condiciones salinas, mediante la aplicación foliar de una solución con sustancias húmicas, la comparación con soluciones de sustancias inorgánicas y seguir el comportamiento de algunas variables fisiológicas.

MATERIALES Y METODOS

Se utilizaron tres suelos del predio Montecillo de las series Lago, Pastizal y Garzas, respectivamente (Ortiz, 1979). Se secaron, tamizaron y se les determinaron sus características físicas y químicas (Cuadros 1 y 2).

Además, se agregó $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ para abatir el nivel de sodio intercambiable a 10 %.

La semilla utilizada correspondió a la variedad comercial de sorgo para grano Dekalb-D65 (Lote 48CPFE05).

Los suelos, después de tamizados y mezclados íntimamente con el mejorador, se ubicaron dentro de columnas de lavado (tubos de PVC de 70 cm de altura y 18.5 cm de diámetro).

La combinación de los tres suelos con los cinco tratamientos foliares produjo un total de 15 unidades experimentales (Cuadro 3).

El diseño fue completamente al azar, con arreglo factorial porque se consideró al invernadero como una zona homogénea.

Manejo del cultivo

Siembra. Se sembró el día 2 de junio de 1995, después de regar se esperó a que el suelo llegara a capacidad de campo, el período de crecimiento del cultivo fue de 140 días.

Cuadro 1. Características físicas y químicas de los suelos empleados. Verano 1995. PROEDAF. CP.

Suelo	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Método
Característica	Aquic haplustol (Lago)	Salorthidic haplustol (Pastizal)	Typic endoaquol (Garzas)	
pH	7.8	8.9	10.1	Relación suelo-agua 1:2
Materia orgánica (%)	1.73	1.88	0.28	Walkey-Black
Nitrógeno total (%)	0.086	0.094	0.014	Estimado de materia orgánica
Fósforo disponible (mg g^{-1})	25.7	27.3	26.5	Olsen
Sodio intercambiable (cmol kg^{-1})	57.9	59.3	77.4	Relación suelo-agua 1:5
Potasio intercambiable (cmol kg^{-1})	4.9	16.3	5.1	Acetato de amonio
Calcio (cmol kg^{-1})	39.2	25.6	11	Acetato de amonio
Magnesio (cmol kg^{-1})	10.6	6.4	1	Acetato de amonio
Clasificación textural	Franco limoso	Franco	Franco arenoso	Triángulo de texturas
Arena (%)	25.7	34.2	56.8	Pipeta
Limo (%)	53.7	43.1	35.5	Pipeta
Arcilla (%)	20.4	22.6	7.6	Pipeta

Cuadro 2. Sales solubles de los suelos en suelo-agua 1:5. Verano 1995. PROEDAF. CP.

Suelo	pH	CE DSm^{-1}	Cationes				Total (cmol kg^{-1})	Aniones				Total
			Ca	Mg	Na	K		CO_3	HCO_3	Cl	SO_4	
1	7.7	0.92	0.128	0.169	0.147	0.035	0.478	0	0.142	0.088	0.258	0.011
2	8.6	8.74	0.146	0.253	4.934	1.128	6.461	0.028	0.534	1.756	4.318	6.638
3	9.8	18.33	0.055	0.029	8.375	0.652	9.111	1.013	0.486	4.558	3.283	9.384

Cuadro 3. Tratamientos generados. Verano 1995. PROEDAF. CP.

Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Testigo	Testigo	Testigo
Substancias húmicas a 0.125 %	Substancias húmicas a 0.125 %	Substancias húmicas a 0.125 %
Solución inorgánica	Solución inorgánica	Solución inorgánica
Solución inorgánica + <i>myo</i> -inositol	Solución inorgánica + <i>myo</i> -inositol	Solución inorgánica + <i>myo</i> -inositol
Solución inorgánica + ácido fítico	Solución inorgánica + ácido fítico	Solución inorgánica + ácido fítico

Cada unidad experimental contó con tres repeticiones.

Fertilización. Todos los tratamientos recibieron una fertilización al suelo equivalente a 140-80-0. La dosificación del fertilizante fue: todo el fósforo en la siembra y la mitad del nitrógeno. La mitad restante del nitrógeno se aplicó al principio de la etapa de "embuche". Las fuentes para N y P fueron sulfato de amonio y superfosfato triple. Los fertilizantes se disolvieron y se aplicaron en el agua de riego.

Riego. Los riegos se realizaron cuando el peso de la columna, determinado en una balanza, difería en el equivalente a 1/8 de la columna a punto de marchitez permanente.

Preparación y aplicación de soluciones. La recomendación para la aplicación foliar de productos húmicos comerciales al sorgo propone dos aplicaciones: una, cuando la planta alcanza 30 cm de altura y otra, antes de la emergencia de la panoja con una solución al 1 %. En este trabajo se realizaron las aplicaciones en las épocas propuestas, pero se utilizó la dosis de 0.125 % del producto comercial Humitron, de acuerdo con los resultados de Ramírez y Sustaita, (1991) y con los datos de Chen y Aviad (1990). Además, se utilizó una solución generada a partir de fuentes inorgánicas (Cuadro 4), la cual se aplicó sola y adicionada con *myo*-inositol (Merck) o ácido fítico (Sigma) (10 mg L^{-1}) de acuerdo con los tratamientos.

Determinación del área foliar. Se realizaron tres muestreos, a 56, 81 y 140 días después de la siembra (correspondientes respectivamente al final de las etapas EC₁, EC₂ y EC₃), a cada muestreo se le determinó área foliar con un integrador de área LI-Cor 3000.

Determinación de peso seco. Después de mantener el material vegetal en una estufa con circulación de aire a 70 °C, durante 72 horas, el peso seco se determinó hasta centésimas de gramo con una balanza Mettler.

Determinación de potencial osmótico. Para la determinación cualitativa de este parámetro se utilizó la siguiente metodología: En la madrugada se cortó una porción de hoja a cada tratamiento; debidamente identificada, se colocó dentro de un sobre de papel encerado y se sumergió en un contenedor de nitrógeno líquido para detener todas las reacciones y matar instantáneamente al tejido. El contenedor se trasladó al laboratorio donde, una a una, las muestras se maceraron. El potencial osmótico se determinó en el jugo resultante de la maceración; con una micropipeta se empapó un disco pequeño de papel filtro, el cual se introdujo dentro de un osmómetro modelo Wescor 5100C.

Cuadro 4. Composición de la solución inorgánica empleada. Verano 1995. PROEDAF. CP.

Sal mineral	Concentración (g L^{-1})	Sal mineral	Concentración (mg L^{-1})
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	1.18	H ₃ BO ₃	2.0
KNO ₃	0.2020	MnSO ₄ ·7H ₂ O	1.8
KH ₂ PO ₄	0.1360	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.2
K ₂ SO ₄	0.3480	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.3690	NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.035
<i>myo</i> -Inositol	10 mg L^{-1}	Fe-EDTA	0.5 mL L^{-1}
Acido fítico	10 mg L^{-1}		

RESULTADOS Y DISCUSION

Para el análisis estadístico se utilizó como variable de clasificación la conductividad eléctrica de cada suelo, se obtuvieron los efectos independientemente del suelo empleado (Cuadro 5).

Area Foliar

En las mediciones de área foliar correspondientes a los tres muestreos realizados, se destacó en el primer muestreo un comportamiento de dominancia estadística ($p=0.05$) en el tratamiento asperjado con solución de sustancias húmicas. Este comportamiento se presentó en los siguientes muestreos, aunque sólo de manera numérica seguido de los tratamientos en los cuales se asperjó la solución inorgánica adicionada con ácido fítico o *myo*-inositol. Esta respuesta se explica por la presencia de activadores del tipo de los reguladores de crecimiento vegetal en la solución foliar, pues los resultados concuerdan con O'Donell (1973) y Rauthan y Schnitzer (1981), mientras el tratamiento asperjado con la solución inorgánica se comportó de manera similar al testigo y coincide con Hocking (1993).

Peso Seco

Respecto al efecto de los tratamientos foliares en peso seco total y de panoja, todos los tratamientos superaron al testigo, fue evidente la dominancia numérica en el primer muestreo y estadística ($p=0.05$) en los siguientes muestreos, del tratamiento con sustancias húmicas, sobre las demás soluciones.

La relación entre grano y biomasa total es el índice de cosecha, el cual es indicador de la actividad y eficiencia de los organismos vegetales; el valor estadísticamente significativo ($p=0.05$) para este parámetro lo ocupó el tratamiento con la solución de sustancias húmicas, seguido por la solución inorgánica sola, los valores para este parámetro obtenidos en los tratamientos asperjados con la solución inorgánica adicionada con *myo*-inositol y ácido fítico se encontraron por debajo del correspondiente valor para el tratamiento testigo. Este comportamiento pudiera ser explicado por una sobreactivación del metabolismo vegetal que a largo plazo originó efectos adversos (Chen y Aviad, 1990; Lee y Barlett, 1976; Rauthan y Schnitzer, 1981; Thompson *et al.*, 1989; VanDeventer *et al.*, 1991).

En cuanto al comportamiento de los datos de altura final de la planta, el patrón de dominancia se repite; el tratamiento asperjado con sustancias húmicas produjo un valor estadísticamente significativo ($p=0.05$), comparado con los valores obtenidos respecto a los demás tratamientos. Para explicar este comportamiento señalaremos que dentro de las moléculas húmicas se encuentran grupos funcionales que a concentraciones bajas pueden desarrollar efectos homólogos a los generados por las auxinas, giberelinas y citocininas que se encuentran de manera natural en las plantas (O'Donell, 1973; Chen y Aviad, 1990). Las soluciones adicionadas de compuestos de inositol tuvieron un efecto similar pero de menor magnitud.

Potencial Osmótico

Existe evidencia de que el potencial osmótico es un factor de relevancia en los mecanismos de adaptación a la salinidad (Läuchli y Epstein, 1990). Dentro de esta investigación en particular, se determinó sólo con fines cualitativos, donde los valores resultaron significativos (Cuadro 5). Fue evidente que el tratamiento con aspersiones foliares con las sustancias húmicas y los compuestos de inositol, contribuyeron a aumentar el potencial osmótico, pues se comportaron de manera dual como activadores metabólicos y como reguladores osmóticos (Sacher y Staples, 1985).

CONCLUSIONES

El rendimiento es la resultante final del manejo agronómico utilizado; un aumento en rendimiento no es función dependiente de un solo factor, sin embargo, cualquier elemento que induzca una mejoría en la cosecha es digno de tomarse en cuenta y la aspersión foliar con soluciones que contienen activadores metabólicos y nutrimentos, es una opción prometedora.

El tratamiento con sustancias húmicas en comparación con soluciones inorgánicas logró mayor índice de cosecha, peso seco de panoja y altura de planta.

Hasta la etapa del segundo muestreo se manifiesta el efecto positivo de las sustancias húmicas y del tratamiento de la solución inorgánica adicionada con ácido fítico, al registrarse el mayor peso de biomasa y área foliar.

El efecto de las sustancias húmicas sobre el potencial osmótico fue muy evidente hasta la etapa del

Cuadro 5a. Resumen de análisis estadístico (media de cada tratamiento en los tres suelos). Verano 1995. PROEDAF. CP.

Tratamiento	Variables de respuesta					
	I*	Area foliar II cm ²	III	I	Peso seco II*	III**
Testigo	173.9a†	459.8ab	746.3	0.98a	7.05ab	50.55c
Substancias húmicas	281.5a	574.1a	863.1	1.59a	9.09a	61.72ab
Solución inorgánica	171.0a	411.0b	771.4	0.81a	7.47ab	52.39bc
Solución inorgánica + <i>myo</i> -inositol	199.4a	475.8ab	811.1	1.05a	6.34ab	59.22a
Solución inorgánica + ácido fítico	254.4a	474.0ab	820.8	1.42a	5.87b	62.69abc
Media general	214	479.0	802.5	1.17	7.16	57.31
CV	39.9	23.3	16.1	58.6	31.4	12.5
DMS	117.5	156.5	178.0	0.94	3.09	9.87

Cuadro 5b. Resumen de análisis estadístico (media de cada tratamiento en los tres suelos). Verano 1995. PROEDAF. CP.

Tratamiento	Variables de respuesta					
	Peso seco panoja *	Indice de cosecha **	Altura final de planta **	Potencial osmótico		
	g	%	cm	I**	II**	III
Testigo	15.38b	20.8b	63.1ab	10.1c	9.8c	12.3a
Substancias húmicas	21.59a	26.9a	69.8a	9.5d	10.6a	12.8a
Solución inorgánica	18.04ab	21.5ab	56.6b	10.6b	10.2b	12.5a
Solución inorgánica + <i>myo</i> -inositol	15.75ab	16.4b	54.3b	10.4b	10.2b	12.5a
Solución inorgánica + ácido fítico	15.10b	17.2b	60.8ab	11.2a	10.6a	12.3a
Media general	17.17	5.88	60.96	10.3	10.3	12.5
CV	25.7	20.7	13.3	1.60	1.68	9.47
DMS	6.07	20.60	11.19	0.22	0.23	1.63

I= primer muestreo, II= segundo muestreo, III= tercer muestreo. *= significativo a 0.05, **= significativo a 0.01.

†= medias seguidas por la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, según Tukey ($p=0.05$).

primer muestreo. Al llegar al tercer muestreo todos los tratamientos tuvieron la misma influencia.

Los compuestos de inositol no actúan solos en la activación metabólica para soportar y superar la presión nutrimental de la salinidad, es decir, las substancias húmicas contienen, además, pseudo auxinas y pseudo citocininas que tienen un efecto sinérgico en el metabolismo vegetal.

Con base en lo anterior, en este estudio se pudo comprobar el efecto positivo de la aplicación foliar de substancias húmicas sobre el crecimiento y rendimiento de sorgo. Sin embargo, para futuras investigaciones en esta línea es necesario un manejo integral, en el cual se incluyan mejores estrategias fisiológicas, ecológicas y agronómicas para lograr la producción aún en condiciones de presiones nutrimentales.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor desea agradecer al M.C. Jorge Alvarado López por la revisión preliminar del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Baker, T. 1977. Humic acid associated organic phosphate. *New Zealand J. of Sci.* 20: 439-441.
- Berridge, M.J. 1993. Inositol trisphosphate and calcium signalling. *Nature* 361: 315-324.
- Chen, Y. y T. Aviad 1990. Effects of humic substances on plant growth. pp: 161-186. *In: P. MacCarthy (ed.). Humic substances in soil and crop sciences; selected readings.* Am. Soc. of Agron. and Soil Sci. Soc. of Am. Madison Wisconsin.
- Davies, W.J., F.Tardieu y L.C. Trejo. 1993. Chemical signalling and the adaptation of plants to conditions where water availability is restricted. pp: 223-237. *In: L. Fowden, T.*

- Mansfield y J. Stoddart (eds). Plant adaptation to environmental stress. Chapman and Hall. Glasgow, U.K.
- Drobak, B.K. 1993. Plant phosphoinositides and intracellular signaling. *Plant Physiology* 102: 705-709.
- Hocking, P.J. 1993. Distribution and redistribution of mineral nutrients and dry matter in grain sorghum as affected by soil salinity. *J. of Plant Nutrition* 16: 1753-1774.
- Läuchli, A. y E. Epstein. 1990. Plant responses to saline and sodic conditions. pp: 113-137. *In: K.K. Tanji (ed.). Agric. Salinity Assessment and Management. Am. Soc. of Civil Engineers. New York.*
- Lee, Y.S. y R.J. Barlett. 1976. Stimulation of plant growth by humic substances. *Soil Sc. Soc. of Am. J.* 40: 876-879.
- Narro F., E.A. 1994. Las sustancias húmicas en la agricultura. *Revista Idea (Universidad Autónoma de Aguascalientes)* 10: 1-4.
- O'Donell, R.W. 1973. The auxin-like effects of humic preparations from leonardite. *Soil Sci.* 116: 107-112.
- Ortiz S., C.A. 1979. Levantamiento de suelos del campo experimental Montecillo. Rama de suelos, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Ramírez S., L. F. y F. Sustaita R. 1991. Efecto de dos ácidos húmicos comerciales (Humitrón y Carbo-vit) y un extracto de estiércol sobre el rendimiento de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench.) bajo condiciones de invernadero. Tesis Profesional Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México.
- Rauthan, B.S. y M. Schnitzer. 1981. Effects of a soil fulvic acid on the growth and nutrient content of cucumber (*Cucumis sativus*) plants. *Plant Soil* 63: 491-495.
- Sacher, R.F. y R.C. Staples 1985. Inositol and sugars in adaptation to tomato to salt. *Plant Physiology* 77: 206-210.
- Thompson Jr., G.A., K.J. Elnspohr, S.H. Cho, T.C. Peelfier y M. Stephenson. 1989. Metabolic responses of plant cell to stress. pp: 497-504. *In: P.A. Biacs, K. Gruiz y T. Kremmer (eds). Biological role of plant lipids. Akademiai Kiado, Budapest and Plenum Publishing Co., New York.*
- Van Deventer H.A., M. Furter, J. Dekker y I.J. Cronje. 1991. Stimulation of seedling root growth by coal-derived sodium humate. *Plant Soil* 138: 17-21.

COMPORTAMIENTO NUTRIMENTAL DE FRAMBUESA ROJA CULTIVADA EN UN SUELO ALCALINO Y CON ASPERSIONES FOLIARES DE UREA, Mn Y Zn

Nutritional Behavior of Raspberry Cultivated in an Alkaline Soil and with Urea, Mn and Zn Foliar Sprays

Ovidio Salazar Salazar¹ y Gustavo Adolfo Baca Castillo²

RESUMEN

Para determinar el efecto de las aplicaciones foliares de urea, Mn y Zn sobre el estado nutricional de cañas de frambuesa roja (*Rubus idaeus* L.) cv. 'Malling Exploit', establecida en un suelo con textura migajón arenosa, pH ligeramente alcalino (7.6), alto contenido de Ca y Mg soluble y bajo contenido de materia orgánica, en Montecillo, estado de México, las plantas fueron asperjadas con todas las combinaciones de dos niveles de concentraciones de urea de 40 y 60 g N L⁻¹, Mn de 0.8 y 1.2 g L⁻¹ y Zn de 10 y 15 g L⁻¹ y un testigo. La respuesta de la planta se basó en las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Mn y Zn determinadas en los foliolos y peciolas de cañas productivas y vegetativas. Las aspersiones foliares determinaron cambios en las concentraciones de todos los elementos analizados, en uno o más órganos. La urea aplicada aumentó las concentraciones de P, Ca y Zn. Las concentraciones de nutrimentos en las cañas productivas fueron diferentes a las de las cañas vegetativas.

Palabras clave: Micronutrientos, foliolos, peciolas, cañas productivas y vegetativas.

SUMMARY

In order to determine the effect of foliar applications of urea, Mn, and Zn on the nutritional status and the growth of raspberry (*Rubus idaeus* L.) cv. 'Malling Exploit' growing on a sandy loam soil, with alkaline pH (7.6), high amount of soluble Ca and Mg, and low content of organic matter, the plants were sprayed with all the combinations of aqueous solutions: urea (40 and 60 g N L⁻¹), Mn (0.8 and 1.2 g

L⁻¹) and Zn (10 and 15 g L⁻¹), and one control. The concentration of N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Mn, and Zn was determined in leaflets and petioles of productive and vegetative canes. Foliar sprays determined the differences of all determined elements in one or more organs. Urea applied increased P, Ca, and Zn concentrations. Nutrient concentrations in the productive canes were different to those in the vegetative canes.

Index words: Micronutrients, leaflets, petioles, productive and vegetative canes.

INTRODUCCION

La frambuesa roja (*Rubus idaeus* L.) es una frutilla de gran importancia en algunos países. En México fue introducida en 1974 por investigadores del Colegio de Postgraduados, quienes ensayaron algunas variedades de Europa y Estados Unidos de Norteamérica en el área de Chapingo, estado de México y demostraron la buena adaptación de algunas de ellas a dicha región (Rodríguez y Avitia, 1984). Los avances de estas investigaciones muestran amplias perspectivas para este cultivo, no obstante, debido a lo reciente de su introducción al país, se tiene poca información sobre sus necesidades nutrimentales bajo diferentes condiciones de suelo, como es el caso de suelos con pH alcalino. De acuerdo con Lucas y Knezek (1977) aún en suelos con pH ligeramente alcalino las plantas pueden manifestar deficiencias de manganeso. Murphy y Walsh (1977) señalan que diversos estudios han demostrado que la disponibilidad de zinc está relacionada inversamente con la alcalinidad de los suelos.

Sin restar importancia a la nutrición de las plantas vía raíz, existen condiciones en las cuales las aspersiones de nutrimentos al follaje son una alternativa viable para nutrir a la planta. Esta forma de proporcionar nutrimentos evita problemas de dilución y fijación en el suelo cuando la cantidad de nutrimentos a aplicar es pequeña (Gray, 1977),

¹ Unidad Académica Multidisciplinaria Agronomía y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, 87149 Cd. Victoria.

² Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México.

Aceptado: Agosto de 1998.

permite obtener una respuesta rápida de la planta en comparación con las aplicaciones al suelo (Boote *et al.*, 1978) y evita la contaminación de mantos acuíferos por la pérdida de nutrimentos aplicados al suelo (Reed y Tukey, 1978).

Marschner (1995), Acosta (1991), Swietlik y Faust (1984) y Yamada *et al.* (1964) indican que los sitios principales de penetración de los nutrimentos aplicados vía foliar, son las células guarda de los estomas y la cutícula. Entre los factores que afectan la absorción foliar se encuentran las condiciones climáticas: temperatura ambiental, luz y humedad relativa y las condiciones que se refieren a las características de la solución: tipo de ion, pH, ion acarreador, concentración, adición de surfactantes y de adherentes. Cuando la temperatura es relativamente elevada, la respiración aumenta y la absorción disminuye. Al aumentar la luminosidad aumenta la absorción foliar. Una alta humedad relativa disminuye la tasa de evaporación de la solución asperjada, además favorece la permeabilidad de la cutícula, reduciendo el daño por quemaduras. Los iones que son más fácilmente absorbidos son los de menor radio iónico hidratado y los que presentan menor carga eléctrica. El intervalo de pH más adecuado no es igual para todos los nutrimentos, el más conveniente es el que favorece una mayor disociación. El ion acarreador más adecuado es el que mantiene un mayor equilibrio electrostático, la absorción de un nutrimento provoca un desequilibrio electrostático, por lo tanto, el ion acarreador más adecuado es aquél que es absorbido a la misma tasa de absorción que el nutrimento. La concentración de la solución foliar debe ser tal que haga máxima su absorción, soluciones relativamente diluidas no cubren la demanda potencial de la planta, soluciones relativamente concentradas limitan por efecto osmótico la absorción de agua y el transporte dentro de la planta de nutrimentos transportados por efecto de flujo de masas. Los tensoactivadores o surfactantes son sustancias que tienen la capacidad de disminuir la tensión superficial, aumentando así la superficie activa de las moléculas y, por lo tanto, la absorción de los nutrimentos.

La urea es una sustancia que comúnmente se aplica foliarmente para suministrar N a algunos cultivos agrícolas. Yamada *et al.* (1965) destacan que la tasa de penetración de la urea aplicada foliarmente es de 10 a 20 veces mayor que la de cationes tales como el Rb^+ y el Ca^{2+} y que la de los aniones Cl^- y SO_4^{2-} ; además, la urea acelera la penetración de cationes y de aniones a través de las membranas

cuticulares, esto posiblemente se debe a que la urea rompe las uniones hidrofóbicas de dichas membranas, facilitando la penetración de los iones, la penetrabilidad de los cationes es mayor que la de los aniones.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar los efectos simples e interactivos de la aplicación foliar de urea, $ZnSO_4$ y $MnSO_4$ en la concentración de N, P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Cu y Na en los folíolos y peciolo de las cañas productivas y vegetativas de un cultivo de frambuesa localizado en un suelo con pH alcalino.

MATERIALES Y METODOS

La investigación se realizó en Montecillo, estado de México, en el huerto del Centro de Fruticultura del Colegio de Postgraduados, ubicado a los $19^\circ 29'$ latitud norte y $98^\circ 53'$ longitud oeste, a una altitud de 2241 m. La temperatura media anual es de $15^\circ C$ y la precipitación total anual de 643.7 mm, de acuerdo con los datos obtenidos de la Estación Agroclimatológica de Montecillo, Méx.

Muratalla (1986) indica que el suelo del huerto presenta una textura migajón arenosa, pH alcalino (7.6), contenido de materia orgánica de 1.24 % y conductividad eléctrica de $1.7 dS m^{-1}$ a $25^\circ C$, buen drenaje y sin pendiente apreciable. Arreola (1988) señala que los contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ solubles son 6.0, 3.4 y 1.2 me/100 g de suelo, en el mismo orden en que se indican. El suelo está comprendido en la Serie Arenal, (Ortiz, 1979), y dentro de la Clasificación FAO 98 corresponde a un Fluvisol eútrico (Ortiz, 1999). La unidad experimental estuvo constituida por un seto de 2.5 m de largo, con una densidad de población de 25 a 30 plantas.

Los tratamientos correspondieron al diseño factorial completo 2^3 más un testigo, donde los factores fueron urea comercial (46 % N), sulfato de manganeso y sulfato de zinc, grado reactivo. La lista de tratamientos se presenta en el Cuadro 1, el diseño experimental de distribución de tratamientos fue completamente al azar con seis repeticiones.

Los tratamientos se aplicaron de las 7 a las 9 horas, con base en las investigaciones de (Allen, 1970). No se empleó ningún surfactante para obtener el efecto directo de la urea sobre la absorción del manganeso y del zinc.

El manejo del lote experimental fue efectuado de acuerdo con la metodología propuesta por (Rodríguez y Avitia, 1984).

Cuadro 1. Tratamientos foliares aplicados a las plantas de frambuesa roja 'Malling Exploit'. Montecillo, México.

Tratamiento	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	MnSO ₄ ·H ₂ O	Urea
	----- g L ⁻¹ † -----		
1	10	0.8	40
2	10	0.8	60
3	10	1.2	40
4	10	1.2	60
5	15	0.8	40
6	15	0.8	60
7	15	1.2	40
8	15	1.2	60
Testigo	0	0	0

† Concentraciones del nutrimento respectivo: Zn, Mn y N.

Se determinó la concentración de N, P, K, Ca, Mg, Na, Mn, Cu y Zn en los folíolos y peciolos de cinco cañas productivas y cinco cañas vegetativas de cada parcela experimental. El tamaño de muestra fue de 30 hojas para ambos tipos de planta, se tomaron del tercio medio del tallo y fitopatológicamente sanas de acuerdo con lo recomendado por Megan *et al.*, 1979. El muestreo se efectuó una semana después de finalizar la cosecha.

El nitrógeno total se determinó por el procedimiento microkjeldahl. Para determinar el resto de los nutrimentos se empleó una digestión húmeda con una mezcla de ácido nítrico y perclórico en una relación 2:1 (AOAC, 1980). El fósforo se cuantificó por colorimetría, mediante vanadato de amonio para el desarrollo del color. La determinación de Na, K, Ca, Mg, Zn, Cu y Mn se efectuó mediante la lectura directa del digestado en un espectrofotómetro de absorción atómica.

Se realizó el análisis de varianza de los efectos factoriales de las variables consideradas. Para la

comparación de medias de las interacciones significativas se utilizó la Prueba de Scheffé.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 2 se presentan las concentraciones promedio obtenidas en el experimento de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Mn, Cu y Na en los folíolos productivos, debidas a la aplicación de los ocho tratamientos de fertilización foliar. Benton *et al.* (1991) indican para hojas completas de cañas productivas las concentraciones siguientes consideradas de niveles adecuados, en porcentaje: N 2.5 a 4.0, P 0.3 a 0.5, K 1.5 a 3.0, Ca 0.8 a 1.5, Mg mayor que 0.3, y en partes por millón: Zn 25 a 100, Mn 50 a 250 y Cu 3 a 50. Comparativamente y con las reservas del caso, se tendría que las concentraciones encontradas en el experimento de N, K, Mg y Cu corresponden a niveles adecuados; que las concentraciones de P, Ca y Zn son inferiores a las adecuadas y que la concentración de Mn resultó superior a los niveles adecuados, sin embargo, Reuter y Robinson (1986) consideran que una concentración de Mn mayor que 1000 ppm correspondería a un nivel excesivo de dicho nutrimento.

La comparación estadística de la concentración media de cada uno de los elementos (N, P, K, Ca, Mg, Zn, Mn, Cu y Na) en cada uno de los órganos: peciolos y folíolos productivos y peciolos y folíolos vegetativos, resultante de la aplicación de los ocho tratamientos de fertilización foliar (media del factorial) contra la media del tratamiento sin fertilización foliar (media del testigo), solamente indicó efecto significativo para la concentración de K en los peciolos y también la de K en los folíolos

Cuadro 2. Prueba de medias de las concentraciones de los elementos por efecto de las aspersiones foliares (F) y del testigo (T).

Organo	N	P	K	Ca	Mg	Na	Zn	Mn	Cu
	----- % -----						----- mg kg ⁻¹ -----		
Folíolo Productivo F	2.81 a†	0.15 a	1.98 a	1.79 a	0.62 a	0.32 a	95 a	464 a	6.8 a
Folíolo Productivo T	2.79 a	0.14 a	1.66 b	1.57 a	0.58 a	0.30 a	89 a	495 a	5.5 a
Peciolo Productivo F	1.18 a	0.05 a	4.83 a	1.74 a	1.13 a	1.62 a	127 a	175 a	3.6 a
Peciolo Productivo T	1.16 a	0.05 a	4.15 b	1.57 a	1.04 a	1.63 a	94 a	222 a	2.5 a
Peciolo Vegetativo F	1.10 a	0.13 a	3.35 a	1.27 b	0.78 b	0.77 b	73 a	306 a	3.9 a
Peciolo vegetativo T	1.08 a	0.15 a	3.11 a	1.44 a	0.86 a	0.82 a	54 a	361 a	4.7 a
Folíolo Vegetativo F	3.07 a	0.16 a	2.23 a	1.59 a	0.85 a	0.66 a	70 a	649 a	7.6 a
Folíolo Vegetativo T	3.09 a	0.17 a	2.08 a	1.62 a	0.81 a	0.37 b	55 a	796 a	6.7 a

† Letras diferentes en un mismo contraste lineal corresponden a valores estadísticamente diferentes a un nivel de probabilidad de 0.05.

Cuadro 3. Medias de efectos principales e interactivos significativas de las concentraciones de elementos en los foliolos productivos.

Efecto	N	P	K	Ca	Mg	Na	Mn	
	%							mg kg ⁻¹
40 N†	-	0.146 b‡	-	-	0.64 a	-	575 a	
60 N	-	0.154 a	-	-	0.59 b	-	369 b	
0.8 Mn	2.87 a	-	-	1.87 a	-	-	542 a	
1.2 Mn	2.75 b	-	-	1.71 b	-	-	395 b	
10 Zn	2.77 b	-	-	1.91 a	-	-	-	
15 Zn	2.85 a	-	-	1.68 b	-	-	-	
40 N 0.8 Mn	-	-	1.95 a	1.78 a	-	-	721 a	
40 N 1.2 Mn	-	-	2.14 a	1.89 a	-	-	417 b	
60 N 0.8 Mn	-	-	1.99 a	1.95 a	-	-	363 a	
60 N 1.2 Mn	-	-	1.86 a	1.55 b	-	-	375 a	
0.8 Mn 40 N	-	-	1.95 a	1.78 a	-	-	721 a	
0.8 Mn 60 N	-	-	1.99 a	1.95 a	-	-	363 b	
1.2 Mn 40 N	-	-	2.14 a	1.89 a	-	-	417 a	
1.2 Mn 60 N	-	-	1.86 b	1.55 a	-	-	375 a	
10 Zn 40 N	-	-	1.99 a	-	-	-	-	
10 Zn 60 N	-	-	2.04 a	-	-	-	-	
15 Zn 40 N	-	-	2.08 a	-	-	-	-	
15 Zn 60 N	-	-	1.82 b	-	-	-	-	
0.8 Mn 10 Zn	-	-	-	2.19 a	-	0.33 a	-	
0.8 Mn 15 Zn	-	-	-	1.54 b	-	0.29 a	-	
1.2 Mn 10 Zn	-	-	-	1.60 a	-	0.32 a	-	
1.2 Mn 15 Zn	-	-	-	1.81 a	-	0.34 a	-	
10 Zn 0.8 Mn	-	-	-	2.19 a	-	0.33 a	-	
10 Zn 1.2 Mn	-	-	-	1.60 a	-	0.32 a	-	
15 Zn 0.8 Mn	-	-	-	1.54 a	-	0.29 b	-	
15 Zn 1.2 Mn	-	-	-	1.81 a	-	0.34 a	-	
CV§	3.9	8.1	13.2	13.8	11.6	14.4	31.7	

† Los números que preceden a las letras indican los gramos por litro de N, Mn y Zn aplicados.

‡ Letras diferentes en un mismo contraste lineal corresponden a valores estadísticamente diferentes a un nivel de probabilidad de 0.05.

§ Coeficientes de variación en porcentaje.

productivos; en ambos casos la media del factorial fue mayor que la del testigo (Cuadro 2). La concentración alcanzada por la media del factorial de K en el peciolo productivo corresponde a la categoría de adecuado (Benton *et al.*, 1991). El incremento de K obtenido podría ser explicado, considerando que la fertilización foliar, a la vez que en términos generales fue favorable a las plantas, su efecto también fue debido a un balance nutricional más acorde con la demanda nutricional del cultivo.

Las medias del factorial de las concentraciones de Ca, Mg y Na del peciolo vegetativo fueron significativamente menores que las correspondientes del tratamiento testigo (Cuadro 2); estos resultados aparentemente pudieron deberse por una parte al

mejor balance nutricional logrado con la fertilización foliar y por otra parte a una menor demanda de estos nutrientes por el órgano.

Las aplicaciones foliares con urea, MnSO₄ y ZnSO₄ modificaron significativamente las concentraciones de los nutrientes aplicados en al menos alguno de los órganos: foliolos o peciolos productivos o en los foliolos y peciolos vegetativos y además la de los otros elementos analizados: P, K, Ca, Mg, Cu y Na, en ocasiones como resultado de los efectos principales de los nutrientes aplicados y en otras, por sus efectos interactivos (Cuadros 3, 4, 5 y 6), lo cual implicaría respuestas en función de varios factores: la demanda de nutrientes no cubierta por el abastecimiento del suelo, la demanda diferencial de

Cuadro 4. Medias de efectos principales e interactivos significativas de las concentraciones de elementos en los peciolos productivos.

Efecto	P	K	Ca	Mg	Na	Mn	Cu
	----- mg kg ⁻¹ -----						
40 N†	-	-	1.64 b‡	1.17 a	1.66 a	217 a	-
60 N	-	-	1.83 a	1.10 b	1.59 b	139 b	-
0.8 Mn	-	4.65 b	-	-	-	-	2.81 b
1.2 Mn	-	5.06 a	-	-	-	-	4.38 a
10 Zn	-	-	-	-	-	-	4.17 a
15 Zn	-	-	-	-	-	-	3.02 b
40 N 0.8 Mn	0.046 a	4.42 b	-	-	-	256 a	-
40 N 1.2 Mn	0.051 a	5.22 a	-	-	-	175 b	-
60 N 0.8 Mn	0.055 a	4.89 a	-	-	-	112 a	-
60 N 1.2 Mn	0.049 a	4.91 a	-	-	-	165 a	-
0.8 Mn 40 N	0.046 b	4.42 a	-	-	-	256 a	-
0.8 Mn 60 N	0.055 a	4.89 a	-	-	-	112 b	-
1.2 Mn 40 N	0.051 a	5.22 a	-	-	-	175 a	-
1.2 Mn 60 N	0.049 a	4.91 a	-	-	-	165 a	-
0.8 Mn 10 Zn	-	-	-	-	1.61 a	139 b	-
0.8 Mn 15 Zn	-	-	-	-	1.69 a	229 a	-
1.2 Mn 10 Zn	-	-	-	-	1.62 a	182 a	-
1.2 Mn 15 Zn	-	-	-	-	1.57 a	158 a	-
10 Zn 0.8 Mn	-	-	-	-	1.61 a	139 a	-
10 Zn 1.2 Mn	-	-	-	-	1.62 a	182 a	-
15 Zn 0.8 Mn	-	-	-	-	1.69 a	229 a	-
15 Zn 1.2 Mn	-	-	-	-	1.57 b	158 a	-
CV§	12.7	11.8	12.4	9.3	43.3	47.4	6.0

† Los números que preceden a las letras indican los gramos por litro de N, Mn y Zn aplicados.

‡ Letras diferentes en un mismo contraste lineal corresponden a valores estadísticamente diferentes a un nivel de probabilidad de 0.05.

§ Coeficientes de variación en porcentaje.

los diferentes órganos de la planta y posiblemente efectos de balance nutrimental favorecidos por las fertilizaciones foliares.

La aplicación foliar de ZnSO₄ tuvo efecto principal o interactivo con la aplicación foliar de urea o de MnSO₄, en las concentraciones de N y Ca de los foliolos productivos (Cuadro 3); de Cu y Mn de los peciolos productivos (Cuadro 4); de K, Na y Cu de los foliolos vegetativos (Cuadro 5); y de K, Ca, P de los peciolos vegetativos (Cuadro 6). El Mg fue el nutrimento único que no fue alterado, esto posiblemente se debió a su abastecimiento relativamente alto en el suelo, el Mg soluble en el suelo (ver Materiales y Métodos) equivale a 460 kg ha⁻¹ en la capa de suelo de 0 a 15 cm., cantidad más que suficiente para cubrir las necesidades del cultivo; por otra parte debe considerarse que el Mg soluble en el suelo tiende a mantener un equilibrio con el Mg intercambiable, además este cation es adsorbido con mucho menor fuerza que el Ca (Foth, 1990). Las

mayores concentraciones de dichos elementos en los órganos se alcanzaron en ocasiones con la concentración mayor del ZnSO₄ aplicado foliarmente, en otras, con la concentración menor, cuando además del efecto principal del Zn, se obtuvieron efectos interactivos del ZnSO₄ con la urea o con el MnSO₄, las concentraciones fueron aún mayores (Cuadros 3, 4, 5 y 6). Una posible explicación a la respuesta de la planta al Zn aplicado foliarmente, ya sea en su efecto principal o interactivo con el N o con el Mn, es que indujo un mayor crecimiento de raíces, lo que a su vez favoreció una absorción mayor de nutrimentos, puesto que el Zn tiene una relación directa en la síntesis del ácido indolacético (Epstein, 1972) y éste a su vez puede incrementar el crecimiento de yemas apicales, en este caso de la raíz. Tiffin (1977) indica que una vez que el Zn ha sido absorbido vía foliar, puede ser transportado a través de toda la planta, siempre y cuando el cubrimiento de las hojas durante la aspersión haya sido total.

Cuadro 5. Medias de efectos principales e interactivos significativas de las concentraciones de elementos en los foliolos vegetativos.

Efecto	K	Ca	Na	Zn	Mn	Cu
	----- % -----					
	----- mg kg ⁻¹ -----					
40 N†	-	-	0.71 a‡	63 b	751 a	-
60 N	-	-	0.63 b	77 a	551 b	-
0.8 Mn	2.29 a	1.66 a	0.70 a	-	720 a	-
1.2 Mn	2.16 b	1.49 b	0.63 b	-	575 b	-
10 Zn	2.12 b	-	0.55 b	-	-	8.3 a
15 Zn	2.34 a	-	0.77 a	-	-	6.9 b
40 N 0.8 Mn	-	1.82 a	0.79 a	-	-	-
40 N 1.2 Mn	-	1.19 b	0.61 b	-	-	-
60 N 0.8 Mn	-	1.50 a	0.61 a	-	-	-
60 N 1.2 Mn	-	1.76 a	0.65 a	-	-	-
0.8 Mn 40 N	-	1.86 a	0.79 a	-	-	-
0.8 Mn 60 N	-	1.50 b	0.61 b	-	-	-
1.2 Mn 40 N	-	1.19 b	0.61 a	-	-	-
1.2 Mn 60 N	-	1.76 a	0.65 a	-	-	-
0.8 Mn 10 Zn	-	-	0.57 b	-	-	-
0.8 Mn 15 Zn	-	-	0.83 a	-	-	-
1.2 Mn 10 Zn	-	-	0.53 b	-	-	-
1.2 Mn 15 Zn	-	-	0.72 a	-	-	-
10 Zn 0.8 Mn	-	-	0.57 a	-	-	-
10 Zn 1.2 Mn	-	-	0.53 a	-	-	-
15 Zn 0.8 Mn	-	-	0.83 a	-	-	-
15 Zn 1.2 Mn	-	-	0.72 b	-	-	-
CV§	9.6	16.2	7.2	34.5	3.01	31.7

† Los números que preceden a las letras indican los gramos por litro de N, Mn y Zn aplicados.

‡ Letras diferentes en un mismo contraste lineal corresponden a valores estadísticamente diferentes a un nivel de probabilidad de 0.05.

§ Coeficientes de variación en porcentaje.

La aplicación foliar de urea tuvo efecto principal o interactivo con la aplicación foliar de ZnSO₄ o de MnSO₄ en las concentraciones de P, Mg, Mn y Ca de los foliolos productivos (Cuadro 3); de Ca, Mg, Mn, Na y P de los peciolos productivos (Cuadro 4); de Na, Zn, Mn y Ca de los foliolos vegetativos (Cuadro 5); y de Mn y Ca de los peciolos vegetativos (Cuadro 6). Las concentraciones mayores de dichos elementos en los órganos se alcanzaron en ocasiones con la concentración mayor de la urea aplicada foliarmente, en otras con la concentración menor, cuando además del efecto principal, se obtuvieron efectos interactivos con el ZnSO₄ o con el MnSO₄, las concentraciones fueron aún mayores (Cuadros 3, 4, 5 y 6). Además, se observa que en general las concentraciones de P, Ca y Zn en los diferentes órganos fueron mayores cuando se aplicó la concentración alta de urea: 60 g L⁻¹ de N, este efecto probablemente fue debido a que las aplicaciones foliares de urea acidificaron temporalmente el suelo a nivel de rizósfera, con la

consecuencia de que se incrementó la absorción de nutrientes cuya disponibilidad es dependiente del grado de acidez del suelo. Al respecto Raven y Smith (1976) indican que la asimilación de NH₄⁺, ya sea que el proceso tenga lugar en las raíces o en las hojas, implica la excreción de H⁺ a la solución del suelo. Kirkby y Mengel (1967) encontraron que tanto el NH₄⁺, como la urea tienen efectos acidificantes en la solución nutritiva, aunque el efecto de esta última es menos acentuado.

Cabe destacar, de acuerdo con los resultados anteriores, que sería conveniente mediante investigaciones subsecuentes, precisar los alcances prácticos del uso de aspersiones foliares con urea en cultivos que se desarrollan en suelos alcalinos, en la absorción mayor de nutrientes dependientes directos de la acidez del suelo, en términos de que pudiera resultar una práctica cultural sencilla y económica.

La aplicación foliar de MnSO₄ tuvo efecto principal o interactivo con la aplicación foliar de urea

Cuadro 6. Medias de efectos principales e interactivos significativas de las concentraciones de elementos en los peciolo vegetativos.

Efecto	P	K	Ca	Mn	Cu
	----- % -----			--- mg kg ⁻¹ ---	
40 N†	-	-	-	355 a‡	-
60 N	-	-	-	260 b	-
0.8 Mn	-	-	-	-	-
1.2 Mn	-	-	-	-	-
10 Zn	-	3.15 b	1.31 a	-	-
15 Zn	-	3.55 a	1.23 b	-	-
40 N 0.8 Mn	0.127 a	-	1.28 a	-	3.19 b
40 N 1.2 Mn	0.135 a	-	1.18 a	-	4.84 a
60 N 0.8 Mn	0.137 a	-	1.23 b	-	4.02 a
60 N 1.2 Mn	0.121 b	-	1.36 a	-	3.61 a
0.8 Mn 40 N	0.127 a	-	1.28 a	-	3.19 a
0.8 Mn 60 N	0.137 a	-	1.23 a	-	4.02 a
1.2 Mn 40 N	0.135 a	-	1.18 b	-	4.84 a
1.2 Mn 60 N	0.121 a	-	1.36 a	-	3.61 a
40 N 10 Zn	0.122 b	3.10 b	-	-	-
40 N 15 Zn	0.139 a	3.72 a	-	-	-
60 N 10 Zn	0.131 a	3.18 b	-	-	-
60 N 15 Zn	0.126 a	3.37 a	-	-	-
0.8 Mn 10 Zn	0.124 b	-	1.26 a	-	-
0.8 Mn 15 Zn	0.141 a	-	1.25 a	-	-
1.2 Mn 10 Zn	0.130 a	-	1.36 a	-	-
1.2 Mn 15 Zn	0.125 a	-	1.20 b	-	-
10 Zn 0.8 Mn	0.124 a	-	1.26 a	-	-
10 Zn 1.2 Mn	0.130 a	-	1.36 a	-	-
15 Zn 0.8 Mn	0.141 a	-	1.25 a	-	-
15 Zn 1.2 Mn	0.125 b	-	1.20 a	-	-
CV§	13.8	8.8	9.8	39.1	44.2

† Los números que preceden a las letras indican los gramos por litro de N, Mn y Zn aplicados.

‡ Letras diferentes en un mismo contraste lineal corresponden a valores estadísticamente diferentes a un nivel de probabilidad de 0.05.

§ Coeficientes de variación en porcentaje.

o de ZnSO₄ en las concentraciones de N, Ca, Mn y Na de los foliolos productivos (Cuadro 3); de K, Cu y Mn de los peciolo productivos (Cuadro 4); de K, Ca, Na y Mn de los foliolos vegetativos (Cuadro 5); y de Cu y P de los peciolo vegetativos (Cuadro 6). Las concentraciones mayores de N, Ca, Mn y Na de los foliolos productivos y las de K, Ca, Na y Mn de los foliolos vegetativos, se obtuvieron con la aplicación foliar de MnSO₄ en su concentración menor: 0.8 g L⁻¹ de Mn. Por otra parte considerando lo antes indicado, que las medias correspondientes del factorial no fueron estadísticamente diferentes de las del tratamiento testigo, se concluye que la aplicación foliar de MnSO₄ en su concentración menor favoreció la absorción de dichos elementos en dichos órganos y esto probablemente fue debido a que se logró un

balance nutrimental más acorde con los requerimientos del cultivo.

Las concentraciones mayores de K, Cu y Mn de los peciolo productivos y de Cu y P de los peciolo vegetativos se obtuvieron con la aplicación de MnSO₄ en su concentración mayor: 1.2 g L⁻¹ de Mn (Cuadros 4 y 6), con excepción de la concentración de P mayor en el peciolo vegetativo, la cual se obtuvo con 0.8 g L⁻¹ de Mn y 15 g L⁻¹ de Zn.

En el Cuadro 3 se observa que la aplicación foliar de 1.2 g L⁻¹ de Mn con relación a la de 0.8 g L⁻¹ del mismo micronutriente, dio por resultado una disminución en la concentración de Mn en los foliolos productivos; sin embargo, al analizar el efecto de la interacción urea por MnSO₄ se observa que la disminución de la concentración de Mn más contrastante: 721 contra 417 ppm de Mn, estuvo asociada con concentraciones mayores de K y Ca, o sea que una mayor absorción de K y de Ca disminuyó la absorción de Mn, por efecto de demanda diferencial de cationes y por competencia en la absorción de cationes.

CONCLUSIONES

De las concentraciones promedio de N, P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Cu y Na en los foliolos y peciolo productivos y vegetativos resultantes de la aplicación foliar de ocho tratamientos en los cuales se incluyeron todas las combinaciones de dos concentraciones de urea (40 y 60 g L⁻¹ de N), dos de MnSO₄ (0.8 y 1.2 g L⁻¹ de Mn) y dos de ZnSO₄ (10 y 15 g L⁻¹ de Zn), aumentaron con relación al tratamiento testigo, solamente la concentración de K en los foliolos y peciolo productivos y disminuyeron las concentraciones de Ca, Mg y Na en los peciolo vegetativos.

Las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Cu y Na, en los cuatro órganos de la planta mostraron al menos en una ocasión cambios en su concentración debidos al efecto principal o interactivo del N, Mn o Zn aplicados foliarmente.

La aplicación foliar de urea en su concentración mayor, con relación a su concentración menor, ocasionó que en varios órganos se obtuvieran concentraciones mayores de P, Ca o Zn. Cuando además del efecto principal de la urea, ésta interactuó con la aplicación foliar del ZnSO₄ o MnSO₄, la concentración de Ca fue aún mayor.

La aplicación de MnSO₄ en su concentración menor: 0.8 g L⁻¹ de Mn, con relación a su concentración mayor: 1.2 g L⁻¹ de Mn, determinó

concentraciones mayores de N, Ca y Mn en los foliolos productivos y de las de K, Ca, Na y Mn en los foliolos vegetativos, y también que, cuando el MnSO_4 interactuó con la urea o con el ZnSO_4 , las concentraciones de dichos elementos fueran aún mayores.

La aplicación de ZnSO_4 en una u otra concentración: 10 ó 15 g L^{-1} de Zn provocó diferencias entre las concentraciones de varios elementos en cada uno de los órganos analizados, dichas diferencias en varias ocasiones se acentuaron aún más debido a la interacción con la aplicación de urea o con la del MnSO_4 .

LITERATURA CITADA

- Acosta Z., C. 1991. Mecanismos de absorción foliar de nutrimentos. Folleto Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Allen, M. 1970. Uptake from inorganic sprays to apple leaves. *Pesticide Sci.* 1: 152-155.
- AOAC. 1980. Official methods of analysis. Official Analytical Chemists. 15th edition. Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C.
- Arreola A., J.G. 1988. Efecto de la fertilización nitrogenada en diferentes etapas fenológicas de la frambuesa roja (*Rubus idaeus* L.). Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx.
- Benton, J.J., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook. A practical sampling preparation, analysis and interpretation guide. Micro-Macro Publishing, Inc. USA.
- Boote, K.J., J.N. Galleher, W.K. Robertson, K. Hinson y L.C. Hammond. 1978. Effect of foliar fertilization on photosynthesis, leaf nutrition, and yield of soybeans. *Agron. J.* 70: 787-791.
- Epstein, M. 1972. Mineral nutrition of plant: Principles and perspectives. Wiley International Edition. New York.
- Foth, H.D. 1990. Fundamentals of soil science. 8th Ed. John Wiley and Sons, Inc. United States of America.
- Gray, R.C. 1977. Foliar fertilization with primary nutrients during reproductive stage of plant growth. Muscle Schools A. L. Tennessee.
- Kirkby, E.A. y K. Mengel. 1967. Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to nitrate, urea, or ammonium nutrition. *Plant Physiol.* 42: 6-14.
- Lucas, R.E. y B.D. Knezek. 1977. Climatic and soil conditions promoting micronutrient deficiencies in plants. pp. 265-288. *In:* J.J. Mortvedt, P.M. Giordano y W.L. Lindsay. (eds). *Micronutrients in agriculture.* 3rd ed. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic Press Inc. Institute of Plant Nutrition. University of Hohenheim, Germany.
- Megan, H., M.H. Chaplin y A.R. Dixon. 1979. Elemental composition of red raspberry leaves as a function of time of season and position on cane. *HortScience* 14: 46-47.
- Muratalla, L.A. 1986. Comportamiento de 19 especies de manzano (*Mallus* spp.) injertadas con el cultivar "Elba" en Montecillo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Mex.
- Murphy, L.S. y L.M. Walsh. 1977. Correction of micronutrient deficiencies with fertilizers. pp. 347-388. *In:* *Micronutrients in agriculture.* 3rd ed. J.J. Mortvedt, P.M. Giordano y W.L. Lindsay (eds.). Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Ortiz S., C.A. 1979. Levantamiento de suelos del campo experimental Montecillo. Rama de Suelos, Sección de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos. Colegio de Postgraduados. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Ortiz S., C.A. 1999. Comunicación personal.
- Raven, J.A. y F.A. Smith. 1976. Nitrogen assimilation and transport in vascular land plants in relation to intracellular pH regulation. *New Phytol.* 76: 415-431.
- Reed, D.W. Tukey, Jr. 1978. Effect of pH on foliar absorption of phosphorus compounds by chrysanthemum J. *Amer. Soc. Hort. Sci.* 103: 337-340.
- Reuter, D.J. y J.B. Robinson (eds). 1986. Plant analysis. An interpretation manual. Inkata Press. Melbourne, Sydney.
- Rodríguez, A.J. y E. Avitia G. 1984. El cultivo de la frambuesa roja. Ed. Talleres Gráficos de la Nación. Colegio de Postgraduados, México.
- Swietlik, D. y M. Faust. 1984. Foliar nutrition of fruit crops. *Hort Rev.* 6(8): 175-183.
- Tiffin, L.O. 1977. Translocation of micronutrients in Plants. pp. 199-230. *In:* J.J. Mortvedt, P.M. Giordano y W.L. Lindsay (eds). *Micronutrients in agriculture.* 3rd ed. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Yamada, Y., S.H. Wittwer y M.J. Bukovac. 1964. Penetration of ions through isolated cuticles. *Plant Physiol.* 39: 28-32.
- Yamada, Y., S.H. Wittwer y M.J. Bukovac. 1965. Penetration of organic compounds through isolated cuticular membranes with special reference to ^{14}C urea. *Plant Physiol.* 40: 170-175.

ESTIMACION DE LA HUMEDAD DEL SUELO PARA MAIZ DE TEMPORAL MEDIANTE UN BALANCE HIDRICO

Soil Moisture Estimation for Rainfed Corn by Water Balance

H. E. Flores L.¹ y J.A. Ruíz C.²

RESUMEN

La variabilidad de la lluvia en tiempo y espacio, la hace un indicador poco adecuado para evaluar la disponibilidad de humedad para las plantas. Una alternativa es cuantificar la dinámica de humedad en su zona radical mediante un balance hídrico. Con este objetivo se aplicó un modelo de simulación para cuantificar la humedad disponible para el cultivo de maíz en condiciones de temporal. El modelo mostró resultados satisfactorios cuando las lluvias no satisfacen la capacidad de campo del suelo. Cuando se rebasa este punto se sobrestima la humedad disponible, encontrándose valores de R^2 entre 0.654 y 0.903 entre los datos de humedad observada y la estimada para los años de análisis.

Palabras clave: Modelo de balance hídrico.

SUMMARY

Spatial and temporal variability of rainfall makes it a poor indicator of water availability for plants. An option is to quantify the soil moisture dynamics at the plant root zone by means of a water balance. Following this goal, a simulation model to quantify the available humidity for corn crop under rainfed conditions was used. The model showed the best fitness when soil water content kept lower than field capacity. However, when soil moisture surpassed field capacity, because of intensive or continuous rainfall, the model overestimated soil moisture. A comparison between observed and estimated data showed values of r^2 ranking from 0.654 to 0.903.

Index words: Water balance model.

¹ INIFAP-CIPAC-Campo Experimental Altos de Jalisco, Km. 8 Carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno, Apartado postal 56, Tepatitlán, Jal. Tel. (378) 20355. e-mail: hflores@cualtos.udg.mx

² INIFAP-CIPAC-Campo Experimental Centro de Jalisco, Km. 10 Carretera Tlajomulco-San Miguel Cuyutlán, Apartado postal 128, Tlajomulco de Zuñiga, Jal. Tel. (379) 24176 y 24051.

Aceptado: Septiembre de 1998.

INTRODUCCION

En la agricultura de temporal, los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas tienen como uno de los principales factores limitativos a la disponibilidad de humedad en el suelo, donde la fuente de abastecimiento de agua es la lluvia. La variabilidad que tiene la lluvia en tiempo y espacio, la hace un indicador poco adecuado para evaluar la disponibilidad de humedad para las plantas en una región. Una alternativa es cuantificar la dinámica de humedad en su zona radical mediante un balance hídrico.

El modelo de balance hídrico más comúnmente utilizado requiere de los parámetros humedad disponible, lluvia, pérdidas por evapotranspiración, escurrimiento y drenaje de la zona donde crecen las raíces. A partir de este modelo es posible cuantificar la disponibilidad de humedad para el cultivo durante el ciclo de desarrollo, el agua consumida por la planta, la asociación de prácticas agrícolas con la disponibilidad de humedad y el potencial productivo de los sistemas agrícolas regionales. Adicionalmente, con el balance de humedad se pueden generar índices de humedad para representar si la planta estuvo expuesta a estrés hídrico o señalar el grado de deficiencia de humedad durante el ciclo del cultivo.

La información requerida por muchos de los modelos de balance hídrico son variables de clima y suelo, y del cultivo, algunas de las cuales pueden no estar disponibles, sobre todo en países que como México presentan bajo nivel de instrumentación. En estos casos un modelo adecuado sería aquel que utilizara información de fácil acceso y con posibilidades de aplicarlo en diversas condiciones ambientales. Para lograr esto es necesario buscar funciones sencillas pero precisas que representen los componentes del balance hídrico.

Definido el modelo mediante el cual se simulará la disponibilidad de humedad en el suelo, a continuación debe validarse, proceso que implica la comparación de las estimaciones del modelo contra datos observados.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un modelo de balance de humedad del suelo, que

utilizando variables de fácil acceso, estime eficientemente la disponibilidad de humedad para maíz de temporal.

REVISION DE LITERATURA

El término "balance hídrico del suelo" relaciona la humedad adicionada por medio de la lluvia (P) o irrigación (Ir) a las pérdidas por evapotranspiración (ET), escurrimiento (E) y drenaje (D), además de los cambios en el contenido de humedad aprovechable (CH) en el perfil del suelo (Reddy, 1983), la que puede expresarse por la siguiente ecuación (Chang, 1968):

$$P + Ir + CH = ET + E + D$$

En el desarrollo de modelos de balance hídrico se han involucrado variables de clima y suelo, y de la planta (Jensen *et al.*, 1971; Radcliffe *et al.*, 1980; Reddy, 1983; Smith *et al.*, 1985; Driessen, 1986; Radulovich, 1987; Jasso, 1988; Williams *et al.*, 1990), que los hacen más precisos, pero en la mayoría de los casos su aplicación se dificulta debido a que la información requerida no está disponible o es difícil de obtener, imposibilitando además la extrapolación del modelo de una zona a otra.

Un modelo adecuado a las condiciones de México sería aquel que usara variables de clima y suelo, y del cultivo de fácil acceso y con posibilidad de usarlo en diversas condiciones. Para lograr lo anterior es necesario buscar funciones sencillas pero precisas que representen los componentes del balance hídrico del suelo señalados por Chang (1968).

Precipitación

En condiciones de temporal, el término Ir que indica la irrigación no se considera y la lluvia (P) es la fuente de abastecimiento de agua para el cultivo. La P es medida en pluviómetros de las estaciones meteorológicas. Sin embargo, no toda la P que ocurre durante el temporal puede no llegar a ser disponible para las plantas, pues factores como la intensidad de la lluvia, la velocidad de infiltración del agua en el suelo, la cobertura vegetal y la topografía provocan que sólo una parte de ella penetre al suelo. El concepto de lluvia efectiva (PE) indica la porción de P que puede estar disponible en la zona radical de la planta (Pacheco, 1981) y la infiltración es el proceso

mediante el cual el agua penetra al suelo (Brooks *et al.*, 1991).

El manejo de lluvia efectiva (PE) depende del conocimiento del agua que se infiltra al suelo, la que es función de las propiedades y prácticas de manejo del suelo (Brakensiek y Rawls, 1988). Por esta razón, es conveniente evaluar el agua que utiliza la planta y que proviene de la lluvia como agua infiltrada al suelo.

Infiltración

Un modelo de infiltración que muchos de los modelos de balance hídrico usan es la ecuación de Green-Ampt (Rawls y Brakensiek, 1988).

Ffolliott y Guertin (1988) relacionaron la tasa de infiltración directamente con la textura y el almacenamiento de la humedad disponible del suelo. Por otro lado, Driessen (1986) calculó la tasa máxima de infiltración combinando los efectos de las fuerzas mátricas y fuerzas de gravedad del agua del suelo.

Rivas *et al.* (1990) presentaron el modelo de Kostiakov modificado con un parámetro de cobertura vegetal, donde considera la tasa de infiltración, el porcentaje de cobertura vegetal y los parámetros que dependen del suelo y condiciones iniciales de humedad. Estos autores también probaron el modelo de Holtan modificado por Huggins y Monke (1968), donde se considera la tasa de infiltración, la capacidad de almacenaje del suelo arriba de un estrato impermeable, la infiltración acumulada, la porosidad del suelo, la cobertura vegetal o arbórea, la infiltración básica y constantes determinadas por curvas.

Pimentel *et al.* (1989) informaron sobre un modelo para predecir la tasa de infiltración y el tiempo de encharcamiento obtenido con base en la teoría de movimiento del agua derivado por Smith y Parlange.

Baier y Robertson (1966) calcularon la cantidad de agua infiltrada (I) mediante la relación que considera la precipitación pluvial diaria, la humedad disponible en el suelo al inicio del día y la máxima capacidad del almacenamiento del suelo.

Escurrecimiento

El volumen de escurrecimiento (E) puede calcularse mediante la ecuación del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del

Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) (Ward *et al.*, 1988; Williams *et al.*, 1990).

Cuando se conoce el escurrimiento (E) o la infiltración (I) puede calcularse uno u otro por diferencia con la lluvia (P).

Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) de un cultivo es el parámetro que más pérdidas de humedad provoca en el balance hídrico. Su cálculo implica el uso de la evapotranspiración potencial (ETP) o evaporación (Ev) medida en un tanque evaporímetro, ajustada por un coeficiente de cultivo (kc) y un coeficiente de disponibilidad de humedad (ks), expresada por la relación $ET = kc \cdot ks \cdot ETP$ (Mojarro, 1990) o $ET = kc \cdot ks \cdot (k \cdot Ev)$ (Palacios, 1980).

La ETP puede estimarse directamente de las siguientes maneras: (a) en campo, mediante lisímetros (Rosenberg, 1983; Lira, 1986); (b) con fórmulas empíricas que involucran uno o más elementos meteorológicos, como son los métodos de Thornthwaite, Blaney y Criddle, Makking, Turk, Linacre, método de unidades térmicas solares, Hargreaves, Jensen y Haise, Horton y Norero, entre otros (Linacre, 1977; Mojarro y Palacios, 1979; Rosenberg, 1983; Lira, 1986; Ortiz, 1987); (c) métodos micrometeorológicos, como el método de transporte de masas de la ecuación de Dalton, el cociente de Bowen y balance de energía, la ecuación de Thornthwaite-Holzman y la técnica de correlación de Eddy (Chang, 1968; Rosenberg, 1983); (d) métodos aerodinámicos combinados con balance de energía, como la ecuación de Penman y Penman modificada por Monteith, los métodos de Van Bavel, Slatyer y McIlroy, Priestley y Taylor (Chang, 1968; Rosenberg, 1983); y (e) con la evaporación medida en el tanque evaporímetro ajustada con un coeficiente que depende de la cobertura del terreno, la humedad relativa y la velocidad del viento (Doorenbos y Kassam, 1986).

El coeficiente del cultivo (kc) es una relación empírica que relaciona la evapotranspiración máxima (ET) con la evapotranspiración de referencia (ETP) de un cultivo. El valor de kc varía con el cultivo, con la etapa de desarrollo y en cierta medida, con la velocidad del viento y la humedad (Doorenbos y Kassam, 1986), y se puede expresar de la siguiente manera: $kc = ET/ETP$, o $kc = ET/Ev$ (Denmead y Shaw, 1962).

Tijerina (1986) presentó expresiones cúbicas incompletas que se han derivado de estudios experimentales para relacionar el valor de kc con la proporción de desarrollo del ciclo del cultivo. Así mismo, García (1979) obtuvo varios modelos cuadráticos y cúbicos de kc a partir de relaciones gráficas presentadas en trabajos experimentales donde se relaciona el valor de kc y el porcentaje de desarrollo del cultivo.

Norero (1976) utilizó una ecuación de tipo cúbico incompleta para calcular kc, que requiere una constante que indica la proporción de evaporación en suelo desnudo, el índice de área foliar promedio y la duración del cultivo.

Mojarro y Palacios (1979) determinó un modelo de kc para frijol, por medio del índice de área foliar (IAF) y la proporción entre la ET y la Ev.

Palacios (1980) mencionó que el coeficiente de disponibilidad de humedad (ks) para evaluar la relación que guardan el contenido de humedad del suelo con el desarrollo del cultivo ha sido motivo de varias investigaciones, las que han dado origen a diversas funciones para representar dicha relación, como la de Hanson, citado por Palacios (1980), Norero (1976), Marinato y Palacios (1979) y Cumpa *et al.* (1988).

Drenaje

El drenaje (D) de agua del perfil radical de un cultivo se refiere al agua que se desplaza fuera de esta zona. Palacios (1980) menciona que el agua drenada fuera de la zona radical es la diferencia entre el contenido de agua del suelo y el máximo contenido de agua que éste puede almacenar. El agua drenada puede tener flujo positivo (ascenso capilar) y flujo negativo (percolación profunda). Ambos flujos de agua pueden ser cuantificados por medio de la ley de Darcy (Driessen, 1986; Cano *et al.*, 1991).

Palacios (1980) menciona que debido al ascenso capilar del agua para un suelo de textura media, la zona de abastecimiento de esta humedad es del orden de 30 cm aproximadamente.

Para determinar el volumen de agua aprovechable por la planta, Palacios (1980) menciona que ésta dependerá de las características físicas del suelo y la profundidad de exploración de las raíces. La lámina de agua aprovechable (LA) requiere de datos físicos del suelo como densidad aparente (D_a), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y profundidad de exploración radical (PR).

Norero (1976) señala que la profundidad de enraizamiento (PR) a lo largo del ciclo del cultivo puede estimarse con una ecuación que considera la duración del ciclo del cultivo y la profundidad típica de enraizamiento sin impedimento físico. Asimismo, Palacios (1980) indica una función para estimar el porcentaje de desarrollo radical, como una función del desarrollo vegetativo y la proporción del desarrollo radical respecto al máximo posible.

Cambio de Humedad

Reddy (1983) menciona que la ecuación de equilibrio hídrico es: $CH = P - (ET + E + D)$, variables ya descritas. Smith *et al.* (1985) indican que los sistemas de programación de irrigación modernos con frecuencia utilizan el modelo de balance hídrico siguiente:

$$CH_i = CH_{i-1} + ET_i - P_i - Ir_i \pm D_i$$

donde CH_i es la pérdida de agua del suelo en la zona radical para el día i , CH_{i-1} es la pérdida en la día anterior, ET_i es la evapotranspiración del cultivo, P_i es la precipitación efectiva, Ir_i es la cantidad de agua de riego y D_i es el drenaje del suelo, el cual es positiva al existir pérdidas por drenaje y es negativa cuando hay ascensión capilar. Un modelo similar al anterior presentan González y Palacios (1981), sólo que separan el ascenso del agua capilar del agua percolada.

MATERIALES Y METODOS

El modelo de balance de humedad para maíz de temporal que se utilizó, fue el representado por la relación siguiente:

$$CH_i = CH_{i-1} + I_i - ET_i - D_i - E_i$$

donde CH_i es el contenido de agua del suelo en la zona radical para el final del día i , CH_{i-1} es el contenido de agua al inicio del día i , I_i es la infiltración procedente de la precipitación pluvial en el día i , ET_i es la evapotranspiración del cultivo en el día i , D_i representa las pérdidas de humedad por drenaje en el día i y E_i son las pérdidas de agua por escurrimiento en el día i .

La infiltración (I_i) de agua al perfil del suelo procedente de la lluvia, se consideró la fuente de abasto de agua al cultivo. Si la precipitación pluvial es

menor que 25.4 mm, se consideró que toda la precipitación se infiltra, pero si es mayor, la infiltración se calculó con la función que presentan Baier y Robertson (1966), según la expresión siguiente:

$$I_i = \left[\begin{array}{l} 0.9177 + 1.811 \cdot \text{LN} \left(\frac{P_i}{25.4} \right) - 0.0097 \cdot \text{LN} \\ \left(\frac{P_i}{25.4} \right) \cdot \left(\frac{CH_{i-1}}{CH_{mx_i}} \right) \cdot 100 \end{array} \right] \cdot 25.4$$

donde I_i es la infiltración en el día i (en mm), P_i es la precipitación pluvial en el día i (en mm), CH_{i-1} es el contenido de humedad en el suelo al inicio del día i , CH_{mx_i} es el máximo contenido de humedad que se puede almacenar en el suelo dentro del área radical.

La profundidad radical (PR_i) del cultivo varía con el desarrollo del cultivo. Para su estimación se utilizó la función indicada por Norero (1976), como:

$$PR_i = 1.8 \cdot \left(\frac{t_i}{tc} \right) \cdot \left(1.50 - \frac{t_i}{tc} \right) R_x$$

donde t_i es el día i desde la siembra hasta la madurez, tc es la duración del ciclo del cultivo y R_x es la profundidad típica de enraizamiento sin impedimento físico (en cm).

La evapotranspiración del cultivo (ET_i) se estimó con la función indicada por Palacios (1980), como:

$$ET_i = kc_i \cdot ks_i \cdot (0.80 \cdot Ev_i)$$

donde kc es el coeficiente del cultivo, ks es el coeficiente de disponibilidad de humedad y Ev_i es evaporación del día i medida en el tanque evaporímetro.

El coeficiente del cultivo (kc) es una relación empírica que relaciona la evapotranspiración máxima del cultivo (ET) con la evapotranspiración de referencia (ETP) de un cultivo. Norero (1976) presentó la siguiente función para estimar kc_i :

$$kc_i = K + F \cdot \left(\frac{t_i}{tc} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{t_i}{tc} \right)$$

donde K es una constante que indica la proporción de evaporación en suelo desnudo, F es el índice de área

foliar promedio del cultivo, t_i es cada uno de los días desde la siembra hasta la madurez del cultivo y t_c es la duración del ciclo del cultivo.

El coeficiente de disponibilidad de humedad (ks_i) evalúa la relación que guarda el contenido de humedad del suelo con el desarrollo del cultivo. Palacios (1980) presenta la ecuación siguiente para el cálculo de ks_i :

$$ks_i = \frac{1}{1 + \frac{Ev_i}{60} \cdot \frac{(1 - HA_i)}{HA_i}}$$

donde Ev_i es la evaporación del día i medida en el tanque evaporímetro (en mm) y HA_i es la humedad aprovechable residual en el día i (en mm mm⁻¹).

El cálculo de HA_i se realizó con la relación siguiente:

$$HA_i = \frac{CH_{i-1}}{CHmx_i}$$

donde CH_{i-1} es el contenido de humedad al inicio del día i (en mm) y $CHmx_i$ es la máxima capacidad de almacenamiento de agua dentro del área radical en el día i (en mm) que, a su vez, se calculó con la siguiente expresión:

$$CHmx_i = \frac{(CC - PMP) \cdot PR_i \cdot Da}{100}$$

donde CC es la capacidad de campo promedio del suelo, PMP es el punto de marchitez permanente promedio del suelo, PR_i es la profundidad radical para el día i (en cm) y Da es la densidad aparente del suelo.

El drenaje de agua dentro del área radical (D_i) se calcula considerando las siguientes situaciones:

(1) Si la infiltración (I_i) más el contenido de humedad al inicio del día i (CH_{i-1}) rebasan la máxima capacidad de almacenamiento del suelo en el día i ($CHmx_i$), el agua drenada se calcula con la relación:

$$D_i = I_i + CH_{i-1} - CHmx_i$$

(2) Si la I_i más CH_{i-1} es igual o menor que $CHmx_i$, entonces el agua drenada es cero.

El escurrimiento (E_i) en el día i se estimó tomando las siguientes consideraciones:

(1) Si la lluvia (P_i) fue menor que 25.4 mm, el escurrimiento E_i se consideró como cero y toda la lluvia como infiltrada.

(2) Si la lluvia (P_i) fue mayor que 25.4 mm, el escurrimiento E_i se calculó con la relación siguiente:

$$E_i = P_i - I_i$$

donde I_i es el agua infiltrada.

A partir de las funciones y consideraciones descritas, se elaboró un programa para realizar el balance de humedad en la hoja de cálculo QUATTRO PRO ver. 4.0, considerando los supuestos siguientes: no se consideran las aportaciones de humedad por ascensión capilar; la máxima capacidad de almacenamiento del suelo se definió por la humedad contenida entre capacidad de campo y el punto de marchitez permanente; el perfil del suelo se consideró homogéneo, evaluando el cambio en el contenido de humedad con las características promedio de densidad aparente, CC y PMP ; no se tomaron en cuenta las condiciones de saturación del suelo, en particular después de una lluvia fuerte; en el modelo de infiltración no se especifica el grado de pendiente con que funciona eficientemente, por lo que se asume que es adecuado sólo para suelos casi planos o con poca pendiente.

Información Requerida

La información de clima requerida fue precipitación pluvial y evaporación diarias, obtenidas de la estación agrometeorológica del Campo Experimental Altos de Jalisco (CEAJAL) con localización geográfica de 21°52' norte, 101°53' oeste y 1930 msnm.

La información edáfica necesaria de la zona radical es Da , CC y PMP . Las características físicas del suelo donde se desarrollaron las observaciones de humedad se presentan en el Cuadro 1.

La información del cultivo requerida es fecha de siembra, duración del ciclo del cultivo, índice de área foliar promedio y máxima profundidad de enraizamiento, que para el presente estudio se indica en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Características físicas promedio de dos estratos del suelo, en el Campo Experimental Altos de Jalisco, Tepatitlán, Jal.

Profundidad	Da	Arena	Limo	Arcilla	Contenido de humedad			Hum. Grav.	
					0.1 bar	0.3 bar	15 bar	0.1 bar	0.3 bar
	g cm ⁻³	%			%			mm	
0 a 20	1.45	18.3	34.3	47.4	31.1	27.4	17.4	39.7	29
20 a 46	1.42	11.1	21.8	67.1	32.6	27.6	23.4	34.0	15.5
Media	1.44	14.7	28.1	57.3	31.9	27.5	20.4	73.7	44.5

Validación del Modelo

El modelo se validó utilizando los muestreos de humedad del suelo que se realizaron en el Programa de Agroclimatología del CEAJAL de 1985 a 1988, en experimentos con maíz de temporal. La lámina de agua contenida en el suelo se cuantificó con el método gravimétrico, en muestreos que se realizaron una vez por semana a lo largo del ciclo de cultivo, tomando en consideración la profundidad de enraizamiento estimada con el modelo de Norero (1976).

RESULTADOS Y DISCUSION

En las Figuras 1a, 1b, 1c y 1d se muestran la lluvia y los valores de humedad residual del suelo observados y estimados de 1985 a 1988 en el cultivo de maíz en condiciones de temporal, respectivamente.

En 1985 (Figura 1a) se presentó un periodo de lluvias intensas al inicio del temporal, lo que originó como consecuencia altos contenidos de humedad disponible (HD) en el suelo. En los meses de agosto y septiembre ocurrieron lluvias de menor cantidad pero continuas, que mantuvieron la HD entre 44.5 y 73.7 mm, valores de lámina en el suelo que corresponden a CC y saturación del suelo, respectivamente, para la profundidad de crecimiento radical estimada en ese momento. En este caso la HD estimada fue menor que la HD observada debido a que el modelo no considera condiciones de saturación del suelo, cuantificando la humedad hasta condiciones de CC, y en tales situaciones se subestima la HD.

Para 1986 durante el inicio del temporal ocurrieron lluvias, pero no con la suficiente cantidad y frecuencia para que la HD observada llegara a saturación (Figura 1b), con lo que la HD fue modelada con valores cercanos a la HD observada. Al inicio del mes de septiembre ocurrió una lluvia con la suficiente cantidad para saturar el suelo, con lo que los muestreos posteriores de HD observada registraron valores mayores que HD estimada.

En el temporal de 1987, la HD observada presentó valores muy similares a la HD estimada, como se señala en la Figura 1c. Esto se puede atribuir a que no ocurrió una lluvia con la cantidad suficiente para saturar el suelo como sucedió en los años anteriores, con lo cual el modelo tuvo mejor ajuste.

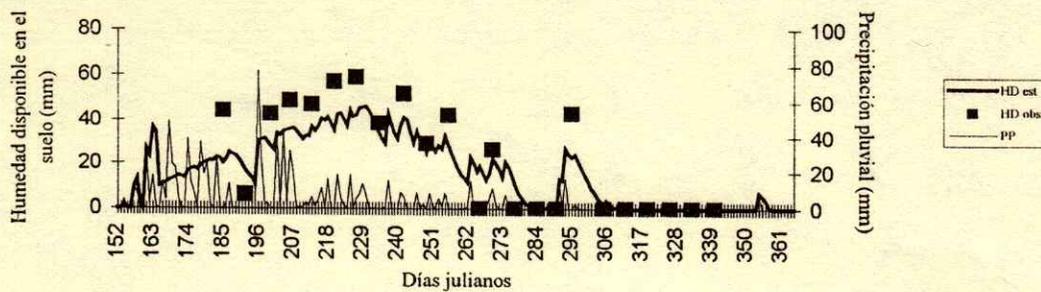
Con respecto al año 1988, se registraron lluvias muy intensas, sin embargo, en la Figura 1d no se muestran condiciones de saturación, es decir, valores cercanos a 73.7 mm. Esto puede explicarse debido a que la lluvia ocurrió al inicio del temporal cuando el suelo tiene capacidad de almacenar la mayor cantidad de agua.

La deficiencia más sobresaliente del modelo se observó cuando la HD fue superior a la CC o cercana a la saturación del suelo. La solución posible a este problema es considerar la adición al modelo de una cuantificación del movimiento del agua por ascenso capilar o descenso por gravedad, como lo señala Driessen (1986). Sin embargo, esto implica el uso de información adicional como conductividad hidráulica a saturación, intensidad de la lluvia, sorbilidad del suelo, permeabilidad del suelo, porosidad,

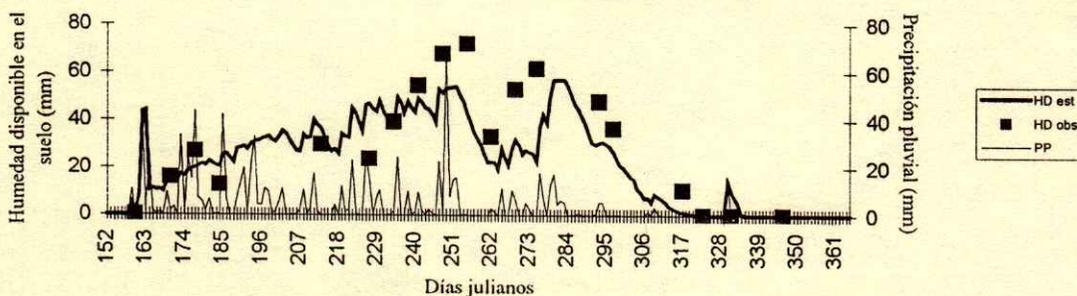
Cuadro 2. Algunas características fenológicas y morfológicas del maíz HV-313 obtenidas durante 1985 a 1988 en el Campo Experimental Altos de Jalisco, Tepatitlán, Jal.

VARIABLES DEL CULTIVO	1985	1986	1987	1988
Profundidad de siembra (cm)	9	9	9	9
Fecha de siembra (día/mes)	13 junio	12 junio	9 junio	23 junio
Ciclo del cultivo (días)	167	158	154	151
Índice de área foliar promedio	5	5	5	5
Máxima profundidad de enraizamiento (cm)	60	45	45	45

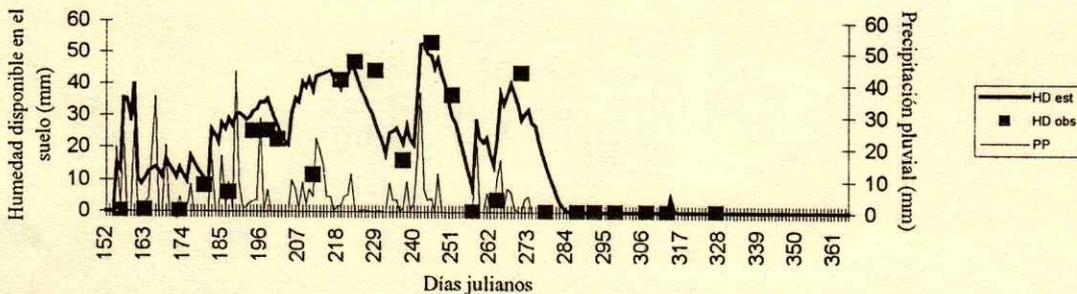
a) 1985



b) 1986



c) 1987



d) 1988

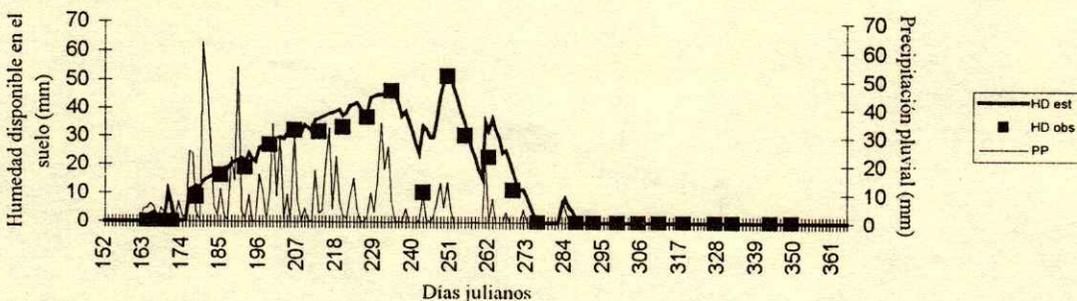
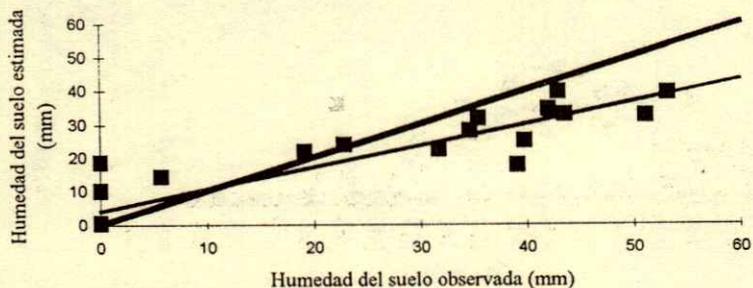
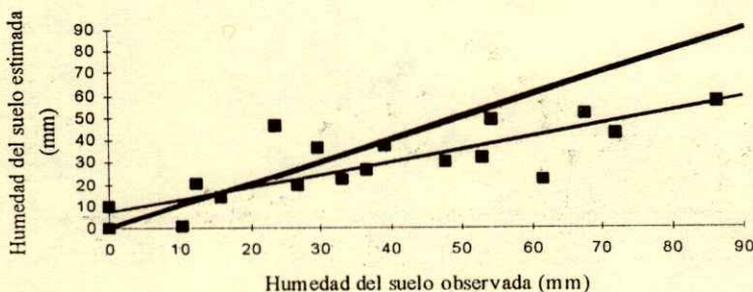


Figura 1. Precipitación pluvial, humedad disponible residual observada y estimada en a) 1985, b) 1986, c) 1987 y d) 1988, para maíz de temporal en Tepatitlán, Jal.

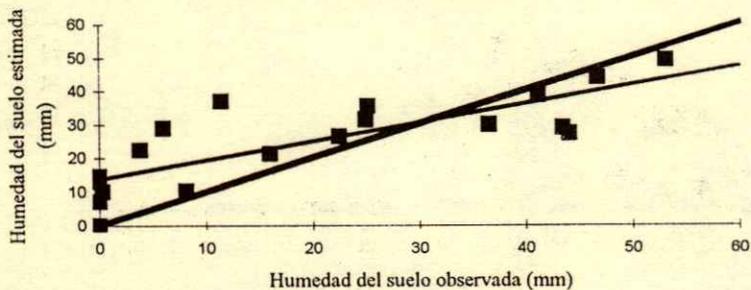
a) 1985



b) 1986



c) 1987



d) 1988

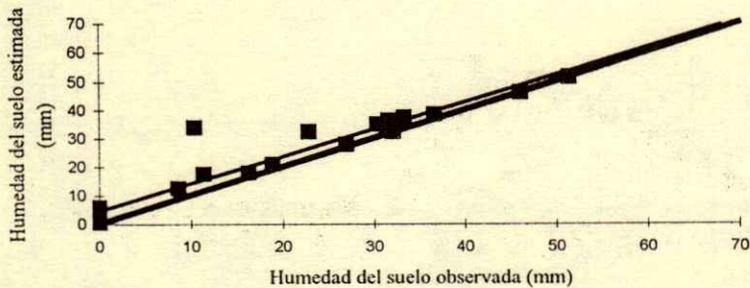


Figura 2. Comparación de datos de humedad disponible estimados y observados en los años de 1985 a 1988, en Tepatitlán, Jal.

Cuadro 3. Humedad disponible (HD) residual promedio observada y estimada en el periodo de 1985 a 1988, valor de "t" en la comparación de medias de HD observada y estimada y el coeficiente de determinación (R^2).

Año	HD estimada	HD observada	"t"	R^2
1985	14.16	20.01	0.58 NS	0.838
1986	25.92	33.45	1.05 NS	0.699
1987	24.36	19.20	-1.01 NS	0.654
1988	22.51	18.89	-0.69 NS	0.903

NS = Diferencia no significativa.

entre otros parámetros, con resultados probablemente más aceptables pero que pueden originar un modelo más complicado, como lo muestra el trabajo de Sánchez (1990).

El Cuadro 3 presenta la HD observada y estimada promedio para cada año en estudio. La comparación de las medias de HD observada contra estimada con la prueba de "t", indicó diferencias no significativas entre ellas.

Con respecto a la relación entre datos estimados y observados, se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) entre 0.654 y 0.903, que por las condiciones de temporal en que se desarrolló el trabajo pueden considerarse aceptables. En modelos muy similares al presente se han reportado valores de R^2 que se ubican dentro de este rango, como los encontrados por Palacios (1980), quien obtuvo una R^2 de 0.86, a su vez Escoboza y Escoboza (1990) en riego tuvieron una R^2 de 0.92 y Steiner *et al.* (1990) en temporal obtuvieron una R^2 de 0.63.

En las Figuras 2a, 2b, 2c y 2d se presenta una comparación de valores de HD estimada contra HD observada correspondientes a 1985, 1986, 1987 y 1988, respectivamente. Para cada año en estudio se calculó una recta de regresión entre los datos de HD, que idealmente debería tener pendiente igual a la unidad e intercepto con valor de cero.

La intersección entre la recta ideal y la recta de regresión define el punto donde sobre y bajo el cual se sobrestima o subestima la HD estimada. Para 1985, este punto se da a 11.5 mm, en 1986 a 16 mm, en 1987 a 31 mm y en 1988 se mantiene arriba de la recta ideal. El punto de sobrestimación no es constante, sino que varió en cada año y se puede atribuir a la cantidad y distribución de la lluvia de cada año en particular y el contenido de humedad antecedente del suelo. El mejor ajuste del modelo se tuvo cuando la lluvia se distribuyó de manera uniforme como en 1988 (Figura 2d), donde HD tuvo la recta más cercana al ideal y con el valor de R^2 más alto.

En general el modelo puede considerarse adecuado para evaluar HD en la zona radical del maíz, por la simplicidad de las funciones utilizadas y la información de fácil consecución requerida. Por otro lado, este tipo de modelos puede resultar más fácil usarlo en conjunto con un sistema de información geográfica, para monitorear la condición de humedad en grandes áreas.

En el futuro debe considerarse la obtención de información edáfica, como conductividad hidráulica, sorbilidad del suelo, tipos texturales, entre otras características, que permitan generar funciones para evaluar los movimientos ascensionales del agua en el suelo a causa de la capilaridad, o los descensos de humedad por efecto de la gravedad, que fueron los factores más limitativos en la precisión del modelo.

CONCLUSIONES

El modelo utilizado para estimar la humedad disponible en la zona radical de un cultivo es adecuado para condiciones de buena distribución de lluvia o localidades donde no ocurran eventos que sobrepasen la capacidad de almacenamiento del suelo, además de la simplicidad y requerimientos de información de fácil consecución.

Cuando se tienen condiciones superiores a la capacidad de campo o cercanas a saturación se sobrestima la humedad disponible en el suelo, a la vez que en condiciones de poca lluvia se subestima ligeramente la humedad disponible en el suelo.

La sobrestimación o subestimación de la humedad disponible en el suelo es causada porque no se involucran en el modelo las aportaciones de agua por ascensos capilares o descensos gravitacionales de agua.

LITERATURA CITADA

- Baier, W. y G.W. Robertson. 1966. A new versatile soil moisture budget. *Can. J. Plant Sci.* 46: 299-315.
- Brakensiek, D.L. y W.L. Rawls. 1988. Effects of agricultural and rangeland systems on infiltration. *In: Modeling agricultural, forest and rangeland hydrology.* ASAE Publication 07-88. St. Joseph, Michigan, USA.
- Brooks, K.N., P.F. Ffolliott, H.M. Gregersen y J.L. Thames. 1991. *Hydrology and the management of watersheds.* Iowa State University Press. Ames, Iowa, EUA.
- Cano G., M.A., R. Acosta H. y L. Rendón P. 1991. Caracterización hidrodinámica de un suelo *in situ* y cálculo de percolación y evapotranspiración en riego por goteo. *Agrociencia Serie agua-suelo-clima* 2(2): 63-80.

- Cumpa R., J.S., E. Palacios V. y A. Exebio G. 1988. Efecto del déficit de humedad y características físicas del suelo en el desarrollo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agrociencia* 73: 195-215.
- Chang, J.H. 1968. *Climate and agriculture. An ecological survey.* Aldine Publishing Company. Chicago, USA.
- Denmead, O.T. y R.H. Shaw. 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.* 54: 385-390.
- Doorenbos, J. y A.H. Kassam. 1986. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO. Riego y Drenaje No. 33. Roma, Italia.
- Drissen, P.M. 1986. The water balance of the soil. In: H. van Keulen y J. Wolf (eds). *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Simulation Monographs.* Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Escoboza G., M.I. y L.F. Escoboza G. 1990. Metodología para estimar el cuando y cuanto regar basada en datos agrometeorológicos. *Ciencias Agropecuarias* 1(2): 23-28.
- Ffolliott, P.F. y D.P. Guertin. 1988. Yield. II. An interactive computer model to simulate water yield from southwestern ecosystems. In: *Modeling agricultural, forest and rangeland hydrology.* ASAE Publication 07-88. St. Joseph, Michigan, USA.
- García B., J. 1979. Estructura metodológica para la caracterización agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y su posterior zonificación. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- González V., M.A. y E. Palacios V. 1981. Sistema computacional para predicción de riegos en distritos de riego. *Agrociencia* 44: 111-124.
- Huggins, L.F. y E.J. Monke. 1968. A mathematical model for simulating the hydrologic response of a watershed. *Water Resour. Res.* 4: 529-539.
- Jasso I., R. 1988. Simulación del balance hídrico de humedad del suelo en algodónero en la Comarca Lagunera. Informe de investigación CENID-RASPA. Vol. 2: 211-226.
- Jensen, M.E., J.L. Wright y B.J. Pratt. 1971. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Trans. of the ASAE* 14(5): 954-959.
- Linacre, E.T. 1977. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agric. Meteorol.* 18: 409-242.
- Lira S., R.H. 1986. Desarrollo de la investigación sobre evapotranspiración. In: R.H. Lira S. y L.F. Flores L. (eds). *Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias - Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste - PRONAPA.* Gómez Palacio, Dgo.
- Mack, A.R. y W.S. Ferguson. 1968. A moisture stress index for wheat by means of a modulated soil moisture budget. *Can. J. Plant Sci.* 48: 535-543.
- Marinato M., R. y E. Palacios V. 1979. Relaciones entre potencial del suelo y de la hoja y su efecto en la evapotranspiración del cultivo de trigo. *Agrociencia* 38: 53-63.
- Mojarro D., F. y E. Palacios V. 1979. Ajuste de las funciones de Jensen-Haise, Horton y Norero para la estimación de la evapotranspiración. *Agrociencia* 38: 77-87.
- Mojarro D., F. 1990. Evapotranspiración y requerimientos hídricos por los cultivos. In: L.F. Flores L., A. Lagarda M., C. Godoy A., R. Jasso I. e I. Sánchez C. (eds). *Metodología de investigación y diagnóstico en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.* CENID-RASPA. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias - Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Gómez Palacio, Dgo.
- Norero Sch., A. 1976. Evaporación y transpiración. Serie suelos y clima No. SC-13. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Ortiz S., C.A. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa. Con aplicaciones en la república mexicana. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Pacheco B., L. 1981. Precipitación efectiva. Boletín técnico No. 2. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Palacios V., E. 1980. Estimación de los requerimientos de agua de los cultivos para conocer el cuando y cuanto regar. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Pimentel L., J., O.L. Palacios V., B. Cuevas R. y L. Rendón P. 1989. Modelo matemático para simular el escurrimiento en una red de cauces. *Agrociencia* 78: 195-214.
- Radcliffe, D., T. Hayden, K. Watson, P. Crowley y R.E. Phillips. 1980. Simulation of soil water within the root zone of a corn crop. *Agron. J.* 72: 19-24.
- Radulovich, R. 1987. AQUA, A model to evaluate water deficits and excesses in tropical cropping. Part I. Basic assumptions and yield. *Agric. Meteorol.* 40: 305-321.
- Rawls, W.L. y D.L. Brakensiek. 1988. An infiltration model for evaluation of agricultural and range management systems. In: *Modeling agricultural, forest and rangeland hydrology.* ASAE Publication 07-88. St. Joseph, Michigan, USA.
- Reddy, S.J. 1983. A simple method of estimating the soil water balance. *Agric. Meteorol.* 28: 1-17.
- Rivas T., D., M. Martínez M., E. García M. y F. González C. 1990. Infiltración en tres complejos naturales suelo-vegetación de la cuenca del río Texcoco. *Agrociencia Serie agua-suelo-clima* 1(1): 201-218.
- Rosenberg, N.J. 1983. *Microclimate. The biological environment.* 2a ed. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Sánchez C., I. 1990. Obras de captación de agua de lluvia. In: Flores L. L.F., A. Lagarda M., C. Godoy A., R. Jasso I. e I. Sánchez C. (eds). *Metodología de investigación y diagnóstico en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera* CENID-RASPA. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias - Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Gómez Palacio, Durango.
- Shaw, R.H. 1977. Water use and requirements of maize. A review. In: *Agrometeorology of the maize (corn) crop.* WMO 481: 119-134.
- Smith, R.C.G., J.L. Sdteiner, W.S. Meyer y D. Erskine. 1985. Influence of season to season variability in weather on irrigation scheduling of wheat: A simulation study. *Irrig. Sci.* 6: 241-251.
- Steiner, J.L., J.R. Williams y O.R. Jones. 1990. Evaluation of EPIC using a dryland wheat-sorghum-fallow crop rotation. In: *EPIC: Erosion/Productivity Impact Calculator. I. Model documentation.* USDA-ARS. Techn. Bull. No. 1768.
- Tijerina Ch., L. 1986. Determinación de la evapotranspiración de cultivos anuales en el Valle de México. In: R.H. Lira S. y L.F. Flores L. (eds). *Lisimetría. Estudios de evapotranspiración.* Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias - Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste - PRONAPA. Gómez Palacio, Dgo.

Ward, A.D., C.A. Alexander, N.R. Fausey y J.R. Dorsey. 1988. The ADAPT agricultural drainage and pesticide transport model. *In*: Modeling agricultural, forest and rangeland hydrology. ASAE Publication 07-88. St. Joseph, Michigan, USA.

Williams. J.R., C.A. Jones y P.T. Dyke. 1990. The EPIC model. *In*: EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. I. Model documentation. USDA-ARS. Techn. Bull. No. 1768.

COBERTURA VEGETATIVA Y FERTILIZACION NITROGENADA EN LA PRODUCCION DE MAIZ

Vegetative Cover and Nitrogen Fertilization in Corn Production

Pedro Betancourt Yanez¹, Jesús González Ríos², Benjamín Figueroa Sandoval²,
Félix González Cossio³

RESUMEN

La creciente demanda de alimentos para satisfacer los requerimientos de la población y la necesidad de conservar los recursos naturales, ha conducido a muchos investigadores a evaluar e implementar prácticas para aumentar la productividad de los suelos agrícolas. En este sentido la presente investigación se realizó con la finalidad de evaluar el comportamiento del maíz (*Zea mays*) sembrado sobre una pradera establecida de pasto rhodes (*Chloris gayana* cv Bell) y la respuesta a la fertilización nitrogenada de los cultivos asociados. Se utilizó un diseño de bloques al azar y los tratamientos fueron evaluados mediante un factorial 4x4x3 correspondiente a cuatro diámetros de siembra, cuatro dosis de nitrógeno y tres arreglos topológicos de maíz. Se evaluaron las variables altura de plantas, diámetro de tallo, área foliar y materia seca del maíz y rendimiento en materia seca del pasto, en dos fechas de evaluación. Los resultados obtenidos indican que la siembra directa de maíz sobre el pasto no es una práctica adecuada, pero produce buenos resultados cuando el maíz se siembra a 20 ó 30 cm distante del pasto. Por otra parte los desarrollos vegetativos del maíz y del pasto presentaron una respuesta positiva a la aplicación de las diferentes dosis de nitrógeno, obteniéndose los mejores resultados con 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno, y los arreglos topológicos sólo afectaron (P>0.05) al diámetro de tallo del maíz.

Palabras clave: Cultivos asociados, arreglos topológicos, pasto rhodes.

¹ Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Fonaiap-Lara Barquisimeto, 592 Venezuela.

² Programa de Edafología, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Méx.

³ Instituto de Socioeconomía Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Méx.

Aceptado: Agosto de 1998.

SUMMARY

The increasing demand of feed to satisfy the population requirement and the need to preserve natural resources has led to evaluate and implement practices to increase agricultural soil productivity. The present research was carried out to evaluate the performance of corn (*Zea mays*) seeded on a established rhodes grass pasture (*Chloris gayana* cv Bell) and the response to nitrogen fertilization of both species. A random block design was used. Treatments were evaluated by a 4x4x3 factorial corresponding to four planting diameters, four nitrogen doses and three topological arrangements of corn. Plant height, stem diameter, leaf area and dry matter of corn and dry matter yield of pasture were evaluated in two dates. The results obtained showed that direct planting of corn on pasture was not an adequate practice, while good results occur when corn is planted 20 to 30 cm apart from pasture. On the other hand, vegetative development of corn and pasture presented a positive response to different nitrogen rates. Best result were observed with 100 kg ha⁻¹ of nitrogen. The topological arrangement affected significantly (P>0.05) only corn stem diameter.

Index words: Associated cultivars, topological arrangement, rhodes grass.

INTRODUCCION

En México la mayor parte de la superficie es de relieve accidentado y sus terrenos planos sólo alcanzan 12 % de la superficie total (Alcalá, 1996); esto junto a la creciente necesidad de satisfacer las demandas de una población con alto índice de crecimiento, ha conducido a la degradación de los recursos naturales, debido al uso de tecnologías inadecuadas. Los estudios experimentales demuestran que los suelos están más expuestos a los agentes degradantes cuando los

campos están sin vegetación y que los suelos más afectados son los deficientes en materia orgánica. Una alternativa, entonces, es recurrir a una cobertura permanente del suelo preferentemente de pastos, lo que aumentará el contenido de materia orgánica del suelo y mejorará la fertilidad natural para el aprovechamiento por el cultivo.

Producir y proteger al suelo simultáneamente se puede lograr con la siembra asociada de cultivos básicos y pastos forrajeros, lo que además permite al productor obtener dos cosechas simultáneas, una del cultivo y otra del forraje (González, 1984).

Se hace necesario entonces, estudiar el comportamiento del cultivo del maíz sembrado sobre una pradera establecida de pasto rhodes (*Chloris gayana* cv Bell) que permita generar información sobre la factibilidad de manejar diferentes prácticas agrícolas y pecuarias en la misma área para aumentar la productividad del recurso suelo en terrenos de laderas.

MATERIALES Y METODOS

Este estudio se realizó durante el año 1996 en una pradera de pasto rhodes (*Chloris gayana* cv Bell) establecida en 1992 en las áreas temporales del ejido de San Jerónimo ubicado a 29 km al noreste de Chapingo, Estado de México, cuyas latitud, longitud y altitud son 19° 29' norte, 98° 45' oeste y 2250 m, respectivamente. Los suelos son poco profundos, pedregosos, de origen volcánico con pobre infiltración y baja capacidad para retener humedad (González, 1994) con pendientes del terreno que oscilan entre 4 y 11 %.

Tamaño de Parcelas y Diseño Experimental

Se delimitaron parcelas rectangulares de 4x3.5 m, donde se sembró el maíz criollo sobre la superficie cubierta de pasto, para lo cual se preparó el terreno en cada punto de siembra en círculos con diámetros de 0 (DS0), 20 (DS20), 40 (DS40) y 60 cm (DS60) que se identificaron como la variable diámetros de siembra, dejando una franja constante de 40 cm de pasto entre círculo. Para la preparación del terreno en cada punto de siembra se eliminó el pasto según el diámetro del círculo y se roturó hasta una profundidad de 20 cm de forma manual. La siembra se realizó el 13 de junio y se manejaron diferentes arreglos topológicos de plantas dentro de cada círculo de siembra, y el número de

plantas por mata fueron diferentes de acuerdo con el diámetro de siembra o círculo de terreno preparado, así para siembra directa (DS0), DS20, DS40 y DS60 el arreglo topológico uno correspondió a una planta por mata, el arreglo topológico dos para DS0 y DS20 fue de dos plantas por mata, mientras que para DS40 y DS60 dicho arreglo consistió de tres y cuatro plantas por mata, respectivamente. El arreglo topológico tres fue de tres plantas por mata para DS0, de dos plantas por mata para DS20; y de tres y cuatro plantas por mata para DS40 y DS60, respectivamente. Se utilizaron además cuatro niveles de nitrógeno 0, 60, 80 y 100 kg ha⁻¹ usando como fuente el nitrato de amonio en dos aplicaciones a los 15 y 45 días después de la siembra. Las densidades de siembra del maíz dependieron del diámetro de siembra (DS) y del arreglo topológico, para DS0 los valores fueron de 18 000 (arreglo uno) y 54 000 (arreglo tres), para DS20 18 000 y 34 000, para DS40 11 500 y 34 200, para DS60 8500 y 34 000 plantas ha⁻¹ correspondiente a los arreglos topológicos uno y tres, respectivamente. Los 48 tratamientos evaluados (Cuadro 1) resultaron del arreglo factorial 4x4x3. Se empleó un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones. El análisis estadístico se realizó con el programa Statistical Analysis System (SAS) utilizando la prueba de Tukey para la comparación de medias. Los factores y niveles bajo estudio fueron los siguientes:

Factor 1: Diámetro de siembra (DS): cuatro niveles.

DS0 = Siembra directa

DS20 = 20 cm de terreno preparado

DS40 = 40 cm de terreno preparado

DS60 = 60 cm de terreno preparado

Factor 2: Dosis de fertilización nitrogenada (NI): cuatro niveles.

N0 = 0 kg ha⁻¹

N1 = 60 kg ha⁻¹

N2 = 80 kg ha⁻¹

N3 = 100 kg ha⁻¹

Factor 3: Arreglos topológicos (MA): tres niveles.

MA1 = arreglo 1

MA2 = arreglo 2

MA3 = arreglo 3

Variables Observadas

Con la finalidad de determinar la dinámica de crecimiento del maíz y del pasto rhodes se midieron

Cuadro 1. Tratamientos resultantes de la combinación de los diferentes niveles de los factores diámetro de siembra (DS), dosis de fertilización (NI) y arreglos topológicos (MA).

Tratamiento	DS	NI	BI	BII	BIII
1	0	0	1*	1	1
2	0	0	2	2*	2
3	0	0	3	3	3*
4	0	60	1	1	1
5	0	60	2	2	2
6	0	60	3	3	3
7	0	80	1	1	1
8	0	80	2	2	2
9	0	80	3	3	3
10	0	100	1	1	1
11	0	100	2	2	2
12	0	100	3	3	3
13	20	0	1	1	1
14	20	0	2	2	2
15	20	0	2	2	2
16	20	60	1	1	1
17	20	60	2	2	2
18	20	60	2	2	2
19	20	80	1	1	1
20	20	80	2	2	2
21	20	80	2	2	2
22	20	100	1	1	1
23	20	100	2	2	2
24	20	100	2	2	2
25	40	0	1	1	1
26	40	0	3	3	3
27	40	0	3	3	3
28	40	60	1	1	1
29	40	60	3	3	3
30	40	60	3	3	3
31	40	80	1	1	1
32	40	80	3	3	3
33	40	80	3	3	3
34	40	100	1	1	1
35	40	100	3	3	3
36	40	100	3	3	3
37	60	0	1	1	1
38	60	0	4	4	4
39	60	0	4	4	4
40	60	60	1	1	1
41	60	60	4	4	4
42	60	60	4	4	4
43	60	80	1	1	1
44	60	80	4	4	4
45	60	80	4	4	4
46	60	100	1	1	1
47	60	100	4	4	4
48	60	100	4	4	4

* Número de plantas por mata (MA).

una serie de variables correspondientes al crecimiento vegetativo durante el ciclo del cultivo.

Altura de planta. Se midió la altura desde la superficie del suelo hasta la última hoja expuesta del

maíz. La primera evaluación se realizó a los 60 y la segunda a los 90 días después de la siembra. En cada parcela se realizaron diferentes números de mediciones, siendo seis, cinco, siete y nueve para DS0, DS20, DS40 y DS60, respectivamente, en cada fecha de evaluación.

Diámetro del tallo. El diámetro de tallo se midió en el primer entrenudo tomado desde la base y la información se recopiló en forma simultánea con la de la altura de plantas.

Area foliar. Se midió el ancho máximo y la longitud de una hoja por planta y se multiplicó por el total de hojas de la planta promediando según el número de plantas por mata, usando la ecuación de Montgomery (1971).

Materia seca de maíz. Después de hacer las diferentes mediciones a cada planta, éstas fueron cortadas al ras del suelo y llevadas al laboratorio. A cada planta se le hizo un pre-secado exponiéndolas al sol durante varios días y luego se pasaron a una estufa a 50 °C hasta obtener peso constante.

Materia seca del pasto. En cada punto de siembra se cosechó todo el pasto cortándolo al ras del suelo dentro de cada diámetro de siembra, para siembra directa y para siembra con diámetro de 20 cm se cosechó el pasto usando un marco cuadrado de metal de 35x35 cm. Las muestras se pre-secaron al sol y luego se pasaron a una estufa a 50 °C hasta peso constante.

RESULTADOS Y DISCUSION

Altura de Plantas de Maíz

En la primera evaluación el maíz presentó una diferencia de 7.58 cm en la altura a favor del diámetro de siembra de 40 cm, comparada con el diámetro de siembra de 20 cm, que fue el que presentó los valores más bajos, siendo los valores obtenidos de altura de plantas de maíz superiores con diámetro de siembra de 40 cm respecto a los demás diámetros (Cuadro 2). El maíz mostró una respuesta a la aplicación de nitrógeno hasta 80 kg ha⁻¹ y se presentó una diferencia marcada entre la dosis de 80 kg ha⁻¹ y la no aplicación, que estuvo por el orden de 13.3 cm (Cuadro 3). Estos resultados coinciden en términos generales con lo reportado por López y Cabral (1991) quienes encontraron diferencias de altura de plantas de maíz cuando utilizaron diferentes dosis de nitrógeno, siendo la dosis de mayores resultados 60 kg ha⁻¹. En esta

Cuadro 2. Valores promedio de las variables en estudio con los diferentes diámetros de siembra en la primera fecha de evaluación.

Diámetro de siembra	Diámetro de tallo	Altura de plantas	Area foliar	Materia seca de maíz	Materia seca de pasto
cm	cm	cm	cm ²	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹
60	1.8639 a	16.194 b	914.9 a	0.1686 b	0.873 c
40	1.8361 a	19.167 a	876.6 a	0.3625 a	1.606 b
20	1.4639 b	11.583 c	468.6 b	0.1525 b	1.504 b
0	1.4889 b	12.694 c	492.1 b	0.1881 b	2.384 a

Valores con la misma letra son estadísticamente iguales ($P > 0.05$).

fecha de evaluación no se presentó efecto significativo de los diferentes arreglos topológicos (Cuadro 4).

En la segunda evaluación se presentó una diferencia de altura de 22.4 y 20.4 cm en favor de los diámetros de siembra de 60 y 40 cm, respectivamente, comparado con el sistema de siembra directa o diámetro de siembra 0 cm (Cuadro 5). En términos generales los resultados de altura de plantas con diámetro de siembra de 60 y 40 cm duplicaron los observados para diámetros de 0 y 20 cm. El desarrollo vegetativo del maíz respondió positivamente a los niveles de nitrógeno aplicado, siendo 100 kg ha⁻¹ la dosis que produjo los mejores resultados, al presentar un incremento de 28.5 cm respecto a la no aplicación de nitrógeno (Cuadro 6). Tampoco se presentó efecto de los arreglos topológicos (Cuadro 7).

Diámetro de Tallo de Maíz

En la primera evaluación el diámetro de los tallos presentó incrementos de 20 y 21.5 % a favor del diámetro de siembra de 60 cm comparado con siembra directa y diámetro de siembra de 20 cm. A su vez los valores observados usando diámetro de siembra de 60 cm fueron estadísticamente iguales a los obtenidos con diámetro de 40 cm y diferente a los correspondientes a diámetro de 20 y 0 cm (Cuadro 2). Se registró también un incremento de acuerdo con los niveles de nitrógeno aplicado, así tenemos una diferencia de 0.9 cm que refleja la superioridad de la

dosis de 100 kg ha⁻¹ respecto a la no aplicación de nitrógeno, siendo los valores obtenidos con 100 y 80 kg ha⁻¹ estadísticamente iguales pero diferentes a los valores correspondientes a las dosis de 60 y 0 kg ha⁻¹ (Cuadro 3). Para esta variable se registró un incremento de acuerdo con los diferentes arreglos topológicos, siendo el arreglo uno (una planta por mata) el de mejor resultados al superar por 0.14 y 0.22 cm a los arreglos dos y tres, respectivamente (Cuadro 4).

En la segunda fecha de evaluación los diámetros de siembra 60 y 40 cm, las dosis de 80 y 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno y el arreglo topológico uno (una planta por mata) presentaron los mejores resultados.

Area Foliar del Maíz

En la primera evaluación el efecto significativo de la variable diámetro de siembra, se reflejó en un aumento de 422.8 y 462 cm² en los valores encontrados para diámetro de siembra de 60 cm, comparado con diámetro de siembra de 20 cm y siembra directa, respectivamente. También los valores de área foliar presentaron un incremento de 408.0 y 384.5 cm² para diámetro de siembra de 40 cm comparado con diámetro 20 y 0 cm, respectivamente (Cuadro 2). El área foliar presentó una tendencia al incremento con las dosis de nitrógeno aplicada siendo 100 kg ha⁻¹ la que produjo los mejores resultados, además esta dosis fue estadísticamente igual a 80 y

Cuadro 3. Valores promedio de las variables en estudio con las diferentes dosis de nitrógeno en la primera fecha de evaluación.

Dosis de nitrógeno	Diámetro de tallo	Altura de plantas	Area foliar	Materia seca de maíz	Materia seca de pasto
kg ha ⁻¹	cm	cm	cm ²	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹
100	1.9722 a	17.611 ab	934.0 a	0.3083 a	2.442 a
80	1.8500 ab	20.028 a	890.8 a	0.2869 a	1.895 b
60	1.7639 b	15.278 b	742.1 a	0.2283 a	1.596 b
0	1.0667 c	6.772 c	185.3 b	0.0481 b	0.434 c

Valores con la misma letra son estadísticamente iguales ($P > 0.05$).

Cuadro 4. Valores promedio de las variables en estudio con los diferentes arreglos topológicos en la primera fecha de evaluación.

Arreglo topológico	Diámetro de tallo cm	Altura de plantas	Area foliar cm ²	Materia seca de maíz t ha ⁻¹	Materia seca de pasto
1	1.7833 a	15.313 a	765.60 a	0.2662 a	1.669 a
2	1.6417 b	15.000 a	660.77 a	0.2048 ab	1.673 a
3	1.5641 b	14.417 a	637.79 a	0.1827 b	1.433 a

Valores con la misma letra son estadísticamente iguales ($P > 0.05$).

60 kg ha⁻¹ (Cuadro 3). No se presentó efecto sobre el área foliar por el número de plantas por mata (Cuadro 4).

Para la segunda fecha de evaluación el área foliar promedio presentó una diferencia de 578.75 cm² a favor del diámetro de siembra de 60 cm respecto a la siembra directa (Cuadro 5). La aplicación de las diferentes dosis de nitrógeno produjo incrementos en los valores de área foliar, presentando incrementos de 517.2, 399.2 y 338.1 cm² a favor de 100, 80 y 60 kg ha⁻¹, respectivamente, cuando se compara con la no aplicación de nitrógeno (Cuadro 6). Estos resultados son contrastantes con lo reportado por González (1984), quien indica que el área foliar de maíz sembrado sobre pasto rhodes fue similar en los testigos (sin fertilizar) y en las dosis más altas de fertilización (80, 100 y 120 kg ha⁻¹ de nitrógeno). Para esta evaluación el área foliar no fue afectada por el número de plantas por mata (Cuadro 7).

Materia Seca de Maíz

En la primera evaluación el rendimiento de maíz en materia seca estuvo afectada por los diferentes diámetros de siembra, obteniéndose los mejores resultados con diámetro de siembra de 40 cm, con un incremento de 0.174 t ha⁻¹ respecto a la siembra directa (Cuadro 2). El rendimiento en materia seca mostró una respuesta positiva a las diferentes dosis de nitrógeno. Los valores obtenidos con dosis de 100, 80, 60 y 0 kg ha⁻¹ se muestran en el Cuadro 3, observándose que los

rendimientos de materia seca se incrementaron con cada incremento de nitrógeno aplicado, resultando una diferencia de 0.26 t ha⁻¹ a favor de la dosis de 100 kg ha⁻¹ comparado con el tratamiento sin fertilizante (Cuadro 3). Romero (1991) indica que el maíz mostró una respuesta positiva en el incremento de su rendimiento por unidad de superficie en función de la aplicación de fertilizante, siendo las mejores dosis 60 y 90 kg ha⁻¹ de nitrógeno. La competencia entre plantas de maíz produjo efectos significativos en esta variable, lo cual se refleja en la diferencia de 0.08 t ha⁻¹ a favor del arreglo uno comparado con el arreglo topológico tres (Cuadro 4). Esto contradice a Ramírez (1985) quien indica que existe una mayor producción de materia seca en el maíz cuando la densidad de población es alta, debido a mayor área foliar expuesta que capta más energía solar.

Para la segunda evaluación el maíz presentó los más altos valores de materia seca cuando utilizamos el diámetro de siembra de 40 cm mostrando un incremento de 63 % con respecto a siembra directa (Cuadro 5). Los rendimientos en materia seca cuando utilizamos una dosis de 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno presentó un incremento a su favor de 0.1086, 0.2066 y 0.5072 t ha⁻¹ respecto a dosis de 80, 60 kg ha⁻¹ y a la no aplicación de nitrógeno, respectivamente (Cuadro 6). González (1984) reporta que la aplicación de fertilizante incrementó la producción de materia seca de maíz en 50 % cuando comparó la no aplicación de nitrógeno con una dosis de 150 kg ha⁻¹. Los arreglos topológicos no afectaron los contenidos de materia

Cuadro 5. Valores promedio de las variables en estudio con los diferentes diámetros de siembra en la segunda fecha de evaluación.

Diámetro de siembra cm	Diámetro de tallo cm	Altura de plantas	Area foliar cm ²	Materia seca de maíz t ha ⁻¹	Materia seca de pasto
60	1.8556 a	39.500 a	874.97 a	0.3417 b	2.065 b
40	1.8139 a	37.556 a	551.79 b	0.6264 a	3.067 a
20	1.5194 b	21.583 b	374.73 c	0.3183 bc	2.738 a
0	1.3750 c	17.139 b	296.22 c	0.2300 c	2.839 a

Valores con la misma letra son estadísticamente iguales ($P > 0.05$).

Cuadro 6. Valores promedio de las variables en estudio con las diferentes dosis de nitrógeno en la segunda fecha de evaluación.

Dosis de nitrógeno kg ha ⁻¹	Diámetro de tallo cm	Altura de plantas	Area foliar cm ²	Materia seca de maíz t ha ⁻¹	Materia seca de pasto
100	1.8361 ab	38.833 a	728.02 a	0.5847 a	3.835 a
80	1.8500 a	36.167 ab	609.96 ab	0.4761 b	3.429 a
60	1.7194 b	30.500 b	548.91 b	0.3781 c	2.651 b
0	1.1583 c	10.278 c	210.81 c	0.0775 d	0.794 c

Valores con la misma letra son estadísticamente iguales ($P > 0.05$).

seca de maíz en esta evaluación (Cuadro 7); Estos resultados coinciden con García y Castañeda (1985), quienes no encontraron diferencias entre los arreglos topológicos de dos y tres plantas por mata en el rendimiento de maíz, indicando que cuando se usan tres plantas por mata, la siembra es más rápida y económica.

Materia Seca del Pasto

El rendimiento del pasto rhodes asociado con el maíz presentó una diferencia de 1.5 t ha⁻¹ a favor de la siembra directa comparado con los resultados obtenidos con diámetro de siembra de 60 cm; también la siembra directa presentó valores superiores a diámetro de siembra de 20 y 40 cm (Cuadro 2). Los rendimientos en materia seca del pasto fueron afectados positivamente por el nitrógeno aplicado, de tal forma que se presentaron incrementos de 2.0, 0.85 y 0.55 t ha⁻¹ a favor de la dosis de 100 kg ha⁻¹ comparado con dosis de 0, 60 y 80 kg ha⁻¹ (Cuadro 3).

En la segunda evaluación los diámetros de siembra 0, 20 y 40 cm presentaron resultados muy similares, siendo superiores a los valores de materia seca obtenidos con diámetros de siembra de 60 cm (Cuadro 5). Los tratamientos con aplicación de nitrógeno fueron muy superiores comparados con la no aplicación, encontrándose respuesta hasta dosis de 80 kg ha⁻¹ (Cuadro 6). Para la materia seca de pasto el arreglo topológico no produjo efecto significativo en ninguna de las dos evaluaciones (Cuadros 4 y 7),

indicando que el número de plantas de maíz por mata en siembra asociada no afecta el rendimiento del pasto rhodes.

Para las variables observadas, la siembra de maíz en área de terreno preparado de 60 y 40 cm utilizando el arreglo topológico uno (una planta por mata), le permitió a la planta mayor posibilidad de desarrollo debido a que la competencia entre plantas no existe y la competencia con el pasto se hace presente después de cierto tiempo, permitiendo por lo menos lograr su desarrollo inicial. Cuando el pasto por su habito de crecimiento rastrero-estolonifero logra cubrir todo el diámetro de siembra, lo que ocurrió a los 90 días, el maíz ha tenido oportunidad de crecer en longitud y grosor, teniendo también mayor oportunidad de producir follaje. Por lo tanto a mayor diámetro de siembra con una alta dosis de nitrógeno, en este caso 80 kg ha⁻¹, se obtiene un maíz con mayor altura de plantas, diámetro de tallo y área foliar.

Para la materia seca de pasto, la mayor producción se obtuvo en los tratamientos de siembra directa del maíz y diámetro de siembra de 20 cm, con las mayores dosis de nitrógeno, siendo no significativo el número de plantas de maíz por mata. En siembra directa el pasto no se fue eliminando de los puntos de siembra, lo que le permitió crecer y ejercer mayor competencia sobre el cultivo. El corte del pasto para definir los diferentes diámetros de siembra estimuló el crecimiento del mismo y al tener un área hacia donde extender sus estolones produjo los resultados obtenidos.

Cuadro 7. Valores promedio de las variables en estudio con los diferentes arreglos topológicos en la segunda fecha de evaluación.

Arreglo topológico	Diámetro de tallo cm	Altura de plantas	Area foliar cm ²	Materia seca de maíz t ha ⁻¹	Materia seca de pasto
1	1.7335 a	27.792 a	534.14 a	0.4092 a	2.706 a
2	1.5750 b	29.562 a	498.33 a	0.3671 a	2.724 a
3	1.6104 b	29.479 a	540.81 a	0.3610 a	2.601 a

Valores con la misma letra son estadísticamente iguales ($P > 0.05$).

CONCLUSIONES

Las condiciones climáticas, específicamente las escasas precipitaciones ocurridas durante el ciclo del maíz limitaron su desarrollo, sin embargo, se pudo apreciar que el cultivo presentó una respuesta positiva a la aplicación de las diferentes dosis de fertilización nitrogenada.

El maíz sembrado directamente (sin separación entre el maíz y el pasto) sobre la pradera de pasto rhodes no logró su completo desarrollo, debido a que el vigor vegetativo del pasto no le permitió su crecimiento normal.

El cultivo del maíz sembrado en las diferentes combinaciones (diámetros de siembra*arreglos topológicos) presentó una respuesta positiva cuando los niveles de nitrógeno se incrementaron hasta una dosis de 80 kg ha⁻¹.

El mejor comportamiento observado para el maíz sembrado en asociación con el pasto se presentó en los diámetros de siembra de 40 y 60 cm en combinación con dosis altas de nitrógeno para los diferentes arreglos topológicos.

LITERATURA CITADA

Alcalá, M. 1996. Diagnóstico de la producción de sedimentos en tres usos del suelo, cuenca del río Los Sauces, Michoacán.

Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

García G., L. y A Castañeda P. 1985. Efectos de siete factores de producción en el rendimiento de grano y forraje (punta) en el cultivo de maíz. *Terra* 3: 103-110.

González, R., J. 1984. Introducción y evaluación de gramíneas y leguminosas establecidas en áreas degradadas para su uso en conservación de suelos y producción de forraje en sistemas asociados con maíz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

González, R.J.M. 1994. Promising characteristics to soil conservation and forage production from rhodesgrass sown on shallow and stony soil under rainfall conditions. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México, Vol. 7b, 269-270.

López, M. y F. Cabral. 1991. Fertilización nitrogenada y fosfatada en maíz (*Zea mays*) en zonas de escasas precipitación. pp. 275. *In: La investigación edafológica en México 1991-1992. Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.* Acapulco, México.

Montgomery, A.A. 1971. Correlation studies of corn. Nebraska, Agr. Exp. Sta. Ann. Report 24: 109-159.

Ramírez D., J.L. 1985. Análisis del crecimiento y componentes del rendimiento de los híbridos de maíz H-30 y H-31 y de sus progenitores. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

Romero H., G. 1991. Efectos de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de maíz de temporal en la región de Teziutla, Puebla. pp. 276. *In: La investigación edafológica en México 1991-1992. Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.* Acapulco, México.

RESPUESTA DEL MAIZ DE RIEGO A HUMEDAD DEL SUELO, NITROGENO Y DENSIDAD DE POBLACION EN CUAUHEMOC, CHIHUAHUA

Response of Irrigated Corn to Humidity in the Soil, Nitrogen, Plant Populations in Cuauhtemoc, Chihuahua

Jesús P. Amado Alvarez¹ y Pedro Ortíz Franco

RESUMEN

Los costos de producción de mayor consideración en maíz son: fertilizantes químicos (25 %), agua de riego (18 %), y control de plagas (13 %). Con base en la problemática se planteó el siguiente objetivo: generar información técnica para hacer óptimos los insumos agua, nitrógeno y densidad de plantas. El trabajo se desarrolló durante la primavera-verano de 1991, en suelo Planosol mólico (Wm), de textura franco-arenoso, pH muy fuertemente ácido, con baja fertilidad natural. El diseño experimental fue bloques completos al azar, cada tratamiento se repitió cuatro veces con arreglo de los tratamientos en parcelas divididas. La parcela principal fueron abatimientos de humedad en el suelo (30, 60 y 90 %), mientras que la sub-parcela menor incluyó niveles de nitrógeno y densidad de población. Las variables registradas fueron: índice de área foliar, rendimiento y daño por plagas. Los resultados obtenidos mostraron que los requerimientos hídricos máximos (E_{tmax}) del maíz fueron 68.3 cm. Se detectó efecto estadístico de la interacción en las variables: índice de área foliar y rendimiento de grano. La mejor opción en rendimiento fisiológico de grano (13.5 t ha⁻¹) se obtuvo con 60 % de abatimiento - 400 kg ha⁻¹ de nitrógeno - 101 300 plantas ha⁻¹. La mejor alternativa económica fue 30 % de abatimiento de humedad del suelo - 250 kg ha⁻¹ de nitrógeno - 89 000 plantas ha⁻¹, con rendimiento medio de 13.2 t ha⁻¹ y un beneficio neto de 5833.00 pesos ha⁻¹.

Palabras clave: Nutrición, evapotranspiración, rentabilidad.

INFAP-CESICH, Hidalgo 1213, 31500 Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

Aceptado: Septiembre de 1998.

SUMMARY

Mayor production costs of irrigated corn are the use of commercial fertilizer (25 %), irrigation water (18 %) and pest (insect) control (13 %). The objective was to determine the optimal use of water, nitrogen and plant population to obtain maximum yields. This research was conducted in 1991, on acidic sandy loam soil with low natural fertility. A complete randomized block design and divided plots were used. The principal plots were the depletion of humidity in the soil and the sub-plot was a combination of the nitrogen applied and the plant population; each treatment was replicated four times. To evaluate the treatments, data on the following were taken: foliage area index, yield and insect damage, which were later analyzed with the established design and the economic analysis. The results indicated that the highest moisture depletion was 68.3 cm. In the statistical analysis an interaction between the following variables was observed: foliage area index, and total yield from the physiological point of view with the best grain yield (13.5 t ha⁻¹), moisture depletion was 60 %, when the nitrogen application was 400 kg ha⁻¹, and the plant population was 101 300 plants ha⁻¹. The economic analysis indicates that the best alternative was 30 % soil humidity depletion when 250 kg ha⁻¹ of N was applied and the plant population was 89 000 plants ha⁻¹. This produced an average yield of 13.2 t ha⁻¹ and a net gain of 5833.00 pesos ha⁻¹.

Index words: Nutrition, evapotranspiration, profitability.

INTRODUCCION

En la sierra de Chihuahua, la superficie de maíz producido bajo condiciones de riego se ha incrementado considerablemente de 539 ha a 25 306 ha de 1983 a 1990, el rendimiento medio es de 5.7 t ha⁻¹ (SARH, 1991). Esta producción supera en 67 % la

media nacional (3.4 t ha^{-1}) de maíz de riego (Reyes *et al.*, 1990).

Los factores controlables que más influyen en la respuesta del maíz son: híbridos de importación, grandes aplicaciones de fertilizantes químicos y volúmenes excesivos de agua. Según la información a nivel local (FIRA, 1990), los insumos que más elevan los costos de producción de maíz de riego son: 1) uso de fertilizantes químicos (25 %), que se aplican en forma empírica de manera indiscriminada (hasta más de 1 t ha^{-1}); 2) costo del agua de riego (18 %), debido al empleo de grandes volúmenes donde la fuente de abastecimiento son pozos profundos con bombeo eléctrico sin contar con información sobre lámina, calendarios, trazos de riego; y 3) control de plagas (13 %).

Rhoades *et al.*, citados por Hernández (1976), hicieron notar que con una aplicación de 30 t ha^{-1} de materia orgánica más 30 kg ha^{-1} de nitrógeno, realizando a tiempo el riego de siembra, el rendimiento de maíz fue de 4.0 t ha^{-1} , sin embargo, con una aplicación de seis riegos a través del desarrollo del maíz, el rendimiento aumentó a 9.0 t ha^{-1} .

Bravo y Chan (1987) estudiaron la eficiencia en el uso del agua de riego en maíz híbrido H220, probaron niveles de abatimiento de 40, 60 y 80 % de humedad, dosis de nitrógeno de 120 y 240 kg ha^{-1} y densidades de planta de 40 000; 80 000 y 120 000 por hectárea, encontrando que el rendimiento de grano mostró una relación directa con los factores estudiados.

Vasquez *et al.* (1983), trabajando en los márgenes del río Cotaxtla estudiaron las variables: aplicación del nitrógeno y el fósforo, oportunidad de aplicación del fertilizante, y la calendarización de láminas de riego. La tasa de retorno al capital variable más alta (1.95) se registró cuando se sembró el híbrido H-510 con 43 000 plantas ha^{-1} , aplicaciones de 90 kg ha^{-1} de N, 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 , más siete riegos de auxilio con una lámina media de 12 cm cada uno a los 20, 35, 50, 65, 75 y 85 días después del riego de germinación, el cual coincidió con las principales etapas fenológicas del maíz.

Ortiz y Solano (1987), en un estudio realizado en el área de Benito Juárez, Chih., con la finalidad de estudiar los niveles óptimos de nitrógeno, fósforo y densidad de población en dos materiales de maíz para riego (variedad Compuesto Blanco e híbrido W-1188) encontraron que ambos respondieron mejor a 200 kg ha^{-1} de N, y a 150 kg de P_2O_5 , mientras que la mejor respuesta a densidad de población del Compuesto

Blanco ($50\,000$ plantas ha^{-1}) fue de 7.6 t ha^{-1} , y la del híbrido W-1188 ($75\,000$ plantas ha^{-1}) de 8.3 t ha^{-1} . Los productores de maíz de riego en el municipio de Cuauhtémoc, Chih., usan el nitrógeno en un rango de 120 a 540 kg ha^{-1} , con aplicaciones de 150 a 250 kg ha^{-1} de N, el rendimiento medio de 5.4 t ha^{-1} , mientras que las producciones máximas (6.8 t ha^{-1}) se obtienen con dosis de 250 a 350 kg ha^{-1} de N (CESICH, 1989).

Con respecto al fósforo hay productores que no lo utilizan y otros lo aplican en dosis de hasta 300 kg ha^{-1} , sin embargo, no se relaciona claramente con el rendimiento.

La variación encontrada en cuanto a las densidades de población indica que los productores que sembraron menos de $70\,000$ plantas ha^{-1} produjeron 4.5 t ha^{-1} , los que usaron de $70\,000$ a $110\,000$ plantas por ha cosecharon 5.6 t ha^{-1} , y los que usaron más de $110\,000$ plantas por ha obtuvieron 7.0 t ha^{-1} . En lo que se refiere al uso de agua para el mismo fin, hasta la fecha no se cuenta con información base, sobre lámina, calendarios y trazos de riego que sirvan para manejar y conservar adecuadamente este recurso. En el resto de los insumos utilizados para la producción de maíz bajo condiciones de riego, la panorámica es similar a lo descrito anteriormente, razón por la que se plantearon los siguientes objetivos: a) generar información técnica para usar en forma óptima los insumos agua, nitrógeno, y densidades de población; b) determinar la mejor combinación entre los insumos agua-nitrógeno, densidad de población en la producción de maíz.

MATERIALES Y METODOS

Caracterización del Sitio Experimental

El presente trabajo se llevó a cabo durante el ciclo primavera-verano de 1991 en un suelo Planosol mólico (Wm), [Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP), 1982], con textura franco arenosa (Bouyoucos, 1962), pH de 5.69, método electrométrico (CaCl_2 0.01M) (McLean, citado por Goijberg y Aguilar, 1987), 1.0 % de materia orgánica (Walkley y Black, 1934); 58 kg ha^{-1} de NO_3 (Bremner, 1965); 32 kg ha^{-1} de fósforo (Bray y Krutz, 1945) y 236 ppm de potasio (Jackson, 1970). La densidad aparente del suelo, se registró en 1.666 g cm^{-3} , usando el método del cilindro del volumen conocido, descrito por Figueroa y Ventura (1990); la capacidad de campo se cuantificó en 12.63 %, a través del método de campo citado por

Vega (1980). El sitio experimental se localizó en el rancho Majalca, a una latitud de 28°02'00" norte, longitud 106°56'44" al oeste del meridiano de Greenwich y una altitud de 2100 m, en la municipalidad de Cuauhtémoc, Chihuahua.

Tratamientos y Diseño Experimental

Se evaluaron tres factores: a) manejo del agua de riego, permitiendo abatimientos de la humedad aprovechable de 30, 60 y 90 %; b) niveles de fertilización nitrogenada a base de fertilizantes químicos (100, 250, 400 y 550 kg ha⁻¹) y c) densidad de población (45 000; 72 000; 98 000 y 125 000 plantas ha⁻¹). A través de la Matriz Plan Puebla I para dos factores (Rojas, 1981), se obtuvieron ocho combinaciones o tratamientos, los cuales se pueden apreciar en el Cuadro 1.

Como diseño experimental se utilizaron bloques completos al azar, con cuatro repeticiones y arreglo de los tratamientos en parcelas divididas, donde la parcela principal fueron los abatimientos de humedad aprovechable, y la subparcela, incluyó las combinaciones de nitrógeno y densidad de población. El tamaño de la parcela mayor fue de 32 surcos de 10 m de largo y 0.85 m de separación; la subparcela fueron cuatro surcos de 10 m de largo y espaciados a 0.85 m.

Variables en Estudio

Para la valoración de los tratamientos establecidos se tomó el índice de área foliar y rendimiento.

Análisis Estadístico

Las mutables, citadas anteriormente, se analizaron bajo el diseño experimental establecido, comparando los tratamientos al 5 y 10 % de probabilidad usando la prueba de rango múltiple para parcelas divididas, luego registrar el mejor tratamiento.

Método de Siembra, Variedades y Control Sanitario

Se sembró en forma manual (cadenas y coa) 32 surcos con semilla de maíz híbrido 7251 de la CARGILL (15 de mayo de 1991, después del riego de presiembra, aplicando una lámina neta de 10.47 cm), separados a 0.85 m y de 10 m de largo. Para el control

Cuadro 1. Tratamientos probados en el estudio. Cuauhtémoc, Chih. CESICH, 1991.

Tratamiento	Parcela principal Abatimiento de humedad	Subparcela		
		N	Densidad de población	
		kg ha ⁻¹	miles de plantas ha ⁻¹	
1		250	72	
2		250	98	
3	30% de abatimiento	400	72	
4		400	98	
5		100	72	
6		550	98	
7		250	45	
8		400	125	
9			250	72
10			250	98
11	60% de abatimiento	400	72	
12		400	98	
13		100	72	
14		550	98	
15		250	45	
16		400	125	
17			250	72
18			250	98
19	90% de abatimiento	400	72	
20		400	98	
21		100	72	
22		550	98	
23		250	45	
24		400	125	

sanitario fue necesario aplicar dos escardas usando tractor y cultivadora (combate de maleza), la primera se dio el 5 de junio y la segunda el 9 de julio; también fue necesario aplicar herbicida (Gesaprim 500 FW + Hierbamina en dosis de un litro de cada uno, mezclados en 700 L de agua) usando aspersora manual; el daño por plagas no fue significativo (3 % de daño por gusano cogollero y gusano elotero).

Fertilización y Manejo del Agua de Riego

La aplicación del fertilizante químico se hizo en forma manual y homogénea en cada unidad experimental (previo paso de la cantidad correspondiente, usando urea y fosfato de amonio, como fuentes de nitrógeno y fósforo, respectivamente); la mitad del nitrógeno y todo el fósforo al momento de la siembra (150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ fijos para los 24 tratamientos), la segunda mitad del nitrógeno se

aplicó también en forma manual antes de la segunda escarda.

El consumo de humedad del maíz se cuantificó haciendo muestreos de suelo por el método gravimétrico, antes y después de aplicar los riegos de auxilio, considerando dos estratos 0 a 30 y 30 a 60 cm de profundidad, en función de la distribución radical del maíz y de los abatimientos de humedad permisible.

Análisis Económico

A los datos de rendimiento de cada uno de los tratamientos se les practicó análisis económico, tomando como base la metodología descrita por Perrin, *et al.*, 1976).

RESULTADOS Y DISCUSION

Evapotranspiración Máxima (E_{max})

Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 2; se puede observar que de los tres tratamientos de riego, los de 60 y 90 % de abatimiento de humedad registraron la misma lámina de riego, debido a la presencia de lluvias, ya que en Junio llovió 50.5 mm, 211.9 mm en Julio, 114 mm en Agosto, 147.5 mm en Septiembre y 12.8 mm en Octubre, acumulando un total de 536.7 mm de lluvia efectiva para el maíz. La presencia de las lluvias después del 30 de julio hizo que el suelo se mostrara al mismo nivel de humedad para todos los tratamientos, sin embargo, en el periodo del 15 de mayo al 30 de julio, el

desarrollo del maíz mostró claras diferencias debido a la aplicación de los tratamientos en estudio. Para el tratamiento 1 se aplicaron tres riegos de auxilio con láminas netas muy pequeñas (1.4, 1.06 y 1.68 cm) más 53.7 cm de lluvia efectiva, sumaron un total de 68.29 cm. Esta información es similar a la consignada por Hernández (1976) quien encontró que con un nivel de 40 % de abatimiento se produjeron 7.0 t ha⁻¹, mientras que con un abatimiento de 80 % se obtuvieron 3.3 t ha⁻¹.

La situación para los tratamientos dos y tres fue la siguiente: se aplicó un riego de presiembrado de 10.47 cm más 53.67 cm. de lluvia efectiva, acumulando un total de 64.14 cm. La panorámica general que se presentó fue que después de dar el segundo cultivo y aplicar la mitad del fertilizante (9 de julio), pero antes de la floración (7 de agosto), el contenido de humedad en el suelo estuvo por encima de capacidad de campo, prolongándose esta situación incluso hasta después de la cosecha (4 de noviembre).

Indice de Area Foliar (IAF)

A través del análisis de varianza se detectaron diferencias altamente significativas para abatimientos de humedad, niveles de nitrógeno y para la interacción, sólo diferencias estadísticas al nivel 0.05, lo que demostró que el agua y los nutrientes tienen un efecto sobre la capacidad fotosintética de la planta, hecho que está evidentemente relacionado con el área foliar disponible (Norero, 1982).

Cuadro 2. Evapotranspiración máxima para maíz sometido a diferentes condiciones de humedad, dosis de nitrógeno y densidades de población. Cuauhtémoc, Chih. CESICH, 1991.

Fechas de riego	Profundidad	Capacidad de campo	Humedad antes de regar	Lámina de riego	Evapotranspiración máxima
	cm		%		cm
Niveles de humedad (30 % de abatimiento HAR†)					
4/5	0-30	12.63	2.245	5.19	
	30-60	12.63	2.245	5.28	
27/5	0-30	12.63	9.82	1.40	
7/6	0-30	12.63	10.50	1.07	
28/6	0-30	12.63	9.27	1.68	
6-10		Precipitación pluvial efectiva		53.67	68.29
Niveles de humedad (60 y 90 % abatimiento HAR)					
5/5	0-30	12.63	2.25	5.19	
	30-60	12.63	2.25	5.28	
6-10		Precipitación pluvial efectiva		53.67	64.133

† HAR = Humedad antes de regar.

Cuadro 3. Comparación de medias para tratamientos de subparcelas en el mismo tratamiento de parcela principal para el parámetro índice de área foliar (IAF). Cuauhtémoc, Chih. CESICH. 1991.

Parcela principal	Subparcela							
	1	2	3	4	5	6	7	8
30% abatimiento	3.70 d	3.86 d	3.80 d	4.64 ab	2.69 e	4.58 abc	2.30 f	4.87 a
60% abatimiento	3.03 d	4.45 b	3.80 d	4.22 abc	2.76 e	3.32 d	2.17 ef	4.64 a
90% abatimiento	3.13 c	3.78 bc	3.14 c	3.87 ab	3.09 d	3.99 ab	2.29 e	4.42 a

DMS_{0.05} = 0.672.

La comparación de medias para subparcelas en una misma parcela principal, se presenta en el Cuadro 3, en donde se observa que el 30 % de abatimiento sobresale en las subparcelas (T8), (T6) y (T4), con IAF = 4.87, 4.58 y 4.64, respectivamente. Para 90 % de abatimiento sobresalieron los tratamientos T24 y T22 con 4.42 y 3.99 de IAF, respectivamente, aunque en esta ocasión tuvieron efectos estadísticos similares con los tratamientos T18 y T20. Cuando se hizo la comparación de medias para detectar la interacción de subparcela independientemente de la parcela principal (Cuadro 4) se pudo comprobar que los valores más altos (4.87, 4.64 y 4.42) de IAF fueron obtenidos con las interacciones (T8), (T16) y (T24), seguidos por (T4), (T10) y (T22) con 4.64, 4.45 y 3.39 de IAF, después (T6), con 4.58 y finalmente (T18), con 3.8 de IAF, todos ellos con valores estadísticamente iguales y superiores al resto de las interacciones.

Dos aspectos importantes se pueden destacar hasta aquí: a) las mejores interacciones en IAF (T8), (T16) y (T24), también fueron las mejores productoras de materia seca; además, el valor más bajo de IAF (2.2), corresponde al tratamiento 15, que fue el que produjo la más baja cantidad de biomasa; y b) los valores de IAF mostrados por las diferentes interacciones, de

Cuadro 4. Comparación de medias para subparcelas en distintas parcelas principales. Parámetro índice de área foliar (IAF). Cuauhtémoc, Chih. CESICH, 1991.

Subparcela N-P ₂ O ₅ -DP†	Parcela principal (% de abatimiento)		
	30	60	90
250-150-72	3.70 b	3.03 b	3.13 b
250-150-98	3.86 b	4.45 a	3.80 ab
400-150-72	3.80 b	3.80 b	3.14 b
400-150-98	4.64 a	4.22 ab	3.87 a
100-150-72	2.69 c	2.76 bc	3.09 b
550-150-98	4.58 a	3.32 b	3.99 a
250-150-45	2.30 c	2.17 c	2.29 c
400-150-125	4.87 a	4.64 a	4.42 a

† DP = Densidad de población.

DMS_{0.05} = 0.657.

acuerdo con Norero (1982) y Mojarro (1977) se clasifican como muy buenas, ya que el valor óptimo es 5.0 para la obtención de máximas producciones.

Rendimiento de Grano

En la información sobre producción de grano se detectó efecto estadístico altamente significativo para subparcela y para la interacción subparcela-parcela principal. La comparación de medias por subparcela en una misma parcela principal se presenta en el Cuadro 5, en el que se observa que con excepción de los tratamientos 5 y 7, con producciones de 8.0 y 10.0 t ha⁻¹, respectivamente, el resto fueron superiores y estadísticamente iguales entre sí, con rendimientos que oscilaron desde 13.2 t ha⁻¹ para el tratamiento 2, hasta 12.5 t ha⁻¹, para la subparcela 1; esta información es superior a la reportada por Martínez y Vásquez (1991), donde el mejor tratamiento obtenido (120-70-55 de N-P₂O₅-DP), produjo 6.84 t ha⁻¹.

En las parcelas mayores que 60 y 90 % de abatimiento se detectó una respuesta muy similar, pues en ambos casos las mejores subparcelas fueron T16 (13.5 t ha⁻¹), T19 (13.0 t ha⁻¹) y T6 (13.0 t ha⁻¹); además de estos, destacó el tratamiento T8 (12.7 t ha⁻¹). Por otro lado, cuando se compararon las medias de subparcelas en diferentes parcelas principales se detectaron 10 interacciones estadísticamente iguales y superiores al resto, destacando particularmente los tratamientos T16 con 13.5 t ha⁻¹, seguido por T2 con 13.2 t ha⁻¹.

Esto es congruente con lo que se ha venido discutiendo particularmente para la primera interacción, la cual se ha destacado en los parámetros IAF, producción de materia seca y, en este caso, rendimiento. El otro tratamiento aunque no ha mostrado los mismos efectos, sí ha mostrado numéricamente tener efectos positivos sobre las variables citadas, particularmente en rendimiento. Con base en esto se puede afirmar que la respuesta en rendimiento es hasta el nivel de 400 kg ha⁻¹ para

Cuadro 5. Comparación de medias para el tratamiento de subparcela en una misma parcela principal. Rendimiento de grano al 12 % de humedad en t ha⁻¹. Cuauhtémoc, Chih. CESICH, 1991.

Parcela principal	Subparcela							
	1	2	3	4	5	6	7	8
30 %	12.5 a	13.2 a	12.4 a	12.7 a	8.0 b	13.0 a	10.0 a	12.7 a
60 %	11.9 a	12.0 b	12.5 a	12.8 a	9.5 a	12.5 a	9.8 a	13.5 a
90 %	11.8 a	11.4 b	13.0 a	12.3 a	8.9 b	12.0 a	9.7 a	11.4 b

DMS_{0.05} = 1.1.

Cuadro 6. Comparación de medias para tratamiento de subparcela en diferentes parcelas principales. Rendimiento de grano al 12 % de humedad en t ha⁻¹. Cuauhtémoc, Chih. CESICH, 1991.

Subparcela N-P ₂ O ₅ -DP†	Parcela principal		
	30	60	90
	(% de abatimiento)		
250-150-72	12.5 ab	11.4 c	11.8 c
250-150-98	13.2 ab	12.0 c	11.4 c
400-150-72	12.4 c	12.5 ab	13.0 ab
400-150-98	12.7 ab	12.8 ab	12.3 c
100-150-72	8.0 fg	9.5 e	9.0 f
550-150-98	13.0 ab	12.5 ab	12.0 c
250-150-45	10.0 e	9.8 e	9.7 e
400-150-125	12.7 ab	13.5 a	11.4 c

† DP = Densidad de población.

DMS_{0.05} = 1.0.

nitrógeno y para el caso de densidad de población hasta las 101 300 t ha⁻¹ probadas (Cuadro 6).

Análisis Económico

El máximo beneficio (\$5833.00) se obtuvo con el tratamiento (T2): 30 % de abatimiento y 250-150-89 (T2), cuyo costo de producción fue de \$2029.00. Destaca también el tratamiento (T16) de 60 % de abatimiento y 400-150-104 con máximo rendimiento (13 459 kg ha⁻¹), aunque sus costos se incrementan en \$210.00 y el beneficio neto se reduce en \$64.00 en comparación con el primer tratamiento. El análisis

marginal se presenta en el Cuadro 7, recalcando que la mejor alternativa para producir maíz es regar cada vez que se abata 30 % de la humedad aprovechable y fertilizar con 250 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 150 kg ha⁻¹ de fósforo y usar 89 000 plantas ha⁻¹ (T2).

El resto de las opciones ahí anotadas sólo confirman el hecho que desde el punto de vista económico no es redituable usar más de 250 kg ha⁻¹ de nitrógeno y no menos de 67 000 plantas ha⁻¹. Garcia *et al.* (1991) registraron una tasa de retorno máxima de 81.3 %, cuando el tratamiento 120-40-55 de N-P₂O₅-DP, produjo 4.5 t ha⁻¹ de maíz, bajo condiciones de temporal, usando la variedad p-5.

CONCLUSIONES

Para cubrir los requerimientos hídricos del maíz se requirió de una Etmáx de 68.29 cm, al 30 % de abatimiento de la humedad aprovechable.

Las subparcelas que más efecto estadístico tuvieron sobre las variables IAF y rendimiento de grano indicaron consistentemente que el mejor tratamiento fue 400-150-101.3 (Tratamiento 8) N-P₂O₅-DP, seguido sobre todo en rendimiento por 250-150-89.0 (Tratamiento 2) de N-P₂O₅-DP.

El efecto estadístico de la interacción se detectó en las variables IAF, y rendimiento; desde el punto de vista fisiológico, las mejores opciones en rendimiento de grano fueron: "T16" y "T2".

Cuadro 7. Análisis marginal de tratamientos. porcentaje de humedad-nitrógeno-densidad de población en maíz. Cuauhtémoc, Chih. CESICH, 1991.

Parcela	Subparcela	Beneficio neto	Costos variables	Incremento marginal		Tasa de retorno
						%
30 % abatimiento	250-150-89	5,833	2,029	374	63	594
30 % abatimiento	250-150-68	5,459	1,966	215	107	201
60 % abatimiento	250-150-68	5,244	1,859	1,119	306	366
90 % abatimiento	100-150-67	4,125	1,553			

Desde el punto de vista económico, la mejor alternativa fue el tratamiento 2 (250-150-98) de N-P₂O₅-DP.

LITERATURA CITADA

- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. J.* 54: 464-465.
- Bravo L., A.G. y J.L. Chan C. 1987. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera del maíz de riego en zonas semiáridas. *Terra* 5: 132-139.
- Bray, R.H. y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. *In: C.A. Black (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2. Amer. Soc. of Agron. Madison Wisconsin.*
- CESICH (1989). Encuestas del programa nacional de maíz de alta tecnología. CESICH-CIFAP-Chihuahua-INIFAP-SARH. Cd. Cuauhtémoc, Chih. (Mimeógrafo sin publicar).
- Figuroa S., B. y E. Jr. Ventura 1990. Proyecto para el estudio del efecto de la labranza en la estructura del suelo y su relación con el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos. Serie de documentos técnicos de la red de conservación del suelo y agua 1. INIFAP-SARH. Salinas, San Luis Potosí. México.
- FIRA. 1990. Unidad demostrativa de maíz RBMF "Alta tecnología". Cd. Cuauhtémoc, Chih. (Informe de actividades sin publicar).
- García P., J.D., A. Rivera C. y G. González R. 1991. Fertilización y densidad de población para maíz en seis localidades del sur de Nayarit. p. 277. *In: Tovar S., J.L. y R. Quintero L. (eds). 1991. La Investigación Edafológica en México 1990-1991. Memorias del XXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Pachuca, Hidalgo, México.*
- Goyjberg R., G. y A. Aguilar S. 1987. pH del suelo y necesidades de cal. pp: 17-40. *In: A. Aguilar S., J.D. Etchevers B. y J.Z. Castellanos R. (eds). Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación especial No. 1. Chapingo, Edo. de México.*
- Hernández H., A. 1976. Efecto de niveles de humedad y dosis de fertilización sobre uso del agua y rendimiento en maíz superenano. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- Jackson, M.L. 1970. Análisis químico de suelos. Traducción al español del Ing. José Beltrán Martínez, 2a. ed. Ediciones Omega S.A., Barcelona, España.
- Martínez M., L. y L. Vasquez P. 1991. Respuesta del maíz a la fertilización y densidad de población en condiciones de riego en el sur de Nuevo León. p. 282. *In: Tovar S., J.L. y R. Quintero L. (eds). 1991. La investigación edafológica en México 1990-1991. Memorias del XXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hidalgo, México.*
- Mojarro D., F. 1977. Efecto de la sequía en el rendimiento del frijol. Aspectos fisiológicos. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Norero, A. 1982. El clima y la producción de cultivos. Relaciones físicas básicas. CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- Ortiz F., P. y V.D. Solano R. 1987. Evaluación de la respuesta del cultivo de maíz de riego a factores, nitrógeno, fósforo y densidad de población en la Sierra de Chihuahua. CESICH-CIFAP-INIFAP, Cd. Cuauhtémoc, Chih. Informe de Investigación (mimeógrafo sin publicar).
- Perrin, D., D.L. Winkelmann, E.R. Moscardi y J.R. Anderson. 1976. Formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: un manual metodológico de evaluación económica. CIMMYT, México, D.F.
- Reyes O., S., A. Turrent F., R. Aveldaño S., D. González E., O. Moreno R., Rojo S., J. Ortiz C. y A. Espinoza E. 1990. Programa Nacional de maíz de alta tecnología. INIFAP-SARH.
- Rojas M., B.A. 1981. Planeación y análisis de los experimentos de fertilizantes. Folleto misceláneo #41. INIA-SARH. México, D.F.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1991. Informe de actividades. Departamento de Informática. Chihuahua, Chih. México.
- Secretaría de Programación y Presupuesto 1982. Carta Edafológica 1:1'000 000, CHIHUAHUA. Programación y Presupuesto - Coordinación General de Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática. Dirección General de Geografía. México, D.F.
- Vasquez M., A., M.A. Rodríguez P. y A. Turrent F. 1983. Técnicas de producción para el sistema anual maíz-maíz en la zona central del estado de Veracruz. *Agr. Tec. Méx.* Vol. 9. #2. pp: 91-113. INIA-SARH México, D.F.
- Vega D., J. 1980. Uso y manejo del agua. Prácticas de campo y gabinete. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM). Monterrey, Nuevo León, México.
- Walkley, A. y T.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.

ESTIMACION DE DIFERENTES MODELOS DE REGRESION A EXPERIMENTOS DE FERTILIZACION Y SU COMPARACION CON FINES DE GENERAR RECOMENDACIONES OPTIMAS ECONOMICAS

I. CASOS CON UN FACTOR

Estimation of Different Regression Models in Fertilizer Experiments in Order to Obtain Optimum Economic Rates. I. One Factor Examples

Héctor Hugo Rebolledo Robles

RESUMEN

A la dosis de fertilizante que el agricultor debe agregar a un cultivo con el objeto de obtener la máxima ganancia se le conoce como dosis óptima económica (DOE). Una de las metodologías para estimar DOE consiste en generar, con base en datos experimentales, un modelo de regresión para representar la respuesta del cultivo a las aplicaciones de fertilizantes. El problema que ocurre es que modelos de regresión diferentes originan DOE diferentes y en consecuencia dichas DOE estarán bien estimadas en la medida que el modelo matemático generado represente en forma adecuada la relación existente entre el rendimiento del cultivo y las dosis de fertilizantes. Al intentar especificar un modelo de regresión a los datos de varios experimentos se comprueba que las formas de las curvas de las respuestas del rendimiento del cultivo a los factores de la producción pueden ser muy variadas, lo que implica que los modelos matemáticos estimados deberán ser también variados. En el presente trabajo se analizan algunos de los problemas existentes en la estimación del mejor modelo de regresión para un conjunto de datos experimentales y las implicaciones económicas que tiene para un agricultor el adoptar DOE generadas con base en modelos inadecuados.

SUMMARY

The fertilizer rate the farmer should add to a cultivar so as to obtain the maximum profit is known as optimum economic rate (OER). One of the methodologies to estimate OER is to fit a regression

model to experimental data to represent the response of the cultivar to fertilizer applications. However, different regression models originate different OER and as a consequence those OER will be well estimated as the generated mathematical model represents in an adequate manner the existing relationship between the yield of the cultivar and the fertilizer rates. When trying to specify a regression model to the data of several experiments, it is proved that the curver designs of the answers of the cultivar yield to the production factors can be different, which implies that the estimated mathematical models can also be different. On the present job research some of the existing problems are analyzed on the estimation of the best regression model for a group of experimental data and the economic implications for a farmer to adopt the generated OER on bases of inadequate models.

INTRODUCCION

Para aumentar los rendimientos y los ingresos netos de un cultivo por unidad de superficie, se debe lograr un uso más adecuado de los diferentes factores de la producción, entre los cuales se encuentran los fertilizantes.

El uso de los fertilizantes está determinado por la necesidad de aumentar los rendimientos y también para lograr la mayor rentabilidad que el agricultor desea obtener por la práctica de la fertilización.

A la dosis de fertilizante que el agricultor debe agregar al suelo con el objeto de obtener la máxima ganancia con el cultivo, se le conoce como dosis óptima económica (DOE).

Hay diferentes metodologías para estimar DOE, una de estas metodologías, quizás la más empleada en la actualidad, ha sido descrita por diferentes autores (Heady y Dillon, 1961; Tejeda, 1964; Volke, 1981) y consiste básicamente en estimar mediante regresión un

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Area de Fertilidad, 56230 Chapingo, México.
hrebolle@taurus1.chapingo.mx

modelo matemático para representar la respuesta del cultivo a las aplicaciones de fertilizantes u otros insumos de la producción, el cual se utiliza generalmente para generar las DOE.

En el presente trabajo se analizan algunos de los problemas existentes en la estimación del mejor modelo matemático para un conjunto de datos experimentales, y las implicaciones económicas que tiene para el agricultor el estimar DOE con modelos inadecuados.

REVISION DE LITERATURA

La metodología para estimar DOE, que se analizará en este trabajo, exige la previa estimación de un modelo de regresión para cada sitio experimental, lo que se hace a partir de información de la respuesta de un cultivo a diferentes dosis de fertilizante u otros insumos, evaluada mediante la ejecución de experimentos de campo.

El problema que se presenta es que modelos de regresión diferentes originan DOE diferentes; en consecuencia las DOE estarán bien estimadas en la medida en que el modelo matemático generado represente en forma adecuada la relación existente entre el rendimiento del cultivo y las dosis de fertilizantes.

La primera tarea es especificar el modelo más adecuado para un sitio experimental en particular; donde el primer inconveniente que surge es comprobar que las formas de las respuestas del rendimiento del cultivo a los factores de la producción experimentados pueden ser muy variadas, probablemente debido a que son muchos los factores que influyen sobre el rendimiento, lo que implica que los modelos matemáticos estimados deberán ser también variados.

Colwell (1983) y Cerrato y Blakmer (1990) señalan que no existe un procedimiento estandarizado para seleccionar el mejor modelo de ajuste a los datos de un experimento, no obstante que el hecho de que diferentes modelos generen DOE diferentes, de las cuales sólo una de ellas es la más adecuada, con las implicaciones económicas que para el agricultor esto ocasiona, hace necesario otorgar mayor importancia a este aspecto.

Uno de los principales problemas que ocurren con los modelos estimados es la presencia de sesgo, el cual básicamente consiste en la diferencia entre la respuesta de un modelo asumido como "verdadero" y aquella estimada por algún modelo aproximativo (Berardo

D'Amico *et al.*, 1972; Hernández *et al.*, 1973). Aunque hay otros factores que influyen sobre el sesgo, como son el espacio de exploración de los factores en estudio y el diseño de los tratamientos; el modelo aproximativo utilizado es quizás el factor más importante para disminuir el sesgo.

Generalmente se han venido empleado básicamente los modelos cuadrático y raíz cuadrada, para ajustarlos a los datos de un experimento (Turrent, 1968; Volke, 1977; Rebolledo, 1991); y posteriormente con base en alguno de ellos, que fue seleccionado como el mejor, estimar las DOE; no existiendo de esta manera la seguridad de que los modelos estimados son los más adecuados y que, por lo tanto, también lo sean las recomendaciones generadas para los agricultores.

La facilidad de cálculo para estimar óptimos económicos que permiten estos modelos, ha sido quizás una razón importante para insistir en su utilización, sin embargo, las actuales facilidades de uso de computadoras han facilitado enormemente dichos cálculos, lo que hace posible la utilización de otros modelos que expliquen en mejor forma el fenómeno en estudio. La consecuencia de esto es que se deberían ajustar varios modelos diferentes a un mismo conjunto de datos, para así tener una mayor seguridad de estar realmente estimando el mejor. Colwell (1983) muestra, a manera de ejemplo, como a un conjunto de datos de respuesta del trigo a la fertilización fosfatada, le ajustó diversos modelos matemáticos, que van desde el tradicional modelo cuadrático hasta modelos exponenciales con diferentes tipos de exponentes, obteniendo para un mismo experimento DOE que van desde 6.8 kg ha⁻¹ a 21.7 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Por otro lado Cerrato y Blakmer (1990) ajustaron cinco modelos diferentes a un mismo conjunto de datos de un experimento de respuesta del rendimiento del maíz a la fertilización nitrogenada, obteniendo para un solo sitio DOE que van desde 94 kg ha⁻¹ de N a 188 kg ha⁻¹ de N, siendo la DOE de 94 kg ha⁻¹ de N, la que por supuesto fue estimada mediante el mejor modelo matemático generado para ese sitio experimental y es la DOE que debería recomendarse al agricultor para que maximice su ganancia.

OBJETIVOS

- a. Demostrar que la selección de un modelo inadecuado para estimar DOE de fertilizantes u otros insumos,

tiene implicaciones económicas negativas para el agricultor.

b. Establecer una metodología que permita estimar el mejor modelo matemático que represente la respuesta del rendimiento de un cultivo a las aplicaciones de fertilizantes u otros insumos.

MATERIALES Y METODOS

a. Se utilizó la información de 21 experimentos de campo de respuesta del maíz de temporal, a las aplicaciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y densidad de plantas (D), llevados a cabo en la región del Plan Puebla entre los años 1967 y 1973.

b. Se seleccionaron experimentos donde, en el análisis de la varianza, no se observó respuesta a los factores P y D, por lo que se aceptó como variable independiente en estudio sólo al factor dosis de N.

c. Para cada experimento se construyó una gráfica, con los valores del rendimiento del maíz en el eje vertical y las dosis de N en el eje horizontal, con el objeto de observar la forma de las curvas de respuesta del rendimiento de maíz a las aplicaciones de N.

d. Mediante el método gráfico se estimó la DOE de N para cada experimento, la que se consideró como DOE de N preliminar o de referencia, la cual fue posteriormente comparada con las DOE de N obtenidas en ese experimento con los diferentes modelos matemáticos estimados.

e. A cada sitio experimental se le estimaron los modelos de regresión presentados en el Cuadro 1.

Los modelos fueron estimados mediante el procedimiento de selección de variables MAXR del SAS (Statistical Analysis System).

f. Se seleccionó para cada experimento el mejor modelo de regresión, usando como criterio de bondad, para elegir al mejor, al mínimo cuadrado medio de desviaciones de la regresión, que es el cuadrado medio del error de la regresión (CMDR) y teniendo cuidado que la DOE de N estimada por el mejor modelo no sea muy diferente a la DOE preliminar de referencia estimada previamente mediante el método gráfico.

g. Con cada uno de los seis modelos estimados para cada experimento, se generaron los rendimientos máximos; las dosis de N para los rendimientos máximos, las DOE de N; los rendimientos óptimos económicos (ROE) y los ingresos netos (IN).

Las DOE de N se estimaron con diferentes relaciones de precio insumo/producto además de la relación real

Cuadro 1. Los seis modelos de regresión ajustados a cada uno de los experimentos.

No. de modelo	Modelos†	Nombre
(1)	$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$	cuadrático
(2)	$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3$	cúbico
(3)	$Y = \beta_0 + \beta_1 X^{.5} + \beta_2 X$	raíz cuadrada
(4)	$Y = \beta_0 + \beta_1 X^{.75} + \beta_2 X^{1.5}$	exp. 0.75 y 1.5
(5)	$Y = \beta_0 + \beta_1 X^{.25} + \beta_2 X^{.5}$	exp. 0.25 y 0.5
(6)	$Y = \beta_0 + \beta_1 X^{.25} + \beta_2 X^{.5} + \beta_3 X$	exp. 0.25, 0.5 y 1

† β_i = coeficientes de regresión; X = dosis de nitrógeno; exp. = exponentes.

existente a la fecha de realización del estudio, considerando como fuente de nitrógeno a la urea.

h. Se hicieron cálculos acerca de las implicaciones económicas que para el agricultor tienen, el adoptar DOE de N estimadas con modelos inadecuados, en circunstancias que debería haber adoptado otra generada con base en un modelo matemático considerado como el mejor.

RESULTADOS Y DISCUSION

Gráficas de las Curvas de Respuesta de los Experimentos

Primero se procedió a construir gráficas de las curvas de respuesta del rendimiento del maíz a la fertilización nitrogenada de cada uno de los 21 experimentos, en donde en el eje vertical se pusieron los rendimientos de maíz promedios obtenidos con cada dosis de N y en el eje horizontal las dosis de N, tal como se aprecia en la Figura 1, en donde, a manera de ejemplo, se muestran las gráficas de algunos de los experimentos analizados.

En dichas gráficas es posible observar una gran diversidad de formas de respuesta, en donde sólo una curva de respuesta (exp. 6708) se podría ajustar a un modelo cuadrático y posiblemente la curva del experimento 7208 podría ser representada mediante un modelo cúbico.

Todas las demás curvas tienen formas diferentes, no son cuadráticas, tampoco corresponden a un modelo cúbico y posiblemente las curvas de los experimentos 6705 y 6715, que suben rápidamente con las dosis bajas de N para después bajar lentamente, podrían ajustarse a un modelo raíz cuadrada o quizás al modelo de exponentes 0.25 y 0.5. La diversidad de formas de las curvas de respuesta reafirma la necesidad de

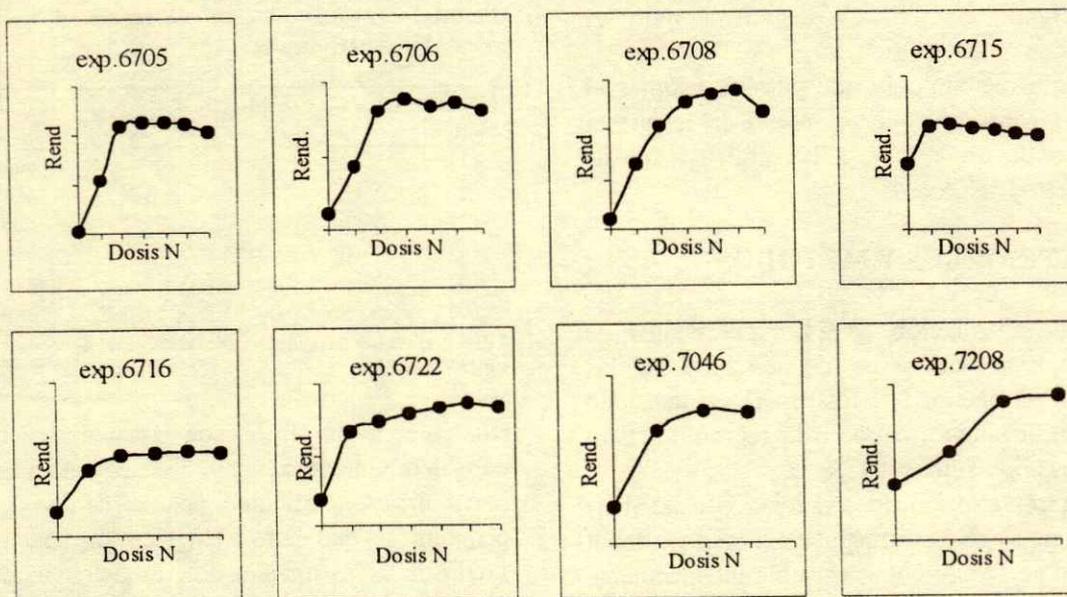


Figura 1. Gráficas de respuesta del rendimiento del maíz a las aplicaciones de nitrógeno en algunos de los experimentos analizados.

probar, para cada experimento diferentes modelos matemáticos, solo así se tendrá mayor seguridad de poder seleccionar uno mejor. En general es necesario dibujar con cuidado las gráficas de la respuesta del rendimiento a los insumos para cada experimento, pues permiten al investigador observar la forma de las curvas y así tener una idea aproximada de cuál podría ser el modelo matemático que mejor se ajuste a la forma de la curva.

Estimación de las Dosis Óptimas Económicas (DOE) Mediante el Procedimiento Gráfico

Las gráficas construidas para cada experimento se utilizaron también para estimar las DOE de nitrógeno mediante el procedimiento gráfico. Para esto en el eje horizontal se dibujó la pendiente de costos variables (en este caso el costo del nitrógeno aplicado expresado en su equivalente en toneladas de maíz), la que en forma paralela se trasladó hasta hacerse tangente de la curva de respuesta; desde el punto donde se logró la tangente se trazó una línea vertical hasta llegar al eje horizontal; el punto donde se produce el contacto corresponde a la DOE de N estimada mediante el procedimiento gráfico.

En la Figura 2 se muestra a manera de ejemplo la estimación de las DOE de N, mediante el procedimiento gráfico, para los experimentos 6714 y 6725,

donde se observa a la pendiente de costos variables trasladada hasta hacer tangencia con la curva de respuesta, punto a partir del cual se traza un línea perpendicular hasta tocar el eje horizontal. Las DOE estimadas son 120 y 210 kg ha⁻¹ de N para ambos experimentos respectivamente. De una forma similar se estimaron las DOE de N para todos los experimentos. Estas DOE sirvieron para tener una idea aproximada de su magnitud en cada experimento y se consideró como DOE de referencia para compararlas posteriormente con las generadas por cada uno de los modelos de regresión que se ajustaron a cada sitio experimental.

En el Cuadro 2 se muestran las DOE que para todos los experimentos se estimaron mediante el procedimiento gráfico y con el mejor modelo de regresión seleccionado para cada experimento; se muestran además los tipos de modelos que fueron seleccionados como mejores en cada uno de los 21 experimentos con que se trabajó.

Cabe destacar, que en la mayoría de los casos las DOE estimadas mediante el procedimiento gráfico fueron muy similares a las estimadas posteriormente con base en el mejor modelo matemático seleccionado en cada experimento; lo que estaría indicando que el procedimiento gráfico es una buena alternativa para generar DOE de fertilizantes, aun cuando tiene algunas limitaciones cuando se trabaja con más de un factor,

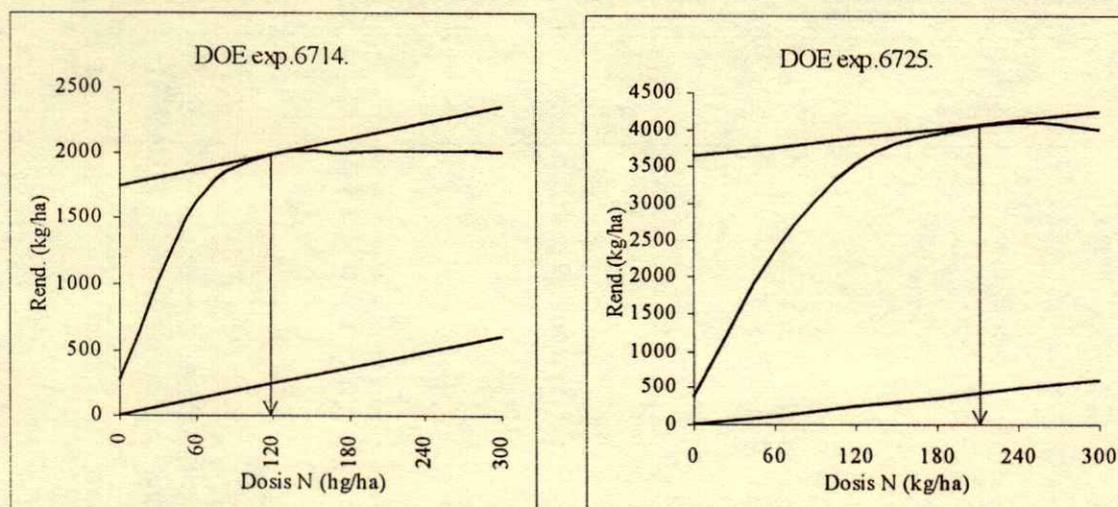


Figura 2. Estimación de las DOE de nitrógeno mediante el procedimiento gráfico para los experimentos 6714 y 6725.

existen interacciones entre factores y/o se desea considerar la disponibilidad de capital del agricultor.

Estimación del Mejor de los Seis Modelos de Regresión Probados para Cada Experimento

Utilizando el programa estadístico SAS, a cada uno de los experimentos se le ajustaron los modelos de regresión señalados en el Cuadro 1, para posteriormente seleccionar entre ellos el mejor.

En el Cuadro 3 se muestran los valores de los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos por los seis modelos ajustados a cada experimento.

Los datos muestran que el valor de los R^2 de los seis modelos ajustados a cada experimento son muy similares; en la mayoría de los experimentos se obtuvieron valores que indican un buen ajuste de los modelos. A manera de ejemplo se puede observar el caso del experimento 7046, cuyos valores de R^2 para los seis modelos que se le ajustaron son muy altos ya que fluctúan entre 0.96 y 0.97, esto indica que cualquiera de los seis modelos tiene un muy buen ajuste y todos ellos explican en más de 95 % la variación del rendimiento del maíz en función de las dosis de nitrógeno.

Sin embargo, si se analizan las DOE de N (Cuadro 6) estimadas por cada uno de los seis modelos ajustados al experimento 7046, se observa que éstas son muy diferentes, pues fluctúan desde 156 a 231 kg ha⁻¹ de N. Existe una diferencia de 75 kg ha⁻¹ de N

entre las DOE más baja y la más alta. Lo anterior es importante pues está señalando que modelos matemáticos estimados a partir de un mismo conjunto de datos experimentales, pueden tener todos valores de R^2 muy altos y similares entre sí y, sin embargo,

Cuadro 2. Mejor modelo de regresión seleccionado para cada experimento y dosis óptimas económicas estimadas mediante el método gráfico y utilizando el mejor modelo.

Experi- mento	DOE de N proc. gráfico	DOE de N mejor modelo	Mejor modelo seleccionado†
	----- kg ha ⁻¹ -----		
6705	184	216	exp. 0.25, 0.5 y 1
6706	180	207	exp. 0.25, 0.5 y 1
6708	240	243	cuadrático
6714	120	135	raíz cuadrada
6715	57	36	exp. 0.25 y 0.5
6716	202	213	exp. 0.25, 0.5 y 1
6719	129	150	cúbico
6721	180	165	cúbico
6722	240	240	exp. 0.25 y 0.5
6725	210	213	exp. 0.25, 0.5 y 1
6727	165	177	cuadrático
6912	140	177	exp. 0.75 y 1.5
7046	178	174	exp. 0.75 y 1.5
7120	170	189	cuadrático
7121	106	102	exp. 0.75 y 1.5
7124	100	100	cúbico
7208	129	132	cúbico
7209	123	123	cuadrático
7317	90	90	cúbico
7319	115	115	exp. 0.25, 0.5 y 1
7320	117	115	cúbico

† exp. = exponentes.

Cuadro 3. Coeficientes de determinación (R^2) de cada uno de los seis modelos de regresión ajustados a cada experimento.

Experimento	Modelos					
	cuadrático	cúbico	raíz cuadr.	exp.0.75,1.5	exp.0.25,0.5	exp.0.25,0.5, 1
6705	0.88	0.89	0.83	0.88	0.79	0.90
6706	0.89	0.90	0.82	0.88	0.79	0.91
6708	0.79	0.79	0.74	0.78	0.72	0.79
6714	0.62	0.69	0.73	0.70	0.71	0.73
6715	0.35	0.54	0.58	0.48	0.59	0.59
6716	0.83	0.90	0.90	0.89	0.88	0.90
6719	0.71	0.76	0.74	0.75	0.71	0.75
6721	0.77	0.78	0.75	0.77	0.73	0.78
6722	0.66	0.71	0.74	0.72	0.74	0.74
6725	0.95	0.95	0.93	0.95	0.92	0.95
6727	0.41	0.41	0.36	0.40	0.33	0.41
6912	0.91	0.92	0.91	0.92	0.89	0.92
7046	0.96	0.97	0.97	0.97	0.96	0.97
7120	0.50	0.51	0.50	0.50	0.50	0.51
7121	0.50	0.52	0.51	0.51	0.50	0.51
7124	0.66	0.70	0.63	0.64	0.64	0.69
7208	0.86	0.89	0.84	0.85	0.85	0.89
7209	0.95	0.95	0.94	0.95	0.93	0.95
7317	0.90	0.93	0.92	0.93	0.90	0.93
7319	0.77	0.77	0.74	0.75	0.74	0.78
7320	0.74	0.76	0.71	0.72	0.71	0.75

pueden generar DOE muy diferentes, de las cuales sólo una de ellas es la más adecuada.

Por lo tanto, persiste el problema de que es necesario seleccionar un solo modelo de regresión para cada experimento: de los seis modelos ajustados se eliminaron cinco y se eligió uno, el cual es considerado como el mejor modelo matemático, de los seis modelos probados, para el sitio experimental en cuestión y es el que se empleó para estimar las DOE para ese sitio experimental. Lo discutido anteriormente parece indicar que los valores de los R^2 no son un buen criterio para decidir si un modelo es mejor que otros.

Por otro lado, se tiene que a cada modelo de regresión se le estimó su cuadrado medio de desviaciones de la regresión (CMDR), los cuales se muestran en el Cuadro 4.

Al observar el valor de los CMDR de los seis modelos estimados para cada experimento, es posible notar que al contrario de lo que ocurre con los valores de los R^2 , éstos muestran notables diferencias.

Si se recuerda que el CMDR corresponde a la suma de los cuadrados de las discrepancias entre los valores de rendimiento de maíz observados en el experimento y los valores de rendimiento estimados por el modelo, dividida entre los grados de libertad residuales; es lógico concluir que mientras más

pequeño es el valor del CMDR de un determinado modelo de regresión, mejor es el ajuste del modelo a los datos experimentales, menor es el sesgo y mejor es la explicación que dicho modelo hace del fenómeno que se está estudiando. Así es posible concluir que en lugar del R^2 , el menor CMDR es un criterio más adecuado para seleccionar el mejor modelo para un sitio experimental.

Si en el Cuadro 4 se observa nuevamente el caso del experimento 7046, es posible notar que los valores de los CMDR para los seis modelos de regresión ajustados tienen ahora un rango de variación bastante amplio, pues fluctúan desde 179 225 hasta 244 937.

Al seleccionar, para el experimento 7046, como mejor al modelo con el menor valor del CMDR, se eligió al modelo de exponentes 0.75 y 1.5.

Por otro lado, si se compara la DOE de N generada (Cuadro 2) por el modelo de exponentes 0.75 y 1.5, seleccionado como mejor para este experimento, que es de 174 kg ha⁻¹ de N con la DOE preliminar de referencia estimada previamente mediante el método gráfico, que es de 178 kg ha⁻¹ de N, se observa que son muy similares, lo que reafirma el hecho de que el modelo de regresión seleccionado para el experimento 7046, es el más adecuado de los seis modelos probados.

Cuadro 4. Cuadrados medios de desviaciones de la regresión (CMDR) de cada uno de los seis modelos estimados a cada experimento.

Experimento	Modelos					
	cuadrático	cúbico	raíz cuadr.	exp.0.75,1.5	exp.0.25,0.5	exp.0.25,0.5,1
6705	311591	273252	421430	300369	527499	264717
6706	145136	133271	225762	155725	271795	120799
6708	749594	765753	939514	799544	1017205	782766
6714	153567	127521	111146	122406	117554	113848
6715	163397	119155	107492	130892	102291	104856
6716	249418	150848	149413	161135	176276	148068
6719	290149	244181	263262	252213	290813	253452
6721	154719	149143	165725	150055	181224	149787
6722	332369	295194	256595	280674	255444	260363
6725	100256	84677	123907	87712	144726	84253
6727	123888	126676	134450	126714	140421	127761
6912	72538	68570	74067	60259	85953	65405
7046	244937	183805	190905	179225	214294	183805
7120	232440	236187	236484	234799	236295	235710
7121	103094	101652	100982	100875	102159	102757
7124	457488	411422	502838	489741	487331	426954
7208	367742	313492	419220	402650	405600	313492
7209	203594	210636	266692	229155	279003	210636
7317	69103	48222	58243	53877	69533	52964
7319	383164	382296	429937	409756	425884	366332
7320	246822	237191	276765	263944	275206	243485

En el Cuadro 5 se puede observar que para los 21 experimentos analizados en este trabajo, se obtuvo que el modelo de mayor frecuencia de mejor ajuste fue el cúbico, pues fue el mejor en seis experimentos; seguido del modelo de exponentes 0.25, 0.5 y 1, el cual se ajustó mejor en cinco experimentos. El modelo de regresión de menor frecuencia fue el raíz cuadrada, pues se ajustó mejor en sólo un experimento.

El modelo cuadrático fue el mejor en cuatro casos, lo que equivale a 19 % de los experimentos.

Cuadro 5. Frecuencia de mejor ajuste de los diferentes modelos de regresión probados en los 21 experimentos.

Frecuencia de mejor ajuste	Porcentaje	Modelos
6	28.6	cúbico
5	23.8	exp. 0.25, 0.5 y 1
4	19.0	cuadrático
3	14.3	exp. 0.75 y 1.5
2	9.5	exp. 0.25 y 0.5
1	4.8	raíz cuadrada
Total	21	100.0

Es necesario destacar el hecho de que aquellos modelos matemáticos en donde la variable nitrógeno se eleva a tres exponentes diferentes, como son los casos del modelo cúbico (donde el N se eleva a los exponentes 1, 2 y 3) y del modelo de exponentes 0.25, 0.5 y 1; fueron los que tuvieron un comportamiento superior a aquellos modelos en donde la variable N se eleva sólo a dos exponentes como es el caso del modelo cuadrático, donde N se eleva a los exponentes 1 y 2.

Los dos modelos con tres exponentes fueron los mejores en 11 (52.4 %) de los 21 experimentos estudiados. Es probable que lo anterior se deba a que tres exponentes logran una curva con un punto de inflexión, consiguiendo así un mejor ajuste a fenómenos que tienen este tipo de comportamiento, como es el caso frecuente de respuestas del rendimiento de los cultivos a la fertilización en suelos muy pobres en nutrientes, suelos fijadores y a veces cuando ocurre sequía. Este tipo de curvas no es posible lograrlas con modelos con sólo dos exponentes como son los casos de los modelos cuadrático y raíz cuadrada.

Estimación de las DOE de Nitrógeno Mediante el Modelo de Regresión Seleccionado para Cada Experimento

Con el modelo de regresión, seleccionado como el mejor para cada experimento, se generaron las DOE de N utilizando el criterio de capital ilimitado. Se consideró el valor de \$ 1500 como precio del kilogramo de N, utilizando como fuente a la urea y un valor de \$ 750 para el kilogramo de maíz, lo que originó una relación de precios insumo/producto igual a 2.

Para estimar las DOE de N se hizo uso de un procedimiento desarrollado por Martínez (1972) y que en la versión para SAS se encuentra en Rebolledo (1998), que consiste básicamente en calcular, con base en un modelo de regresión, el rendimiento de cierto número de dosis de N dentro de los espacios de exploración estudiados; al contar con el rendimiento estimado por el modelo se calcula el ingreso neto con base en ingreso y costos totales, siendo el óptimo económico la dosis de N que origina el mayor ingreso neto. En el programa utilizado las dosis de N se hicieron variar en incrementos de 5 kilogramos.

Las DOE estimadas para los 21 experimentos por los diferentes modelos de regresión ajustados a cada uno de ellos se muestran en el Cuadro 6, donde es posible observar la existencia de notables diferencias entre las DOE generadas para un mismo experimento por los seis modelos estimados.

Como ejemplo se señala el caso del experimento 6714, en donde las DOE de N estimadas van desde 87 a 198 kg ha⁻¹, siendo la DOE más adecuada para ese sitio experimental de 135 kg ha⁻¹ de N (destacada en negrita en el Cuadro 6), pues es la estimada por el mejor modelo generado para ese experimento.

Al observar el caso del experimento 7046, el cual como se señaló antes originó valores del R² similarmente altos para los seis modelos que se le ajustaron, se aprecia ahora que los valores de las DOE de N estimadas por los seis modelos son notoriamente diferentes, pues fluctúan entre 156 y 231 kg ha⁻¹ de N.

En el resto de los experimentos se pueden también observar grandes diferencias entre las DOE estimadas por los modelos que se les ajustaron, lo que reafirma la necesidad de otorgar un mayor cuidado al procedimiento de selección del modelo más adecuado para un sitio experimental ya que sólo de esta forma se

Cuadro 6. Dosis óptimas económicas en kg ha⁻¹ de N (DOE) estimadas por cada modelo en cada uno de los 21 experimentos.

Experimento	Modelos					
	cuadrático	cúbico	raíz cuadr.	exp.0.75,1.5	exp.0.25,0.5	exp.0.25,0.5,1
6705	237	210	255	228	366	216
6706	228	207	252	219	360	207
6708	243	243	351	273	360	231
6714	198	147	135	171	87	138
6715	150	108	87	126	36	45
6716	228	171	225	216	336	213
6719	198	150	162	180	165	171
6721	192	165	171	180	216	174
6722	231	171	207	216	240	216
6725	216	204	300	225	300	213
6727	177	177	99	144	63	156
6912	171	165	231	177	231	183
7046	171	156	207	174	231	174
7120	189	171	201	201	201	171
7121	120	93	75	102	33	99
7124	115	99	117	117	117	102
7208	156	132	156	156	156	132
7209	123	123	150	147	150	120
7317	108	90	102	105	117	102
7319	126	114	129	129	129	114
7320	129	114	132	132	132	120
Promedio	175	153	178	172	192	157

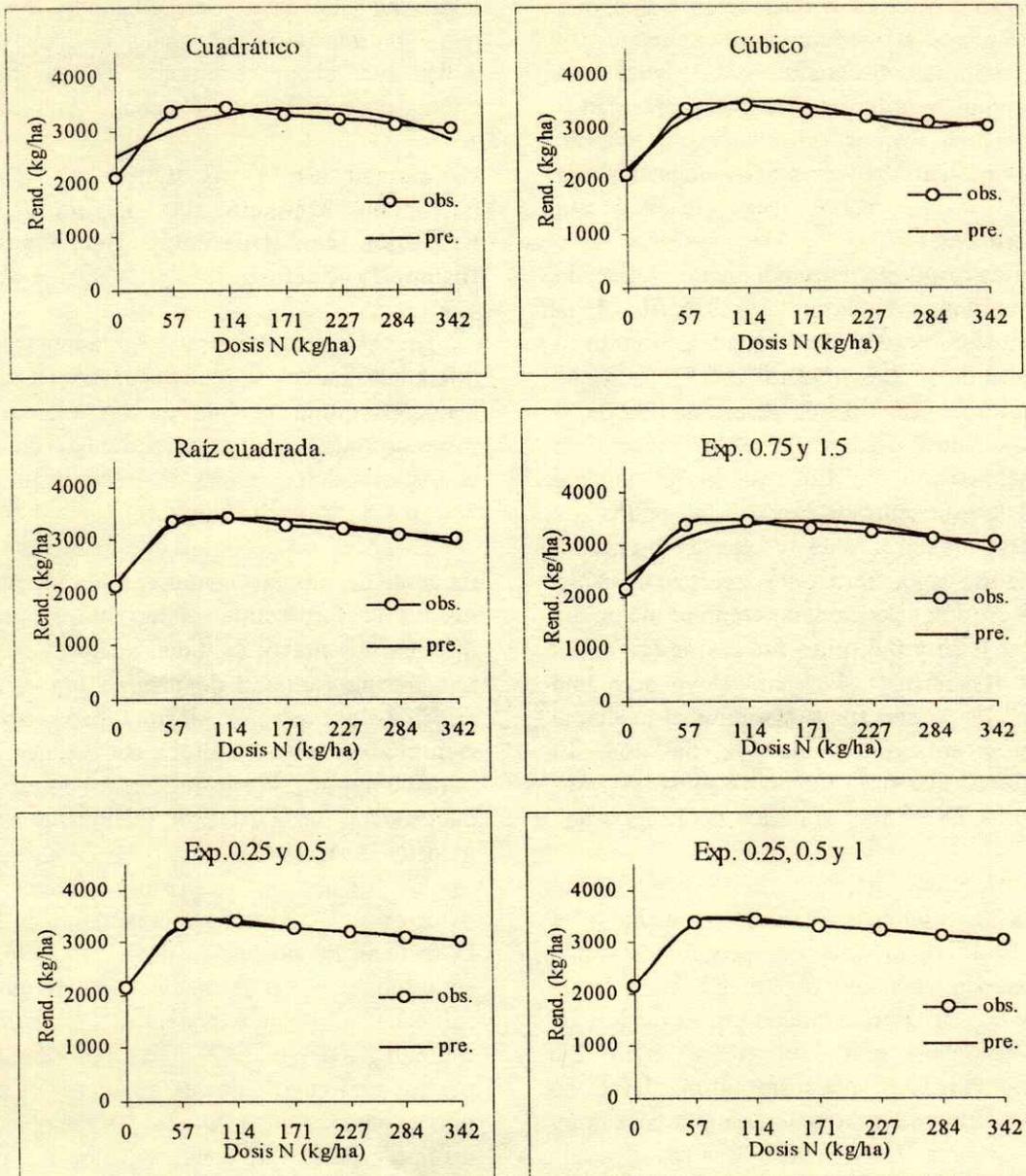


Figura 3. Gráficas de la respuesta observada (obs.) en el experimento 6715 y las respuestas estimadas (pre.) por cada uno de los seis modelos probados en ese experimento.

tendrá mayor seguridad de estar generando DOE más precisas.

La DOE de N más adecuada para cada sitio experimental, que fue estimada por el mejor modelo generado para cada experimento, se indica en negrita; de esta forma se señala que, por ejemplo, para el experimento 7046 la DOE más adecuada es de 174 kg ha⁻¹ de N.

Con el objeto de observar las formas de las respuestas del rendimiento de maíz generadas por cada

modelo, se procedió a calcular, para cada experimento, los rendimientos de maíz estimados por los modelos de regresión con los diferentes niveles de N, para posteriormente graficarlos. En la Figura 3 se presentan seis gráficas correspondientes al experimento 6715. En cada gráfica aparecen dos curvas, una de ellas corresponde a la respuesta del rendimiento del maíz observada experimentalmente (señalada con obs.) y la otra curva corresponde a la forma de la respuesta estimada por el modelo de regresión correspondiente

(señalada con pre.). El mejor modelo es aquel que estima una respuesta del rendimiento de maíz más parecida a la respuesta observada; en la Figura 3 es posible notar como los diferentes modelos calculados originaron diferentes formas de respuestas, y sólo algunos modelos pudieron representar de mejor manera que otros, esto es con menor sesgo, la respuesta observada experimentalmente.

En la curva de respuesta del rendimiento observada se nota que el rendimiento máximo está alrededor de la dosis 57 kg ha^{-1} de N, para posteriormente disminuir al aumentar la dosis de N. Los modelos de regresión que mejor se ajustaron a este tipo de respuesta fueron el modelo de exponentes 0.25 y 0.5 y el modelo de exponentes 0.25, 0.5 y 1. En cambio, el modelo cuadrático y el de exponentes 0.75 y 1.5 fueron los que de peor forma se ajustaron a la respuesta observada, pues tuvieron alto sesgo. Para este experimento 6715 el modelo de regresión seleccionado como el mejor fue el de exponentes 0.25 y 0.5, pues fue el que originó el menor CMDR (Cuadro 4). Este modelo generó una DOE 36 kg ha^{-1} de N, cercana a la estimada mediante el procedimiento gráfico que fue de 57 kg ha^{-1} de N. El modelo cuadrático, que tuvo un pobre ajuste a estos datos, generó una DOE muy superior de 150 kg ha^{-1} de N.

Como se mencionó antes, a cada experimento previamente se le estimó su DOE de N mediante el procedimiento gráfico, la que fue considerada como DOE de referencia con el objeto de compararla posteriormente con la DOE estimada por el modelo de regresión seleccionado como el mejor para ese experimento, se consideró que esta última DOE no debería ser muy diferente a la generada con base en el procedimiento gráfico. En el Cuadro 2 se muestra que ambas DOE para cada experimento resultaron ser muy similares, confirmando esto el hecho de que el estimar previamente la DOE mediante el procedimiento gráfico es una práctica recomendable, pues aumenta la

seguridad de estar seleccionando un modelo de regresión adecuado, además que, como se dijo antes, indica que el procedimiento gráfico es una buena alternativa para estimar óptimos económicos.

Estimación de Dosis Óptimas Económicas de Nitrógeno Mediante los Diversos Modelos de Regresión con Diferentes Relaciones de Precio Insumo/Producto

Con el objeto de observar que tan sensibles son los diferentes modelos para estimar DOE de N más pequeñas en la medida que la relación de precios insumo/producto aumenta, se realizaron estos cálculos con valores de relaciones de precio insumo/producto de 2, 4, 6 y 8.

Es necesario recordar que mientras más alta es la relación de precios insumo/producto, más costoso le resulta el fertilizante al agricultor, pues tiene que destinar una mayor cantidad de producto para adquirir una misma cantidad de insumo (en este trabajo una relación de precios insumo/producto de valor 2 significa que el agricultor debe vender 2 kg de maíz para comprar 1 kg de nitrógeno) y, en consecuencia, menor debe ser la DOE de fertilizante estimada por el modelo de regresión.

En el Cuadro 7 es posible apreciar que todos los modelos estiman DOE de N menores en la medida que la relación de precios insumos/producto aumenta, sin embargo, también se puede apreciar que los modelos raíz cuadrada y de exponentes 0.25 y 0.5 son los que estiman las DOE de N más altas con la relación de precios real cuyo valor es 2 y generan las DOE de N más bajas cuando la relación de precios insumo/producto aumenta al valor 8. Posiblemente la explicación sea que estos modelos son los que originan una mayor pendiente en la curva de respuesta del rendimiento, lo que ocasiona que estimen DOE más altas con relaciones de precio insumo/producto bajas,

Cuadro 7. DOE de N (kg ha^{-1}) promedio de los 21 experimentos, estimadas por los seis modelos probados, con diferentes relaciones de precio insumo/producto.[†]

Relación de precios insumo/producto	Modelos					
	cuadrático	cúbico	raíz cuadr.	exp.0.75,1.5	exp.0.25,0.5	exp.0.25,0.5,1
2	174	153	178	172	191	157
4	159	138	145	152	152	135
6	141	125	119	133	119	120
8	124	113	100	117	96	104

[†] La relación de precios insumo/producto real al momento de hacer este trabajo tenía valor 2.

Cuadro 8. Pérdidas económicas que ocurrirían al estimar las DOE de N con base en un modelo de regresión inadecuado.

Modelo usado para estimar DOE	Experimentos				
	6705	6708	6715	7124	7046
	El modelo seleccionado como mejor es:				
	exp.0.25,0.5,1	cuadrático	exp.0.25,0.5	cúbico	exp.0.75, 1.5
	Pérdidas económicas (\$ ha ⁻¹)				
Cuadrático	18,737	0	218,425	298,583	940
Cúbico	1,487	0	116,933	0	26,306
Raiz cuadrada	60,587	677,525	70,979	213,165	74,230
Exp..75 y 1.5	3,737	52,775	159,298	213,165	0
Exp..25 y .5	721,487	795,275	0	213,165	218,491
Exp..25, .5 y 1	0	11,525	4,271	3,418	0

situación en que la pendiente de costos variables es menor por lo que hace tangente en un punto alto de la curva de respuesta; pero en la medida que la pendiente de costos variables se hace mayor al incrementarse la relación de precios insumo/producto, ésta hace tangente en un punto cada vez mas bajo de la curva de respuesta.

Algunas Consideraciones Económicas al Generar DOE con Base en Modelos Inadecuados

Al calcular los ingresos netos (IN) por hectárea se encontró que cuando en un sitio experimental se utiliza la DOE de N estimada por el modelo de regresión que fue seleccionado como el mejor para ese experimento, los IN fueron más altos que cuando se utilizan las DOE de N estimadas por los otros modelos menos adecuados para ese sitio experimental.

Este hecho implica que si un agricultor aplica a su cultivo DOE de N incorrectas, pues han sido generadas haciendo uso de modelos matemáticos inadecuados, podría tener pérdidas económicas o en el mejor de los casos obtendría IN menores a los que obtendría si aplicara la DOE estimada por el modelo matemático que tuvo mejor ajuste a los datos experimentales y que fue seleccionado como el mejor para ese sitio experimental.

En el Cuadro 8 se muestran los resultados de algunos experimentos, por ejemplo se tiene el caso del experimento 6715, en donde el modelo seleccionado como el mejor fue el de exponentes 0.25 y 0.5; este modelo estimó una DOE de 36 kg ha⁻¹ de N, sin embargo, cuando la DOE de N aplicada al cultivo es estimada utilizando un modelo inadecuado para ese sitio experimental, como es el caso del modelo

cuadrático, el cual generó una DOE de 150 kg ha⁻¹ de N, los IN resultantes son significativamente menores, lo que origina una pérdida de \$ 218 425 por hectárea.

CONCLUSIONES

1. El tipo de modelo de regresión generado, con base en un conjunto de datos experimentales, tiene una importancia fundamental en la magnitud de las DOE estimadas.
2. Es recomendable estimar varios modelos diferentes a un conjunto de datos experimentales, y seleccionar el mejor, para tener así mayor seguridad de contar con un modelo más adecuado.
2. El realizar recomendaciones de fertilización utilizando modelos de regresión inadecuados, puede ocasionar pérdidas económicas a un agricultor.

LITERATURA CITADA

- Berardo D'Amico, A. Turrent y R. Nuñez. 1972. Estudio empírico de la contribución de algunos modelos y matrices experimentales sobre el sesgo al aproximar superficies de respuesta con dos factores. *Agrociencia* 7: 125-147. Colegio de Postgraduados. Chapingo. México.
- Cerrato, M.E. y A.M. Blakmer. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82: 138-143.
- Colwell, J.D. 1983. Fertilizer requirements. pp. 795-815. *In: Soils: An Australian viewpoint*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Division of Soils. Canberra, Australia.
- Heady, E. y J.L. Dillon. 1961. *Agricultural production functions*. Iowa State University Press. Ames. Iowa.
- Hernández, R.E., A. Turrent e I. Mendez. 1973. El modelo aproximativo y la matriz experimental como factores que influyen sobre el sesgo, al aproximar superficies de

- respuesta a dos factores. *Agrociencia* 14: 81-101. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Martínez, G.A. 1972. Aspectos económicos del diseño y análisis de experimentos. Centro de Estadística y Cálculo. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Rebolledo R., H.H. 1991. Metodología para estimar funciones generalizadas de producción, con fines de generar recomendaciones; considerando factores de suelo, clima, manejo y el riesgo climático. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Rebolledo R., H.H. 1998. SAS en microcomputadora. Análisis estadístico de datos experimentales. 7a edición. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Tejeda, H. 1964. Estimación de la dosis económicamente óptima de nitrógeno en trigo. *Fitotecnia Latinoamericana* 1-2.
- Turrent F., A. 1968. Empirical relationships between yield of experimentally grown corn and some environmental factors in Iowa. Tesis Ph.D. Iowa State University. Ames.
- Volke Haller, V. 1977. Generación de tecnología para la agricultura de temporal y subsistencia. El caso del maíz en la región del Plan Puebla. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Volke H., V. 1981. Estimación de funciones de producción mediante regresión en experimentos con fertilizantes y densidad de plantas, con fines de determinación de óptimos económicos. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

COMPORTAMIENTO DE LA PALMA DE COCO EN CINCO SISTEMAS DE PRODUCCION DEL ESTADO DE COLIMA, MEXICO

Behavior of Coconut Palm in Five Agricultural Systems of Colima State, Mexico

Eleazar Ordáz Ordáz¹ y Octavio Pérez Zamora²

RESUMEN

Durante el período de 1985 a 1990 se registró la producción de copra en cinco sistemas de producción de palma de coco. El objetivo fue estudiar la respuesta del cultivo de coco en dichos sistemas. Las plantas (1521) se seleccionaron bajo criterio de competencia completa. El diseño experimental fue completamente al azar, con cinco tratamientos (sistema o rancho) experimentales con diferente número de repeticiones por tratamiento. Los sistemas fueron: 1. Asociación Palma (ASO) + Limón (L) (densidad media) + Manejo deficiente (ASO-LM-MD), 2. ASO+L (baja densidad)+MD (ASO-LB-MD), 3. ASO + Pasto con manejo adecuado (ASO-P-MA), 4. ASO+Limón (alta densidad)+ MA (ASO-LA-MA) y 5. Unicultivo de coco con manejo deficiente (NASO-MD). Los resultados mostraron relación ($P < 0.05$) entre sistema de producción y el rendimiento de copra; en todos los sistemas, la producción fue superior a la media regional (10 kg copra palma⁻¹ año⁻¹). En Sistemas 2 y 4 (27.2 kg palma⁻¹ año⁻¹) se observó más producción y porcentaje de individuos altamente productivos (>33 kg de copra) que en tratamiento 5 (23.8 kg). En sistemas con mejor manejo (2, 3 y 4) se observó mayor número de individuos altamente rendidores (>35.0 kg copra palma⁻¹ año⁻¹), los cuales tuvieron 28, 15 y 26 palmas, respectivamente. Los coeficientes de determinación del análisis de regresión múltiple fueron mayores que 60 % en todos los sistemas, mientras que el global fue de 64.1 %. La ecuación de predicción resultante fue: $Y = 7.818 + 0.1414 X_1 + 0.077 X_2$ donde Y es el rendimiento estimado (kg copra palma⁻¹ año⁻¹), X_1 el número de cocos palma⁻¹ y X_2 el peso de pulpa por nuez.

¹ Programa de Palma de coco. ² Programa de Cítricos. Campo Experimental Tecomán. Apartado Postal 88, 28030 Tecomán, Col., México.

Aceptado: Julio de 1998.

Palabras clave: Sistema producción, asociación, densidades población, plantas seleccionadas.

SUMMARY

During the 1985 to 1990 period, copra yield was registered in five representative agricultural production systems of Colima coastal plains, Mexico. The objective was to study the behavior of a coconut plantation in such farming systems. For this, 1521 plants under complete plant competition were selected. The experimental design was a completely randomized; where each farm or ranch was the experimental system treatment under study. The treatments were 1) Association (ASO) of coconut + Lemon (L) tree (having half of plant density ha⁻¹ recommended) + low management, to be designed as ASO-LM-MD, 2) ASO + L (low plant density ha⁻¹) + MD to be named as ASO-LB-MD, 3) ASO + Grassland well managed or ASO-P+MA, 4) ASO + L (high plant density ha⁻¹) + MA designed as ASO-LA-MA, and 5) coconut as monoculture (NASO) with inadequate management (MD) or NASO-MD. Findings showed relationship ($P < 0.05$) between the farming systems and copra yield; average yield of the systems was considerable higher than the average yield (10 kg per palm tree) of the region. Systems 2 and 4 yielded 27.2 kg, besides a higher number of trees yielding >33 kg than in treatment 5 were found; this averaged 23.8 kg. The number of individual palm trees yielding 35 kg or more were 28, 15 and 26 for treatments 2, 3, and 4, respectively. Regression coefficient for the whole population >64 %, and for the individual farming system above 60 %. The resulting multiple regression for all combined farming systems was $Y = 7.818 + 0.1414 X_1 + 0.077 X_2$, where Y is the copra yield per tree per year and X_1 is the number of nuts per tree and X_2 is the copra weight per nut.

Index words: Production system, association, plant density, selected plants.

INTRODUCCION

En el trópico mexicano se estiman alrededor de 169 000 ha plantadas con coco, de las cuales aproximadamente 17 % (28 730 ha) se localizan en el estado de Colima (Piña, 1998). A diferencia de otras regiones productoras, en esta entidad se explota bajo condiciones de riego e intercalado con otros cultivos. Colima ocupa el segundo lugar nacional de producción por hectárea (1.3 t), lo cual representa un volumen de 37 349 toneladas (Ramírez y Piña, 1998), sin embargo, 98 % de las plantaciones son de palmas altas o criollos y 2 % de palmas enanas (Zizumbo *et al.*, 1993).

El cultivo del cocotero en el estado de Colima es muy antiguo, ya que existen palmeras en huertos familiares del siglo pasado, así como plantaciones comerciales de 70 y 80 años de edad (Harries, 1971; Pelayo, 1984; Zizumbo, 1996). Colima se ha identificado como un estado coprero, sin embargo, en los últimos años no ha existido incremento en la superficie cultivada con cocotero y las actividades propias para el manejo del cultivo tendientes a incrementar la productividad han sido nulas (Castañeda, 1984; Hernández, 1984; Ordáz, 1984).

En la actualidad existe tecnología generada principalmente por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) que puede resolver los problemas más importantes de la palma de coco (Ordáz, 1984; Domínguez, 1998). Se cuenta con tecnología para el control de mayate prieto (*Rhynchophorus palmarum* L.) y el ácaro del cocotero [*Eriophyes guerrenonis* (k)], la enfermedad anillo rojo causado por el nemátodo [*Rhadinaphelenchus cocophilus* (Cobb)] y otras más. En tecnología de producción se han obtenido respuestas satisfactorias sobre: fertilización, sistemas de producción palma-plátano, palma-limón y palma-pastos. En síntesis, existe tecnología de producción que puede reducir la brecha entre la producción potencial y actual; sin embargo, son los bajos precios de la copra y el poco apoyo hacia el cultivo los que propician la desaparición de las plantaciones de coco en el país (Pelayo, 1984; Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. SARH, 1991; Domínguez, 1998; Piña, 1998).

Mediante la puesta en práctica de los paquetes tecnológicos existentes, principalmente riego y fertilización, Colima tiene potencial para producir

74 690 t de copra año⁻¹ (Ramírez y Piña, 1998), además de promoción e introducción de nuevas tecnologías generadas por los centros de investigación, tal como uso de variedades mejoradas y sustitución de palmas muertas, (Ordáz, 1984; Pelayo, 1984; Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. SARH, 1991; Been, 1995).

En los países en desarrollo, entre los que se encuentra México, se ha podido observar que la mayoría de los agricultores siguen un proceso de aprendizaje cauteloso cuando adoptan alguna(s) práctica(s) nueva(s) y, que rara vez aceptan realizar cambios drásticos que afecten su sistema de producción (Byerlee y Hesse, 1982). Por el contrario, ellos proceden de manera secuencial, adoptando pocos (o mínimos) insumos y prácticas al mismo tiempo. Esto reviste particular importancia en el estado de Colima, ya que la palma de coco se explota en forma asociada con otros frutales, principalmente limón y plátano en 78 % del área total cultivada y en asociación con otras especies de frutales o con pastos en el 22 % restante (Ordáz, 1984). En opinión de este investigador, la asociación del cocotero conlleva una serie de limitantes para la producción de ambos cultivos, limonero y palma, entre los que se encuentran competencia por luz, agua y nutrimentos.

El cocotero al igual que otras especies, ya sean perennes o anuales, pueden explotarse intercalados con otros cultivos. En la India y Malasia, los cocotereros se intercalan con cultivos anuales como con árboles frutales mango, cítricos, y bananos y, los resultados en la economía del productor son muy favorables (Kass, 1978). Aunque las condiciones varían de un país a otro, se considera que los motivos para utilizar cultivos intercalados son los mismos, y se sustentan en razones económicas, ya sea que éstas se expresen en términos de aumento en la producción, ahorro de la mano de obra o de gastos al cultivarlos (Gómez y Gómez, 1983; Ordáz, 1984; Gliessman, 1990).

El uso de cultivos intercalados en cocotero es justificable siempre y cuando se respete el área de mayor actividad radicular de esta especie; cuando esto se realiza y se deja al menos un radio de 1 m del tronco de la palma de coco, se puede intercalar cualquier otro cultivo de preferencia anual, y si es perenne, se debe cuantificar el desarrollo radicular del cultivo asociado para que no exista interferencia con el cocotero (Gómez y Gómez, 1983; Ordáz, 1984; Domínguez, 1998).

En el estado de Colima, el cultivo de la palma de coco se estableció primero que los frutales, las razones que llevaron a los productores a ejecutar la asociación, fueron lograr un mejor aprovechamiento del terreno y no depender de un solo cultivo y aumentar la actividad agrícola por un período de tiempo más prolongado (Pelayo, 1984). Cuando se asoció otro cultivo con las palmeras, generalmente se incrementó la producción de copra (Ordáz, 1984), esto como resultado de un manejo agronómico adecuado del cultivo intercalado. Lo anterior indica que los rendimientos de copra pueden mejorarse de manera substancial si se aplica la tecnología generada por las instituciones de investigación.

Bajo lo anterior expuesto, el objetivo del presente trabajo fue el de estudiar palmas seleccionadas en plantaciones de coco representativas del estado de Colima y que se desarrollan en diferentes sistemas de producción.

Otro objetivo es que dichas palmas sirvan de base como progenitores, con características deseables, en cruzamientos genéticos con palmas tolerantes al Amarillamiento Letal del Cocotero (enanas malayo) pero que son poco productivas.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se inició en 1985 y terminó en 1990. Se realizó en sitios preseleccionados por el INIFAP, donde se realizaban estudios de selección de palmas con alto potencial de producción utilizando los principios de selección masal (Márquez, 1986). Los predios estaban ubicados en los ranchos Santa Anita (SA) del Sr. Sergio Verduzco, Los Desmontes (LD) de la Familia Pérez de la Torre, Santa María (SM) del Sr. Mario Díaz Risso, De Gómez (DG) de los Hermanos Gómez, y La Gloria (LG) del Sr. Solórzano. La ubicación de los ranchos se presenta en la Figura 1.

Sistemas de Producción o Manejo

Los sistemas de producción que se definieron fueron: coco asociado con limón (población media, 50 árboles de limón y 80 palmas ha^{-1} , respectivamente) con manejo deficiente (ASO-LM-MD) o Sistema 1 (SA). Las plantas de limón mostraban poco desarrollo y el manejo del huerto consistió en dos pasos de rastra y cuatro riegos por año, y sin fertilizar.

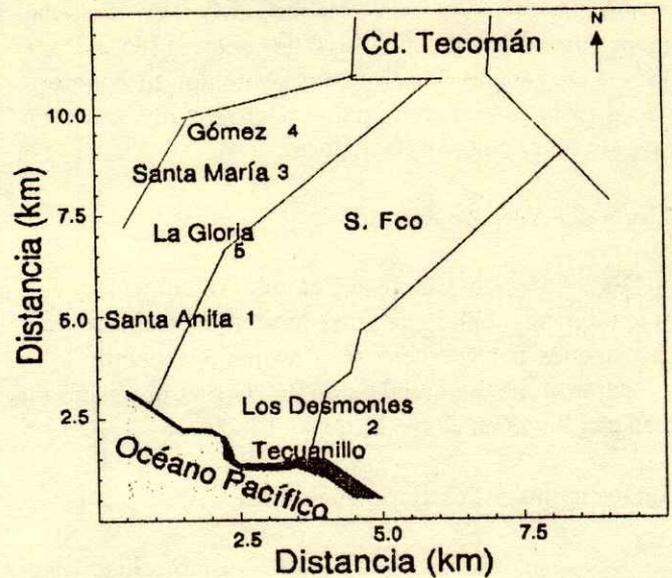


Figura 1. Localización de los sitios experimentales.

En el Sistema 2, rancho LD, la asociación fue palma + 25 % de plantas de limón adultas (bajas densidades, que correspondió a 85 y 25 plantas ha^{-1} de palma de coco y limón, respectivamente); una plantación normal de limonero es aquella que se planta con limón joven al 100 % de intercalación entre palma de coco. El manejo consistió en control de malezas, mediante dos pasos de desvaradora y dos pasos de rastra; con riegos (siete riegos por año), pero sin fertilizar.

El Sistema 3, ubicado en el rancho SM fue palma + pasto + ganado con manejo adecuado (ASO-P-MA); la densidad de plantación fue de 80 palmas ha^{-1} ; el pasto se fertilizó tres veces al año, mezclando 400 kg de sulfato de amonio y 50 kg de sulfato de potasio, el cual se asperjó con espolvoreadora mecánica accionada con tractor; se le proporcionaron de 10 a 12 riegos (inundación completa) por año.

En el rancho DG, el Sistema 4 de producción fue palma de coco + limón en forma completa. (Quiere decir que esta asociación es al 100 %, o sea una palma de coco y una de limonero plantado sobre la misma hilera, que correspondió a 100 y 85 plantas de limón y coco ha^{-1} , respectivamente.) En la fertilización se aplicaron 2 kg de fertilizante comercial (sulfato de amonio al 20 %) por árbol de limón cada tres meses; además, se le dieron cuatro pasos de rastra para el control de maleza y bordeos para suministrarle seis riegos al año.

Finalmente, en el rancho LG el Sistema de producción 5 fue unicultivo de cocotero (85 palmas ha⁻¹). Este rancho fue el menos atendido, en cuanto a riegos (sólo se le dieron cuatro riegos), y dos pasos de rastra y no se controló la maleza.

Clima del Area de Estudio

El clima del área es cálido subhúmedo, con precipitación anual de 689 mm (satisfaciendo las necesidades del cocotero sólo de junio a octubre); la temperatura media anual es de 26 °C y el promedio de días con lluvia en el año es de 47.1.

Suelos de los Sitios Experimentales

Los suelos donde están establecidas las plantaciones son débilmente desarrollados y provienen de materiales no consolidados (Regosoles); son de textura Franca arenosa en todo el perfil, con buen drenaje superficial e interno, permeabilidad de moderada a rápida, pendiente de 1 a 2 %, manto freático no apreciable, humedad aprovechable de 8 al 10 %; el modo de formación del suelo es secundario. El pH tiene valores de ligeramente alcalino a alcalino; el porcentaje de saturación de bases es mayor que 90 %, con altos contenidos de Ca y Mg, y de pobre a medianamente pobre en MO y N.

Arreglo Experimental

Cada rancho se consideró como un lote experimental (Sistema de producción). Con la finalidad de atenuar los efectos de heterogeneidad del suelo, las plantas se tomaron en sublotos (Little y Hills, 1978). Cada sublote fue de 25 palmas bajo criterio de competencia completa; esto con el propósito de que las plantas expresaran su potencial real y no sobreestimarlos debido a la falta de dicha competencia (Ramírez y Pérez, 1995). Otra condición fue que no mostraran síntomas de enfermedades, daños de plagas ni deficiencias nutrimentales. El manejo de los Sistemas de producción fue conforme a las prácticas propias utilizadas por el productor cooperante. En el Sistema 1 (SA) se delimitaron 36 sublotos. En el Sistema 2 (LD), 109 sublotos, en el Sistema 3 (SM) 88 sublotos, en el Sistema 4 (DG) 57 sublotos y en el Sistema 5 (LG) 52 sublotos; esto da un total de

1521 palmas seleccionadas para el estudio. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar.

Mediciones Efectuadas

Se registró el tipo de manejo, períodos de corte, número de cocos por palma por año, peso de copra por nuez, peso de copra (kg) por palma por año. También se registró el número de cocos caídos antes de cada corte, lo cual se realizaba con una frecuencia de cuatro meses en los Sistemas de producción 2, 4 y 5; en el Sistema 1 cada tres meses y en el Sistema 3 cada seis meses.

El rendimiento de copra por palma se estimó con base en una muestra de cinco frutos por planta por corte, la cual se multiplicó por el número total de cocos. Después de estimar el peso obtenido por palma por año y por lote, se ajustó el peso de copra por planta utilizando la fórmula de Márquez (1986), la cual se indica a continuación:

$\bar{y}_{ij} = \bar{y} \dots + (\bar{y}_i - \bar{y} \dots) + (y_{ij} - \bar{y}_i)$: en la cual:

\bar{y}_{ij} = rendimiento ajustado de la planta j del sublote i

y_{ij} = rendimiento *no ajustado* de la misma planta

\bar{y}_i = la media de todas las plantas del sublote i

$\bar{y} \dots$ = es la media de todas las plantas de todo el lote

$(\bar{y}_i - \bar{y} \dots)$ = efecto entre sublotos (heterogeneidad del suelo)

$(y_{ij} - \bar{y}_i)$ = efecto dentro del sublote (variabilidad genética)

Análisis de la Información

Los datos se procesaron mediante el paquete estadístico COHORT3 Berkely, CA (1994); además se realizó análisis de regresión lineal múltiple para cada uno de los ranchos y total, mediante el modelo

$Y_i = b_0 + b_1 X_1, b_2 X_2$, donde:

Y_i = rendimiento estimado kg copra palma⁻¹ año⁻¹

b_0 = constante

X_1 = Variable independiente o número de cocos por palma

b_1 = Coeficiente de X_1

RESULTADOS Y DISCUSION

De 1521 plantas marcadas en el estudio, 80 (5.5 %) resultaron muertas a causa de rayos

ocurridos durante las tormentas eléctricas, ataques de plagas o enfermedad; el número de palmas muertas en el Sistema 1 fue 6 (5.2 %), 30 palmas (5.8 %) en el Sistema 2, 15 (4.41 %) en el Sistema 3, de nueve palmas (3.72 %) en el Sistema 4 y de 20 (8.6 %) en el Sistema 5.

Número de Cocos por Palma

En el Cuadro 1 se muestran los parámetros estadísticos observados en cada uno de los Sistemas de producción. El número promedio de cocos por palma⁻¹ año⁻¹ durante los cinco años (de los cinco sistemas) fue de 120.8, y los valores promedio por sistema fueron de 126.8, 123.11, 118.2, 132.8 y 103.9 cocos palma⁻¹ año⁻¹ para los Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente. El máximo (245 cocos) se registró en el Sistema 1 y el mínimo (35 cocos) en el Sistema 5; sin embargo, sólo tres palmas se encontraron en el rango de 30 a 50 cocos palma⁻¹ año⁻¹ en el Sistema 5. Similarmente, para el número máximo de cocos, sólo una palma se encontró en el intervalo de 245 a 260 cocos por palma por año.

El 95.03 % de la población (acumulada) se encontró debajo del intervalo de 140 a 155 cocos palma⁻¹ en el rancho LG o Sistema 5, lo cual

correspondió a 217 palmas y sólo 15 palmas produjeron arriba del intervalo (140 a 155) citado. Los valores observados guardaron relación con el manejo dado al huerto en el Sistema 5, no obstante que el sistema era unicultivo. En contraste, los Sistemas 1 y 4 (SA y DG) mostraron mayor número de cocos palma⁻¹ en los intervalos de clase superiores, y su comportamiento fue similar entre ellos; de esta manera, en el Sistema 1 (SA) 95 % de la población se encontró por debajo del intervalo 170 a 185 cocos por palma año⁻¹ y correspondió a una población de 106 palmas; por arriba de este intervalo (5 %) sólo se ubicaron 17 palmas. En el Sistema 4 (DG), 233 de las 242 palmas se encontraban debajo del intervalo 170 a 185 cocos por palma año⁻¹ y sólo nueve palmas (5 %) arriba de dicho intervalo. El comportamiento favorable, en cuanto al número de cocos, en el Sistema 1 y Sistema 4 (SA y DG) se explica por el manejo propio de los sistemas.

Un comportamiento intermedio entre el Sistema 1 y 4 se observó en el Sistema 3, en el cual 30 % de la población produjo de 125 a 140 cocos por palma año⁻¹; en éste 95 % de las palmas (323 de 340) se encontraban por debajo del intervalo de clase de 155 a 170 cocos árbol⁻¹ año⁻¹, mientras que el 5 % restante (17) se ubicó por arriba de dicho intervalo.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas (número de cocos año⁻¹, kg copra año⁻¹ árbol⁻¹ y g de copra nuez⁻¹) en diferentes sistemas de producción de palma de coco.

Variable	Sistema	Media	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	Coefficiente de variación %	Prueba de normalidad
No cocos	1.SA	126.80	27.53	59	198	21.72	ns †
	2.LD	123.11	26.63	54	222	21.70	***
	3:SM	118.20	25.26	46	203	21.37	**
	4.DG	132.80	31.94	57	241	24.04	**
	5.LG	103.00	27.27	35	239	26.38	***
kg árbol ⁻¹		120.80	28.78	35	241	23.84	***
	1.SA	26.30	3.82	16	36	14.54	ns
	2.LD	27.12	4.59	14	42	16.94	ns
	3:SM	26.61	4.43	13	41	16.65	ns
	4.DG	27.79	5.83	14	46	20.99	ns
Copra/fruto	5.LG	23.80	5.04	13	39	21.16	ns
		26.51	4.96	13	46	18.72	*
	1.SA	210.80	29.48	140	291	13.98	*
	2.LD	223.10	24.24	135	349	13.11	**
	3:SM	228.20	31.68	144	320	13.88	ns
4.DG		210.70	29.64	143	332	14.07	***
	5.LG	213.30	36.45	134	343	15.76	ns
		222.50	22.54	134	349	14.37	***

† ns = no significancia (tiene distribución normal); *, ** y *** P ≤ 0.05, 0.01 y 0.001, respectivamente (no tienen distribución normal).

Los resultados son significativos, ya que aún en el Sistema de producción que mostró los valores más bajos (Sistema 5) las palmeras produjeron por arriba de la media local que es de 100 cocos palma⁻¹ año⁻¹ ó 25 cocos palma⁻¹ año⁻¹ cada cuatro meses (Ordáz, 1984).

Copra por Nuez

La media global de las 1441 observaciones fue 222.5 g de copra/nuez, con una máxima de 349 g y una mínima de 114 g; ambas se observaron en el Sistema 2. Los valores promedio observados fueron de 210.8, 223.1, 228.7, 210.7 y 213.3 g de copra/nuez para los Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente. La desviación estándar fue homogénea, excepto en el Sistema 2. El rendimiento más alto y más bajo se registraron en una sola palmera, por lo que, al igual que para el número de cocos por palma también se tabuló las frecuencias observadas y los intervalos de clase. Estos variaron en 10 g de 114 a 354, lo cual dio un total de 24 intervalos; éstos a su vez se expresaron en porcentajes acumulativos para número de nueces que alcanzaban un determinado límite de clase.

Para la población (1441 palmas) el intervalo 194 a 204 g registró 251 palmas lo cual representó 17.4 % de la población, 289 palmas (20.1 %) se ubicaron en el rango 204 a 224 y 254 palmas (17.63 %) en el intervalo de 224 a 234 g fruto⁻¹. Estos tres intervalos constituyeron 55.11 % de la población total (1441 palmas).

En lo que respecta a sistemas, en el Sistema 1 (SA) 95 % se encontró por debajo del rango de 244 a 254 g coco⁻¹, mientras que sólo ocho palmas (5 %) se encontraron arriba de este intervalo de clase; aproximadamente 28 % de la población se ubicó en el rango de 204 a 224. En los LD se observó un número de palmas (91 palmas) mayor que 244 a 254 g nuez⁻¹ que en el Sistema 1, y de hecho 5 % (35 palmas) de los cocos produjeron más de 274 g nuez⁻¹. En los Sistemas 3 y 4 (SM y DG) se observó un comportamiento intermedio con respecto a los anteriores; de esta manera, 6.7 y 7.6 % de la población (23 y 21 palmas) produjo más de 274 g de copra nuez⁻¹ en los Sistemas 3 y 4, respectivamente.

El número de palmas que produjeron 274 g copra nuez⁻¹ fue 5 % de la población en el Sistema 5, lo cual fue similar al obtenido en ranchos con mejor manejo (Sistemas 4 y 3); este comportamiento no fue posible

relacionarlo con la información colectada; al respecto, se efectuó análisis de correlación entre cocos por palma y peso por coco, sin embargo, dicha correlación total fue sólo de -0.339.

Rendimiento de Copra por Palma

En el Cuadro 1 se presentan los rendimientos de copra palma⁻¹ año⁻¹, donde se observa que el promedio de las 1441 palmas de los cinco sistemas es de 26.51 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹, el cual es 16.5 kg mayor que la media regional, que tiene valores de 10 a 12 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹ (Ordáz, 1984); sin embargo, los valores máximos y mínimos fueron de 13.0 y 46.0 kg, los cuales se observaron en los Sistemas 5 y 4 (LG y DG), respectivamente (Cuadro 2).

Los valores promedio por Sistema fueron homogéneos en general, excepto para el Sistema 5 (23.8 kg); en los Sistemas 1, 2, 3, y 4 se obtuvieron 26.3, 27.12, 26.6 y 27.79 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Los rendimientos más altos observados en el Sistema 2 y el Sistema 4 resultaron consistentes con los valores de g de copra nuez⁻¹ y número de cocos por palma, así como con el manejo dado a estos sistemas. Esto contrastó con el Sistema 5, el menos atendido (LG). La desviación estándar resultó también homogénea en todos los ranchos, lo cual nos indica que los bloqueos en sublotos para eliminar la heterogeneidad del suelo cumplieron con su objetivo (Márquez, 1986).

Los rendimientos bajos (de 13 a 19 kg) se observaron en una población pequeña; como era de esperar, también pocas palmas produjeron por arriba del intervalo de clase de 37 a 39 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹. Solo tres palmas produjeron de 45 a 47 kg de copra, una de 41 a 43, cinco palmas de 39 a 41 y de 37 a 39 kg sólo ocho palmas.

En el Sistema 1 sólo 14 % de la población (16 palmas) produjo menos de 21 kg; mientras que 26 palmas (22.81 %) produjeron de 21 a 25 kg, 31 palmas (27.19 %) de 25 a 27 kg y 32 palmas (28.07 %) de 29 a 31 kg. Estos tres intervalos constituyeron 78.0 % de la población (rango de 21 a 31.0 kg). Esto suma 89 de las 114 palmas en estudio; este resultado se considera bueno, ya que duplica y triplica la producción regional; esto tiene relación, por supuesto, con el manejo dado al cultivo. Además, indica que hay individuos genéticamente

Cuadro 2. Rango de producción (kg copra palma⁻¹ año⁻¹), número y porcentaje acumulativo de frecuencias en cinco sistemas de producción de palma de coco. Tecomán, Colima.

Rango kg †	Sistema de producción					% Acumulado de frecuencias					
	SA (1)‡	LD (2)	SM (3)	DG (4)	LG (5)	SA (1)	LD (2)	SM (3)	DG (4)	LG (5)	
			Frecuencias								
12 a 16	0	3	2	4	14	0.0	0.6	0.6	1.7	6.0	
16 a 20	5	20	15	13	29	4.4	4.5	5.0	7.0	18.5	
20 a 24	24	82	63	42	71	25.4	20.5	23.5	24.4	49.1	
24 a 28	40	175	120	58	65	60.5	54.6	58.8	48.3	77.2	
28 a 32	37	146	95	61	42	93.0	83.0	86.8	73.6	95.3	
32 a 36	7	67	39	42	8	99.1	96.1	98.2	90.9	98.7	
36 a 40	1	17	4	14	3	100.0	99.4	99.4	96.7	100.0	
40 a 44	0	3	2	5	0	100.0	100.0	100.0	98.8	100.0	
44 a 48	0	0	0	3	0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
Total	114	513	340	242	232						

† Los datos son promedio de cinco años de estudio.

‡ Ranchos: SA = Santa Anita. LD = Los Desmontes. SM = Santa María. DG = De Gómez. LG = La Gloria.

sobresalientes, ya que dos palmas produjeron de 35 a 37 y diez palmas de 31.0 a 33.0 kg copra palma⁻¹.

En el Sistema 5 sólo 57 % (de 232 palmas) produjo de 21 a 31 kg, 61 palmas (26.29 %) produjeron de 22 a 25 kg, 44 (18.97 %) de 25 a 27 kg y por último 29 palmas que representaron 12.5 % de la población produjeron de 29 a 31 kg palma⁻¹. Es de notar, la tendencia en disminución tan marcada en porcentaje, de 26.29, 18.97, a 12.50 % de la población global, muy contrastante con lo que sucede en el Sistema 2, sin embargo, no obstante que este fue el sistema con menos manejo, hubo individuos sobresalientes; esto puede atribuirse a la calidad genética del material, que aún a pesar de encontrarse en condiciones adversas pudo expresar su potencial. En este Sistema 5 (LG) hay nueve palmas que destacan por su rendimiento; en los intervalos de 37 a 39 y de 39 a 41 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹ se identificaron dos palmas, tres se encontraron en el rango de 35 a 37 kg y cuatro palmas produjeron entre 33 y 35 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹.

En el caso del Sistema 3 (SM), se observó distribución altamente concentrada en el rango de 27 a 31 kg de copra; de esta manera, de 21 a 25 kg se tuvieron 59 palmas (17.35 % de la población); de 25 a 29 kg, la población consistió de 98 palmas (28.82 %) y de 29 a 31.0 kg, 81 palmas (23.82 %); estos intervalos componen 69.99 % de la población total de 340 palmas. Una tendencia ligeramente diferente, pero con media de la población un poco mayor (27.12 kg) se observó en los Sistemas 2 y 3 (26.64 kg); sin embargo, la producción de copra palma⁻¹ año⁻¹ en ambos sistemas presentó características sobresalientes

con respecto a la media regional. En el Sistema 5 en el intervalo de 21 a 31 kg se ubicó 67.45 % de la población, lo cual fue 2.59 % menor que en el caso del Sistema 3 (SM). La distribución fue de 120 palmas (23.39 % de la población) en el rango 21 a 25 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹, de 115 palmas (22.42 %) para el intervalo 25 a 29.0 kg y de 111 palmas (21.64 %) el de 29 a 31.0 kg palma⁻¹.

En el Sistema 4 es interesante observar la distribución y contribución de cada intervalo de clase; de 21 a 25.0 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹, se localizaron 43 palmas (17.77 %), de 25 a 29 kg, 47 palmas (19.42 %) y en el intervalo de 31 a 35 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹ el número de palmas fue 44 árboles (18.18 %); estos tres intervalos componen 55.37 % de la población total de 242 palmas estudiadas. Es de notar que 38 individuos (15.70 %) produjeron de 31 a 35.0 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹, lo cual se considera un excelente rendimiento, tomando en cuenta además el hecho que la plantación tiene asociación completa con otro cultivo.

Análisis Estadístico de Rendimiento

El análisis de varianza resultó ($P < 0.05$) significativo para los tratamientos en estudio (Sistemas de producción). Las comparaciones entre medias de los sistemas de producción, para las variables registradas, se muestran en el Cuadro 3. En este cuadro se incluye el cuadrado medio del error experimental y el coeficiente de variación (%) de cada uno de los sistemas.

Cuadro 3. Rendimiento de copra (kg), copra por nuez y cocos por palma en sistemas de producción de palma de coco en Tecomán, Colima.

Sistema producción †	Copra kg árbol ⁻¹	Copra g fruto ⁻¹	Cocos/ palma
1. Santa Anita (SA)	26.29 b	210.85 c	126.8 ab
2. Los Desmontes (LD)	27.11 ab	223.02 b	122.7 bc
3. Santa María (SM)	26.61 b	228.31 ab	118.2 c
4. De Gómez (DG)	27.79 a	210.69 c	132.8 a
5. La Gloria (LG)	23.80 c	231.29 a	103.9 d
Media	26.51	222.51	120.64
√ CME	4.81	31.17	27.46
C.V. (%)	18.13	14.00	22.76

† Los datos corresponden a valores promedio de cinco años de estudio.

En el Cuadro 3 destacan dos situaciones: 1) sistemas de producción con número de cocos palma⁻¹ año⁻¹ por arriba de la media y contenido de copra nuez⁻¹ por arriba de la media, y 2) número de cocos palma⁻¹ año⁻¹ por debajo de la media y cantidad de copra nuez⁻¹, excepcionalmente alta. En esencia, el análisis estadístico corrobora que la variable número de cocos palma⁻¹ año⁻¹ es el factor más importante en la producción de copra palma⁻¹ año⁻¹. Por lo anterior se efectuó el análisis de regresión múltiple, tanto para producción global (media de todos los sistemas en estudio) y cada sistema de producción individual.

El coeficiente de determinación r^2 , para la producción global fue de 64.1 %; en tanto que para los Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5 resultó de 54.7, 61.4, 60.1, 67.9 y 65.8 %, respectivamente. Utilizando la ecuación de regresión lineal múltiple para la población global, con $X_1 = 180$ cocos y $X_2 = 300$ g de pulpa coco⁻¹ se tiene lo siguiente:

$$Y = -7.818 + 0.1414 X_1 + 0.0776 X_2$$

con la cual se estima una producción de 38.74 kg de copra por palma por año. Similarmente, sustituciones como la efectuada para la producción global pueden efectuarse para cada uno de los ranchos en estudio, y estimarse de esta manera el rendimiento con respecto al número de cocos palma⁻¹ año⁻¹ y peso de copra nuez⁻¹.

CONCLUSIONES

1. El manejo dado a cada uno de los sistemas influyó sobre la producción de copra palma⁻¹ año⁻¹, número de cocos palma⁻¹ año⁻¹ y peso de copra nuez⁻¹.
2. Los Sistemas 4 y 2 produjeron más, debido al efecto de la fertilización y riego.

3. Se observaron palmas con más de 25 kg de copra palma⁻¹ año⁻¹ en todos los sistemas, aun cuando el manejo no fue el apropiado. Esto se atribuye a la calidad genética de las palmas en estudio.

4. El rendimiento de copra por palma año⁻¹ en los cinco sistemas fue de 2 a 2.5 veces superior a la media regional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento y gratitud a cada uno de los productores por proporcionar las facilidades para la conducción de los estudios sobre Sistemas de Producción y Selección de Plantas Elite de Palma de Coco.

LITERATURA CITADA

- Been, B.O. 1995. Production advantages of coconut hybrids. pp. 187-194. *In*: C. Oropeza, F.W. Howard y G.R. Ashburner (eds.) Lethal yellowing: Research and practical aspects. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Byerlee, D. y E. Hesse de Polanco. 1982. La tasa y la secuencia de adopción de tecnologías cerealeras mejoradas: El caso de la cebada de secano en el Altiplano Mexicano. Documento de Trabajo 82/6: CIMMYT.
- Castañeda B., G. 1984. Comercialización de la copra. pp. 93-95 *In*: Memorias del primer Seminario sobre el cultivo del coco en el estado de Colima. CONAFRUT, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- COHORT3. 1994. Manual Revision 5, CoHort Software: Statistical Software. P.O. Box 1149. Berkely, CA 94701.
- CONAFRUT, 1982. Programa de desarrollo frutícola del estado de Colima. Documento de Trabajo, Mimeógrafo. Delegación Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Colima, Col.
- Domínguez, C.E. 1998. Logros de investigación del cocotero en México. pp. 35-46. *In*: Memorias de la Primera Reunión Nacional de Palma de Coco. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. SAGAR, México. Acapulco, Gro.
- Gliessman, S.R. 1990. Agroecology. Researching the ecological basis for sustainable agriculture, p 3-10.
- Gómez, A.A. y K.A. Gómez. 1983. Multiple cropping in the humid tropics of Asia, International Development Research Centre. Box 8500, Ottawa, Canada K1G 349.
- Harries, H.C. 1971. Coconut varieties in America. *Oleagineux* 26: 235-242.
- Hernández R., F. 1984. Investigación del germoplasma de palma de coco, para seleccionar plantas reproductoras. pp: 48-60. *In*: Memorias del primer Seminario sobre el cultivo del coco en el estado de Colima. CONAFRUT, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Kass, D.C.L. 1978. Polyculture cropping systems. Review and analysis. *Cornell International Agriculture Bulletin* 32: 69.

- Little, T.M. y F.J. Hills. 1978. Agricultural experimentation. John Wiley and Sons. New York, New York.
- Márquez, 1986. Apuntes de Genotecnia. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx.
- Ordáz, O., E. 1984. Determinación de la tecnología de producción para los sistemas limón-cocotero y plátano-cocotero. pp 79-88 *In*: Memorias del primer Seminario sobre el cultivo del coco en el estado de Colima. CONAFRUT, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Pelayo H., A. 1984. El cultivo de cocotero en Colima y su rehabilitación. pp: 21-24. *In*: Memorias del primer Seminario sobre el cultivo del coco en el estado de Colima. CONAFRUT, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Piña, R.J. 1998. Programa Nacional de Investigación en cocotero. pp. 5-10. *In*: Memorias de la Primera Reunión Nacional de Palma de Coco. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. SAGAR, México. Acapulco, Gro.
- Ramírez-J., G y J. Piña-R. 1998. Areas con potencial para el cultivo del cocotero *Cocos nucifera* L. , bajo condiciones de temporal en la república mexicana estudio de gran visión. pp. 23-33. *In*: Memorias de la Primera Reunión Nacional de Palma de Coco. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. SAGAR, México. Acapulco, Gro
- Ramírez Silva, J.H. y O. Pérez Zamora. 1995. Comportamiento morfológico y estado nutricional del maíz en modelados de un suelo vertisol en Quitana Roo. Agric. Tec. en México 21: 79-101.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. SARH, 1991. Situación de la producción agropecuaria del estado de Colima. Documento de Trabajo. Mimeógrafo. SARH-CIFAP-BANRURAL-FIRA. Colima, Col., Diciembre 1990.
- Zizumbo, D. 1996. History of coconut in Mexico: 1549-1810. Genetic Resources and Crop Evolution 43: 505-515.
- Zizumbo, V. D., F. Hernández-R. y H.C. Harries. 1993. Coconut varieties in Mexico. Economic Botany 47: 65-78.

ZONIFICACION AGROECOLOGICA DEL MAIZ DE TEMPORAL EN LOS VALLES CENTRALES DE OAXACA

I. DETERMINACION DEL POTENCIAL PRODUCTIVO

Agroecological Zoning of Rainfed Maize in the Central Valleys of Oaxaca

I. Yield Potential Determination

Jaime Ruíz Vega ¹

RESUMEN

Con el propósito de delimitar zonas por rendimientos probables de maíz en los Valles Centrales de Oaxaca, se generaron tres modelos de regresión entre los rendimientos de maíz observados en 27 sitios y sus respectivos índices de sequía, los cuales se utilizaron para estimar los rendimientos esperados con lluvia al 70 % de probabilidad en nueve estaciones meteorológicas y seis condiciones edáficas. Los rendimientos se estimaron para el período de siembra óptimo climatológico, el cual se determinó por simulación de fechas de siembra a través de balances hídricos sucesivos. Los rendimientos estimados se extrapolaron a condiciones agroecológicas similares en la región. Se determinaron ocho rangos de rendimiento, los cuales fueron reducidos posteriormente a cuatro al validarlos con rendimientos reportados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Finalmente, se clasificaron todos los municipios de los Valles Centrales con base en los cuatro rangos de rendimiento potencial.

Palabras clave: Zonificación de cultivos, rendimientos de maíz.

SUMMARY

In order to identify zones with different yield potential for rainfed maize in the Central Valleys of Oaxaca, Mexico; three linear regression models were generated between maize yields at 27 locations and a drought stress index. Using rainfall amounts at the 70 % probability level, these regression models were used to estimate the expected maize yields in nine

locations and six soil conditions. Crop yields were estimated for the optimum planting period, which was determined by simulating successive planting dates throughout water balances. These estimated yields were extrapolated to similar agroecological conditions in the region. Eight crop yield categories were estimated, but these were later reduced to four when the results were validated with crop yield estimates by the Secretariat of Agriculture and Water Resources (SARH). Every county in the region was classified into one of these four yield ranges.

Index words: Crop zoning, maize yields.

INTRODUCCION

En los Valles Centrales de Oaxaca se cultivan unas 88 000 ha de maíz de temporal y se estima que 40 000 ha tienen un riesgo alto de no producir grano debido a la alta incidencia de sequía. Esto hace necesario delimitar tales áreas y también determinar las prácticas de producción que permitan asegurar la producción al máximo.

La delimitación de áreas por potencial productivo puede ser un medio para la utilización más eficiente de los recursos, especialmente si también se definen prácticas de producción, como fechas de siembra, fertilización y cultivos o variedades de cultivo.

En este trabajo se propone una metodología para la delimitación de zonas con alto riesgo de sequía (parte I), y para generar tecnologías de producción que tomen en cuenta el riesgo climatológico (parte II).

La FAO (1981) publicó una metodología para la zonificación agroecológica de áreas con base en la duración de períodos de crecimiento y limitantes edáficas, pero es difícil hacer los ajustes al rendimiento al no tenerse una relación adecuada entre duración de períodos de crecimiento y rendimiento. Aun cuando esta relación pudiera establecerse, sería poco confiable dadas las características de la definición del período de

¹ CIIDIR-IPN-OAXACA, Calle Horno 1003, Fracc. Indeco Xoxo, 71230 Santa Cruz Xoxocotlán, Oax.

Aceptado: Agosto de 1998.

crecimiento, entendido éste como el número de días en los que se tiene una relación precipitación/evaporación mayor que 0.50.

Shaw (1974) propuso un índice de sequía (I) en maíz del tipo

$$I = P/ETP$$

donde:

P = precipitación, y ETP = evapotranspiración, el que se correlaciona linealmente con los rendimientos del maíz.

Este índice toma en consideración la etapa de desarrollo del cultivo en la cual la sequía ocurre, pues considera factores de ajuste basados en la susceptibilidad del cultivo y en el grado de estrés asociado a la demanda de agua y a la humedad disponible en el suelo. Con esta metodología se podrían definir funciones de producción para diferentes ambientes.

De acuerdo con Turrent (1977), el sistema de producción es un cultivo donde los factores inmodificables de la producción (clima y suelo), varían dentro de un rango establecido por conveniencia. Una vez estratificado el factor suelo, se puede esperar que algún factor climático sea el principal limitante. En gran parte de la zona temporalera de México lo es la sequía.

El sistema de producción podría redefinirse como "un cultivo sembrado en una condición de suelo donde el rendimiento es función del factor climático más limitativo". La definición anterior va de acuerdo con la de Laird (1966), quien considera que el sistema de producción se puede definir en términos de familias de funciones de respuesta, siendo cada familia específica para un rango definido de variación de factores inmodificables.

Frere y Popov (1979) encontraron que un índice de sequía derivado de un balance hídrico, tiene una buena correlación con los rendimientos de varios cultivos de temporal. Ruiz (1987) modificó dicho índice para incluir factores por oportunidad y persistencia de la sequía, así como para considerar la capacidad de retención de humedad del suelo.

MATERIALES Y METODOS

Los métodos empleados pueden agruparse en: estimación de las funciones de producción, determinación del período de siembra óptimo,

estimación de rendimientos probables y mapeo de las zonas con diferente potencial de rendimiento.

Para la obtención de las funciones de producción se contó con rendimientos de maíz en 27 localidades, en las cuales también se recabaron datos sobre precipitación, evaporación, profundidad radicular, y pendiente y textura del suelo.

En cada localidad se realizaron balances de humedad según Frere y Popov (1979) y Ruiz (1987), para obtener un índice de sequía (I) y un índice de sequía modificado (Im), respectivamente. El I se estima como:

$$I = 100 - \sum (P - ra + Aa) \times 100/Ra$$

donde:

P = precipitación semanal, ra = requerimiento de agua semanal, Aa = agua almacenada, y Ra = requerimiento total de agua.

El Im tiene la expresión:

$$Im = \sum (D \times Kf/ra) \times 100/40$$

donde:

D = déficit de agua, Kf = factor fenológico, y \sum representa la sumatoria de los valores semanales.

Por su parte, el déficit de agua se estimó por:

$$D = P - ra + Aa$$

donde:

ra = 0.75 (E) Kc, siendo E = evaporación semanal y Kc = coeficiente de cultivo.

El agua almacenada es función de la profundidad, pendiente y textura del suelo, además de la cantidad de lluvia efectiva. El Kf (Cuadro 1) depende de la ubicación del período seco en relación a la floración femenina del maíz, la cual es la etapa más sensible (Laird, 1976).

El período de siembra óptimo se determinó realizando balances de humedad sucesivos para nueve estaciones meteorológicas del área, utilizando lluvia semanal al 70 % de probabilidad de acuerdo con la distribución gamma (Thom, 1966). la semana de siembra con el menor Im se consideró como la óptima.

Cuadro 1. Factores fenológicos (Kf) para ajuste del rendimiento por ubicación de la sequía.

Semanas antes de floración	Kf	Semanas después de floración	Kf
6	0.7	1	2.8
5	1.1	2	1.8
4	1.4	3	1.8
3	1.4	4	1.8
2	2.5	5	1.7
1	2.8	6	1.4
0	5.3	7	0.7

Para la estimación de los rendimientos probables a largo plazo, se realizaron balances de humedad según Ruiz (1987), para el período de siembra óptimo de cada estación meteorológica y para seis condiciones de capacidad de retención de humedad del suelo frecuentes en el área (Cuadro 2). En el Cuadro 3 se presentan las características químicas de cada grupo de suelos. Una vez obtenido el Im para cada condición de suelo, se aplicaron las funciones de producción obtenidas para estimar los rendimientos asociados al índice.

La delimitación de las zonas por rendimiento potencial se realizó extrapolando los rendimientos estimados para cada condición de suelo en cada estación meteorológica, hacia zonas con suelos y régimen de lluvia similar, para lo cual se utilizaron mapas edáficos (INEGI, 1988), de isoyetas e isocuantos de evaporación. Se generaron ocho rangos de rendimiento probable o potencial.

En forma adicional, se validó la zonificación con los rendimientos de maíz de temporal reportados por la SARH (1989) para el período 1984-1988, viéndose la conveniencia de reportar menos rangos de rendimiento, por lo que finalmente se obtuvieron cuatro zonas por rendimiento potencial.

Cuadro 2. Capacidad de retención de humedad (CRH) en seis tipos de suelo en los Valles Centrales de Oaxaca.

Tipo	Fisiografía	Textura	Pendiente %	CRH mm
1	Lomerío	Gruesa	> 5.0	11.0
2	Lomerío	Media	> 5.0	50.0
3	Lomerío	Media	< 5.0	57.0
4	Planicie	Gruesa	> 0.5	45.0
5	Planicie	Media	< 1.5	79.0
6	Planicie	Fina	< 0.5	97.0

Cuadro 3. Características químicas de seis tipos de suelo en los Valles Centrales de Oaxaca.

Tipo	Nitrógeno %	Fósforo ppm	Potasio ppm	pH
1	0.042-0.049	3-5	250-364	7.2-8.1
2	0.067-0.093	2-4	493-550	6.7-8.0
3	0.099-0.113	6-8	970-1164	7.5-8.0
4	0.115-0.129	6-17	320-456	7.5-8.2
5	0.134-0.136	16-28	326-564	7.7-8.4
6	0.138-0.149	19-34	550-834	7.5-8.3

RESULTADOS Y DISCUSION

Funciones de Producción

Las funciones de producción entre rendimientos de maíz "Criollo Bolita" de temporal y los dos índices para distintas condiciones edáficas produjeron distintos coeficiente de determinación (R²). El I produjo un mayor R² en los suelos de planicie, pero al combinar los dos tipos de suelo para un modelo general, el R² resultante disminuyó considerablemente (Cuadro 4).

El mayor R² observado en los suelos de planicie indica que el grupo fue más homogéneo. Si se combinan los tres grupos para una función general, la R² disminuye hasta 0.76, lo cual indica que el factor edáfico, particularmente textura y posición fisiográfica, debe ser uno de los principales factores para la caracterización de los sistemas de producción.

El rendimiento potencial en suelos de planicie, con un I = 100 y fertilización adecuada, sería cercano a 2500 kg ha⁻¹, mientras que en suelos de lomerío se esperarían cerca de 1520 kg ha⁻¹.

Para el Im, la subdivisión de los suelos de lomerío en dos grupos con base en la textura de la capa superficial, permitió la obtención de mayores coeficientes de determinación (Cuadro 5). De nuevo los suelos de planicie fueron los más productivos, ya que con un Im = 0, se obtendrían cerca de 2480 kg ha⁻¹.

Cuadro 4. Funciones de producción entre el rendimiento (R) de maíz (kg ha⁻¹) y el índice de sequía (I) para dos tipos de suelo (Frere y Popov, 1979).

Suelo	n	Función	R ²
Planicie	13	R = - 827.2 + 33.3 I	0.77
Lomerío	14	R = - 462.4 + 19.8 I	0.44
Planicie+Lomerío	27	R = - 810.5 + 29.4 I	0.60

Cuadro 5. Funciones de producción entre rendimiento (R) de maíz (kg ha⁻¹) y el índice de sequía modificado (Im) para tres tipos de suelo.

Suelo	n	Función	R ²
Planicie	13	R = - 31.4 Im + 2477.1	0.89
Lomerío (text. rmedia)	7	R = - 16.1 Im + 1616.3	0.90
Lomerío (text. gruesa)	7	R = - 15.4 Im + 1191.5	0.98
Planicie+Lomerío	27	R = - 28.0 Im + 2154.0	0.76

Como era de esperarse, los suelos menos productivos se ubicaron en lomerío de textura gruesa. Ruiz y Laird(1979) encontraron que la variación en rendimientos de maíz de 56 sitios se explicaba en 85.5 % por los factores sequía y pendiente.

Períodos de Siembra Óptimos

En el Cuadro 6 se presentan los períodos de siembra óptimos para maíz "Criollo Bolita" de temporal de ciclo intermedio (cuatro meses), el cultivar más frecuentemente sembrado.

Los períodos de siembra óptimos variaron desde dos semanas en la mayoría de las estaciones, hasta cuatro semanas en el caso de Ocotlán y Ejutla. En un estudio previo (Ruiz, 1988), se determinó que estas dos últimas estaciones mostraban la mayor duración de estación de crecimiento y el menor número de períodos secos (P/ETP < 0.33).

En la región de los Valles Centrales se presenta aleatoriamente un período de sequía intraestival, el cual puede dividirse en canícula grande y canícula chica. La canícula grande comienza en promedio en la semana 28 (julio 9 a julio 15), durando de tres a siete semanas. La canícula chica comienza en la semana 32 (6 a 12 de agosto) y dura de dos a cuatro semanas.

Cuadro 6. Períodos de siembra óptimos para maíz criollo de temporal en los Valles Centrales de Oaxaca.

Localidad	Periodo óptimo
Miahuatlán	28 de mayo-17 de junio
Zimatlán	28 de mayo-17 de junio
Sn. Bartolo Coyotepec	14 de mayo-28 de mayo
Guadalupe Etna	14 de mayo-30 de junio
Ocotlán	28 de mayo-30 de junio
Sn. Miguel Ejutla	28 de mayo-30 de junio
Santa Ana Tlapacoyan	24 de junio-8 de julio
Santo Domingo Etna	28 de mayo-17 de junio
Tlacolula de Matamoros	11 de junio-30 de junio

Ambos tipos de canícula son interrumpidas por las lluvias ciclónicas de septiembre (Ruiz, 1987).

En cuanto a la duración de los períodos secos dentro de la estación de crecimiento, destacan Miahuatlán y San Bartolo con nueve semanas, Tlacolula y Santa Ana Tlapacoyan con siete y ocho semanas, respectivamente, y Santo Domingo y Guadalupe Etna con cuatro y cinco semanas, respectivamente (Ruiz, 1986). Las estaciones con menor número de períodos secos fueron Ocotlán (cero), Zimatlán (dos) y Sn. Miguel Ejutla (tres semanas).

En el Cuadro 6 se aprecia que en la mayoría de los sitios es aconsejable sembrar el maíz durante la primera quincena de junio, excepto en Santa Ana y Tlacolula de Matamoros, donde es preferible la segunda quincena de junio y en San Bartolo, la segunda quincena de mayo puede ser la más favorable.

Sí se siembra el maíz a principios de junio, el maíz estaría en floración en plena canícula grande, pero no todos los años hay canícula, de tal manera que en promedio el período canicular es uno de menor precipitación y no de ausencia total de lluvia, por lo que es posible sembrar el maíz para que las etapas críticas no coincidan con las porciones más secas de la canícula.

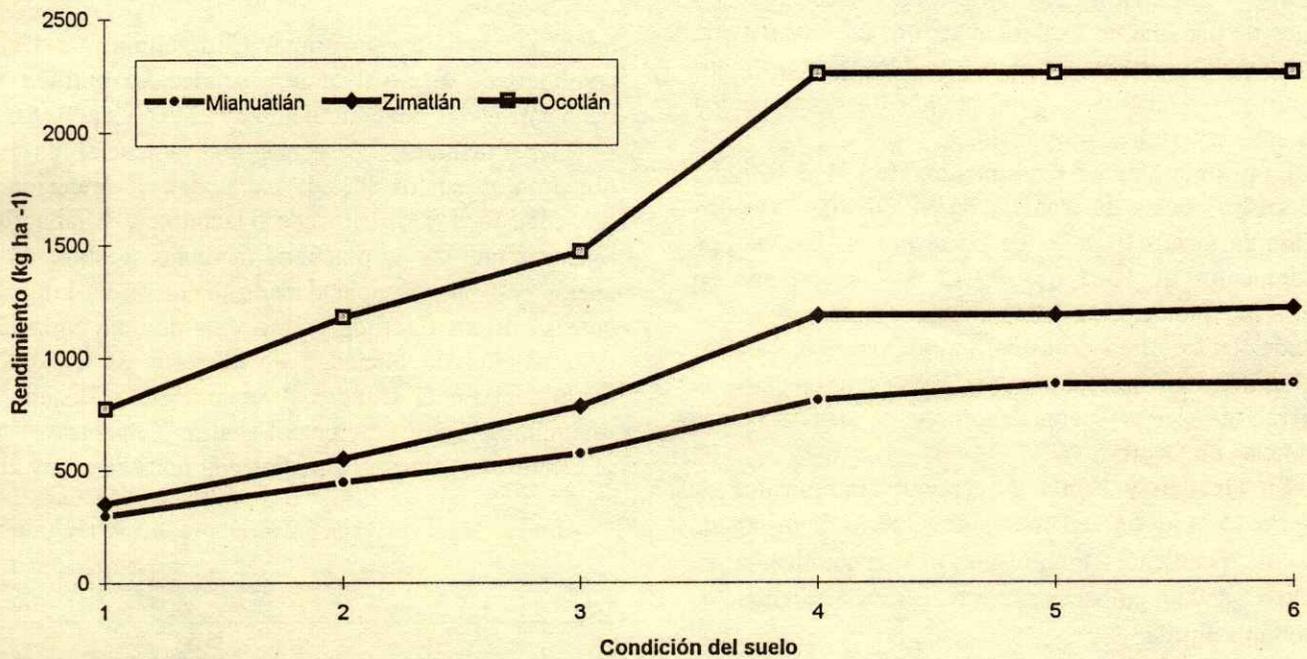
Rendimientos Probables a Largo Plazo

En el Cuadro 7 se presentan los rendimientos de maíz esperados con la lluvia al 70 % de probabilidad en nueve localidades y seis condiciones de suelo. Las condiciones edáficas con menor valor tienen menor capacidad de retención de humedad y fertilidad nativa. Los de menores rendimientos se obtuvieron en los suelos lomerío de la condición 1 (Litosoles), pero en localidades como Ocotlán y Ejutla producen rendimientos aceptables. Los mayores rendimientos se obtuvieron en suelos de las condiciones edáficas 4, 5 y 6, y también en Ocotlán y Ejutla. Pérez y Mejía (1984) coinciden en considerar estas localidades, además de Etna, como las de mayor potencial para la producción de maíz en la región.

A fin de visualizar mejor el efecto del factor suelo en combinación con la disponibilidad de humedad, se elaboró la Figura 1. Comparando los rendimientos bajo la condición más limitativa de suelo, se veía el efecto de la precipitación, mientras que comparando los

Cuadro 7. Rendimientos de grano de maíz (kg ha^{-1}) esperados en nueve localidades de los Valles Centrales de Oaxaca para seis condiciones de suelo al sembrar en el período óptimo.

Localidad	1	2	3	4	5	6
Miahuatlán	296	445	573	807	879	877
Zimatlán	350	552	782	1187	1187	1215
San Bartolo	250	427	527	776	819	805
Guadalupe Etla	348	535	735	1126	1126	1126
Ocotlán	770	1179	1469	2252	2252	2252
San Miguel Ejutla	676	1003	1347	2064	2064	2064
Santa Ana Tlapacoyan	381	575	575	802	802	764
Santo Domingo Etla	320	483	512	739	739	654
Tlacolula de Matamoros	281	461	489	651	651	629

**Figura 1. Cambios en el rendimiento de maíz al sembrar en la fecha óptima en seis condiciones de suelo para tres localidades contrastantes en precipitación.**

cambios en rendimiento entre condiciones de suelo contrastantes dentro de una localidad, se vería que tan limitativo es el suelo para esa condición. En Ocotlán, donde la humedad disponible es mayor, se tendría un rendimiento de 770 kg ha^{-1} en un suelo de la condición 1, contra sólo 296 kg ha^{-1} en Miahuatlán, una diferencia de 474 kg ha^{-1} . Si se comparan los incrementos en rendimiento al pasar de la condición de suelo 3 a la 4, el cambio en rendimiento es de 783 kg ha^{-1} para Ocotlán y de sólo 234 kg ha^{-1} para Miahuatlán, una diferencia de 549 kg ha^{-1} . Esto indicaría que el factor suelo es tan importante como el factor precipitación para determinar los rendimientos

en esta zona, lo cual no está de acuerdo con lo señalado por Kirkby (1973), quien consideró a la precipitación como el factor más importante.

Zonificación de los Rendimientos

Con base en el Cuadro 7, se determinaron ocho rangos de rendimientos probables: menores que 200, 201 a 400, 401 a 600, 601 a 800, 801 a 1000, 1001 a 1300, 1301 a 1500 y 2000 a 2300 kg ha^{-1} .

Se esperan rendimientos menores que 200 kg ha^{-1} en la zona de Totolapam, debido principalmente a limitaciones severas de precipitación. Los rendimientos

de 200 a 400 kg ha⁻¹ se esperan en suelos Litosoles y suelos erosionados de los distritos Centro, Tlacolula, Miahuatlán, Zimatlán y Etlá; siendo tan limitativo el suelo como la precipitación.

Los rendimientos de 401 a 600 kg ha⁻¹, se esperan en áreas extensas de lomeríos de más de 5 % de pendiente en todos los distritos, excepto en Ocotlán y Ejutla; y en lomeríos de menos de 5 % de pendiente en Miahuatlán, Centro, Etlá, Santa Ana Tlapacoyan y Tlacolula. Se esperan rendimientos de 601 a 800 kg ha⁻¹, en Litosoles de Ocotlán y Ejutla y en suelos de lomerío de menos de 5 % de pendiente en los distritos Centro y Zimatlán, pero serían más frecuentes en suelos de planicie de cualquier textura en las áreas de San Bartolo Coyotepec, Santa Ana Tlapacoyan, Santo Domingo y Tlacolula, representando los rendimientos máximos esperados en estas áreas.

Es posible obtener rendimientos de 801 a 1000 kg ha⁻¹ en los suelos de planicie de Miahuatlán y en los suelos de menos de 5 % de pendiente en Ejutla. Los rendimientos de 1001 a 1300 kg ha⁻¹ se esperan en suelos de planicie de Etlá, excepto áreas de suelos pesados en los alrededores de Santo Domingo, y en los suelos de planicie de Zimatlán. Estos rendimientos se esperan también en suelos de lomerío de más de 5 % de pendiente en Ocotlán.

En Ocotlán y Ejutla se esperan rendimientos de 1301 a 1500 kg ha⁻¹ en suelos de lomerío de menos de 5 % de pendiente. Finalmente, los rendimientos de 2000 a 2250 kg ha⁻¹ se esperan en suelos de planicie de Ocotlán y Ejutla.

La validación de la zonificación se realizó por comparación con los rendimientos de maíz de temporal a nivel municipal reportados por la SARH (1989) para el período 1984 a 1988. En general, existió una buena concordancia entre los rendimientos estimados y los reportados por la SARH, excepto en Ocotlán y Ejutla,

Cuadro 8. Categorías finales de rendimiento de maíz en los Valles Centrales de Oaxaca.

Potencial	Grano kg ha ⁻¹	Superficie ha
Bajo	< 400	12800
Mediano	401-1000	37500
Alto	1001-1500	13523
Muy alto	1501-2200	21773

Cuadro 9. Municipios con potencial productivo alto.

Municipio	Superficie ha	Municipio	Superficie ha
Soledad Etlá	849	Sta. Gertrudis Zim	720
Reyes Etlá	254	Taniche	537
Guadalupe Etlá	155	Sta. Ana Zegache	589
Nazareno Etlá	29	Sn. Juan Chilateca	471
Zaachila	1449	Sn. Antonino C. V.	580
Trinidad Zaachila	650	Santiago Apóstol	1138
Sta. Catarina Qiané	621	Sn. Dionisio Ocotlán	372
La Ciénega	439	Sn. Pedro Martir	673
Sn. Pablo	731	Zimatlán de Alvarez	3266
Huixtepec.			

donde se tendió a sobrestimar los rendimientos. Como resultado de esta validación, se decidió unificar las ocho categorías de rendimiento a cuatro (Cuadro 8).

Generalizando, las zonas con potencial bajo se ubicaron en suelos de baja capacidad de retención de humedad en los distritos de Tlacolula y Miahuatlán; mientras que las de potencial mediano se ubicaron en suelos con buena capacidad de retención de humedad en los mismos distritos y en suelos de baja capacidad de retención de humedad en el resto de los Valles Centrales. En el Cuadro 9 se muestra el listado de municipios con potencial alto, mientras que el Cuadro 10 muestra aquellos con potencial muy alto.

Cuadro 10. Municipios con potencial productivo muy alto.

Municipio	Superficie ha	Municipio	Superficie ha
Huitzo	750	Sta. Lucía del Camino	171
Sn. Miguel Ejutla	370	Sn. Juan del Estado	221
Sn. Agustín Yatareni	432	Magdalena Apasco	1112
Sn. Agustín de las Juntas	41	Sn. Juan Bautista Gelache	429
Huayapan	579	Sn. Pedro y Sn. Pablo	179
Sn. Antonio de la Cal	27	Sn. Pablo Etlá	911
Cuixtlan	1780	Sn. Lorenzo Cacaotep.	955
Sta. Cruz Amilpas	40	Sn. Felipe Tejalapan	966
Sta. Cruz Xoxocotlán	718	Sta. Inés Yatzche	153
Sto. Domingo		Sta. Martha	
Tomaltepec	235	Chichihualtepec	250
Sta. Catarina Minas	264	Sn. Martín Cansecos	178
Sn. Jacinto Amilpas	77	Sn. Andrés Zabache	175
Animas Trujano	202	La Compañía	400
Sta. Ma. Coyotepec	197	Sn. Agustín Amatengo	545
Sta. Ma. El Tule	340	Sn. Vicente Coatlán	1267
Sta. Ma. Atzompa	419	Sn. Miguel Sola	2516
Oaxaca de Juárez	578	Sn. Francisco Sola	290
Sn. Pedro Ixtlahuaca	838	Sn. Jerónimo Coatlán	242
Sn. Raymundo Jalpan	107	Sn. Sebastián Coatlán	230
Sn. Sebastián Tutla	164	La "P"	200
Tlaxiaco de Cabrera	918	Ocotlán	1307

Estos rendimientos se obtendrían en suelos de las condiciones 4-6.

CONCLUSIONES

El índice de sequía modificado predijo mejor los rendimientos de maíz de temporal que el índice de sequía original.

El factor suelo fue tan importante como la precipitación en la determinación de los rendimientos del maíz de temporal.

Las áreas con mayor potencial para la producción de maíz de temporal se ubican en suelos de planicie en los distritos de Ocotlán, Centro y Ejutla, mientras que la mayoría de los suelos de planicie de textura intermedia en los municipios de los distritos de Etlá, Zaachila y Zimatlán tienen un potencial productivo alto.

LITERATURA CITADA

- FAO. 1981. Report on the agroecological zones project. Vol. I. Methodology and results for South and Central America. World Soil Resources Report No. 48/3 II. Rome.
- Frere, M. y G.F. Popov. 1979. Agrometeorological crop monitoring and forecasting. FAO Plant Production and Protection Paper No. 17, Rome.
- INEGI. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. 1988. Mapas a escala 1:1 000 000. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. Aguascalientes, México.
- Kirkby A., V.T. 1973. I. The use of land and water resources in the past and present Valley of Oaxaca, México. University of Michigan, Ann Arbor.
- Laird, R.J. 1966. Metodología empleada para estudiar las necesidades de fertilizantes. Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Laird, R.J. 1976. Probabilidades de sequía en el maíz para los Valles Centrales de Oaxaca. Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.
- Pérez Z., O. y C. Mejía. 1984. Potencial agrícola de Valles Centrales de Oaxaca con base en probabilidad de lluvia. Folleto de Investigación No. 71. Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca, INIFAP-SARH.
- Ruiz V., J. 1979. Dosis de fertilizantes y densidades de población en maíz de temporal. Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, Méx.
- Ruiz V., J. 1986. Zonificación agroecológica de los Valles Centrales de Oaxaca. pp. 139-150. Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca, INIFAP-SARH.
- Ruiz V., J. 1987. Rainfall probabilities and corn yields in the Central Valleys of Oaxaca, México. pp. 25-28. In: PSMP Report Series No. 26, WMO, Geneva.
- Ruiz V., J. 1988. Zonificación agroecológica por funciones de producción. pp. 20-23. III Congreso Interamericano de Meteorología, México, D.F.
- Ruiz V., J y R.J. Laird. 1979. Definición de sistemas de producción con base en probabilidades de sequía. p. 78. Resúmenes del XII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Morelia, Mich.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1989. Rendimientos de maíz de temporal para el período 1984-1988 en los Valles Centrales de Oaxaca. Distrito de Desarrollo Rural 102, Oaxaca, Oax.
- Shaw, R.H. 1974. A weighed moisture stress index for corn in Iowa. Iowa State J. of Res. 49: 100-104.
- Thom, H.C.S. 1966. Some methods of climatological analysis. Tech. Note No. 81, WMO No. 199, Geneva.
- Turrent F., A. 1977. El agrosistema, un concepto útil en productividad. In: Efraim Hernández X. (ed.) Agrosistemas de México, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

GEOMETRIA FRACTAL EN LA CIENCIA DEL SUELO

Fractal Geometry in Soil Science

Ricardo David Valdez-Cepeda¹ y Emilio Olivares-Sáenz²

RESUMEN

Los puntos de dimensión cero, las líneas y curvas unidimensionales, las figuras planas bidimensionales como los cuadrados y círculos, y los objetos tridimensionales como los cubos y las esferas nos hacen ver al mundo como hasta ahora lo entendemos. Sin embargo, algunos fenómenos naturales son descritos mejor por una dimensión cuyo valor no es precisamente entero, pero sí fracción (fractal). Además, si poseen la propiedad de autosimilitud o autoafinidad dentro de un rango de escalas se define como objeto fractal. En este artículo de revisión se describen y discuten los principios básicos de la geometría fractal, así como algunos ejemplos de su aplicación en la ciencia del suelo con el propósito de facilitar a los científicos del suelo la comprensión de sus conceptos. Al final se indican algunas sugerencias a considerar en futuras investigaciones enmarcadas en la ciencia del suelo.

Palabras clave: Objetos fractales, funciones variograma y potencial, física de suelos, química de suelos, variabilidad espacial del suelo, agricultura de precisión.

SUMMARY

Zero dimensional points, unidimensional lines and curves, bidimensional plane figures as squares and circles, and tridimensional objects as cubes and spheres allow us to see the world how we understand it now. However, some natural phenomena are best described by a fractal dimension. Moreover, they are

¹ Universidad Autónoma Chapingo-Centro Regional Universitario Centro Norte, Apartado Postal 196, 98000 Zacatecas, Zac., México.

² Universidad Autónoma de Nuevo León-Facultad de Agronomía, Apartado Postal 358, 66450 San Nicolás de los Garza, N. L., México.

Aceptado: Septiembre de 1998.

fractal objects if they have self-similarity or self-affinity property within a known scale range. In this review, basic principles of fractal geometry and some examples of their application in soil science are described and discussed with the aim to introduce the soil scientists to such concepts. At the end, various perspectives for further research in soil science are pointed out.

Index words: Fractal objects, power law and variogram function, soil physics, soil chemistry, soil spatial variability, prescription farming.

INTRODUCCION

"Dios crea círculos, ondas y fractales"

Benoit B. Mandelbrot

La geometría euclidiana, la trigonometría y el cálculo son las herramientas que generalmente se usan para modelar los fenómenos naturales. Los modelos son descritos en términos de puntos, líneas rectas, círculos, parábolas y otras curvas simples. Así, los puntos de dimensión cero, las líneas y curvas unidimensionales, las figuras planas bidimensionales como el cuadrado y el círculo, y los cuerpos tridimensionales como los cubos y las esferas nos hacen ver al mundo como hasta ahora lo entendemos. Sin embargo, algunos fenómenos naturales son descritos mejor por una dimensión cuyo valor no es precisamente entero, en otras palabras, no corresponde a una dimensión euclidiana. Ese valor, entonces, corresponde a una dimensión fractal. La palabra "fractal" proviene del adjetivo "fractus", en latín, y su significado es irregular o rugoso (Mandelbrot, 1993). Mandelbrot (1977) usó el término "fractal" específicamente para estudiar fenómenos temporales o espaciales continuos que exhiben correlación dentro de un rango de escalas.

Los propósitos fundamentales del presente artículo son: proporcionar al lector los principios básicos de la geometría fractal, y darle a conocer algunos usos que ésta ha tenido en la ciencia del suelo.

PRINCIPIOS BASICOS DE LA GEOMETRIA FRACTAL

La geometría euclidiana y las funciones elementales, tales como el seno, el coseno y los polinomios son la base del método tradicional para analizar datos experimentales (Barnsley, 1993). Una línea recta tiene dimensión uno, mientras que una curva fractal tendrá una dimensión cuyo valor es de entre uno (1) y dos (2), dependiendo del espacio que ésta ocupe en el plano y de su comportamiento en sí (Peterson, 1984).

Si el lector considera que

$$N_n \propto C r_n^{-D} \quad (1)$$

donde N_n es el número de fragmentos del tamaño r_n , C es una constante, y D es el índice de similitud o dimensión fractal; D puede ser estimada por

$$D = [\log(N_{n+1}/N_n)] / [\log(r_n/r_{n+1})] \quad (2)$$

Por ejemplo, el segmento de longitud unitaria (*i. e.* el iniciador, según Mandelbrot, 1982), mostrado en la Figura 1, puede dividirse en partes mediante procedimientos diferentes:

1) En la Figura 1a, el segmento es primeramente dividido en dos partes, así $r_1=1/2$, y como una de las partes se conserva y la otra se elimina, $N_n=1$ (*i. e.* el patrón generador del objeto fractal, según Mandelbrot, 1982). Posteriormente, la parte del segmento inicial conservada se divide también en dos partes y se conserva una de ellas de manera tal que $r_2=1/4$ y $N_2=1$. En este caso D tiende a ser cero y equivale a la dimensión euclidiana porque siempre $N_n=1$, sin importar el número de iteraciones o veces que se ejecute el proceso de división del segmento y de conservación de una de sus partes; e inclusive, la longitud tiende a aproximarse a cero conforme se incrementa el número de iteraciones.

2) En la Figura 1b el segmento es dividido en dos partes, pero conservándolas. Entonces, $r_1=1/2$ y $N_n=2$. De la siguiente iteración se obtiene $r_2=1/4$ y $N_n=4$. Por lo tanto, $D=\log(2)/\log(2)=1$. El resultado tiene sentido porque la longitud del segmento siempre será unitaria. Es pues fácil crear líneas de dimensión euclidiana. Enseguida, se demuestra que es igual de fácil crear líneas cuya dimensión es fractal.

3) En la Figura 1c el segmento se divide en tres partes iguales y se conservan las dos de los extremos. Así, $r_1=1/3$ y $N_1=2$. Al repetir el proceso, $r_2=1/9$ y $N_2=4$; entonces $D=\log(2)/\log(3)=0.6309$. Este es un fractal desconectado. Además, es el fractal determinístico más

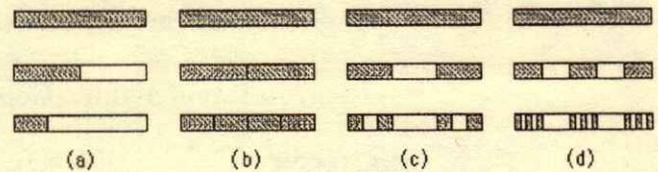


Figura 1. Cuatro procesos de fragmentación de segmentos lineales de longitud unitaria para estimar la dimensión fractal.

simple conocido como “Conjunto de Cantor Triádico” (Barnsley, 1993; Bunde y Havlin, 1994) o “Polvo de Cantor”.

4) Al dividir el segmento en cinco partes iguales y conservando las partes de ambos extremos y la central (Figura 1d), $r_1=1/5$ y $N_1=3$. Al repetir el procedimiento en cada parte conservada, $r_2=1/25$ y $N_2=9$. Así $D=\log(3)/\log(5)=0.6826$.

Pues bien, así como fue posible encontrar dimensiones fractales con valores entre cero (0) y uno (1) para segmentos lineales eliminando partes (fragmentándolos), es factible encontrarlas al invertir el proceso, es decir, al incrementar la longitud del segmento. La “Curva de Koch”, uno de los fractales determinísticos más comunes (Bunde y Havlin, 1994) y así nombrada en honor a Helge von Koch, es un ejemplo ilustrativo (Figura 2) de dicho procedimiento.

La construcción de la “Curva de Koch” (Figura 2) se hace partiendo de una línea recta de longitud unitaria (iniciador) dividiéndola en tres partes iguales. Después se reemplaza la parte central con un triángulo equilátero sin base (patrón generador del objeto fractal), a grado tal que se incrementa la longitud de la línea a $4/3$. Este factor de incremento de longitud de la línea se asocia a cada iteración. Si el fractal es definido considerando un gran número de iteraciones, la longitud de la línea se aproxima al infinito (Sander, 1986; Bunde y Havlin, 1994), mientras que su área es aún nula (cero) (Sander, 1986). La dimensión fractal de la “Curva de Koch” se define por $D=\log(4)/\log(3)=1.2618595$.

Es apreciable el aspecto básico de los fractales determinísticos, “la auto-similitud” (la no variación de la forma al cambiar de escala), inherente en los fractales lineales de las Figuras 1 y 2, pero la complejidad de los mismos se incrementa más en los fractales no lineales, como en el caso del fractal quizás más famoso: el “Conjunto de Mandelbrot”. Particularmente, en la “Curva de Koch” (Figura 2) la auto-similitud se aprecia al verificar que la forma

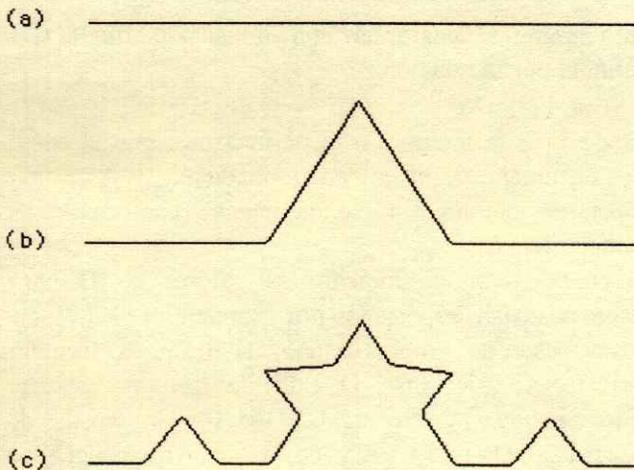


Figura 2. Proceso de generación de la curva de Koch hasta dos (2) iteraciones. a) Una línea de longitud unitaria. b) Una línea de longitud $4/3$. c) Una línea de longitud $16/9$, es decir, la línea b incrementada en $4/3$.

producto de la iteración 1 (Figura 2b) se mantiene en cualquier cuarta parte de la línea producto de la iteración 2 (Figura 2c).

También es posible aplicar los procedimientos de fragmentación a cuadrados, rectángulos y otro tipo de planos para estimar el valor de su respectiva dimensión fractal. Los ejemplos de la Figura 3 parten de un cuadrado de área unitaria (iniciador) y se basan en la división del dicho cuadrado en nueve (9) cuadrados iguales (patrón generador del objeto fractal) con $r_1=1/3$. En la siguiente iteración, cada uno de los cuadrados es dividido también en nueve (9) fragmentos con $r_2=1/9$ cada uno. El proceso iterativo se repite n veces.

1) En la Figura 3a solamente un cuadrado se mantiene en cada iteración, de manera que $N_1=N_n=1$; en consecuencia, $D=0$, es decir, se tiene un ejemplo de la dimensión euclidiana de un punto.

2) En la Figura 3b se mantienen dos cuadrados en la primer iteración, cuatro en la segunda y así sucesivamente; entonces, $N_1=2$, $N_2=4$, etc. y $D=\log(2)/\log(3)=0.6309$. ¡El lector podrá apreciar que es la misma dimensión fractal que la del segmento lineal de la Figura 1c!

3) En la Figura 3c se mantienen tres cuadrados alineados en cada iteración, lo cual permite estimar la dimensión euclidiana de una línea ($D=1$), ya que $N_1=3$ y $N_2=9$.

4) Cuando se remueve o elimina el cuadrado del centro en cada iteración (Figura 3d), $N_1=8$ y $N_2=64$, de manera que la dimensión fractal es 1.8928.

5) Como se supone, si todos los cuadrados se mantienen (Figura 3e), la dimensión es la de un plano euclidiano ($D=2$).

Si el objetivo fuera estimar dimensiones fractales cuyos valores sean de entre dos (2) y tres (3), el procedimiento de fragmentación debería aplicarse tomando como sujeto de análisis a un objeto de volumen unitario, *e. g.* un cubo (Bartoli *et al.*, 1991; Perfect y Kay, 1991; Rieu y Sposito, 1991a; Perfect *et al.*, 1993).

Los ejemplos demostrativos descritos *ut supra* permiten reconocer que en sistemas (objetos) regulares o con densidad uniforme (líneas rectas, planos, y cilindros, cubos y esferas sólidos) la dimensión D caracteriza el cómo la masa $M(L)$ cambia con la magnitud lineal L del sistema (Bunde y Havlin, 1994). Una parte pequeña del sistema de magnitud lineal bL ($b < 1$) tendrá una $M(bL)$ que decrece en atención al factor b^D

$$M(bL) \propto b^D M(L) \quad (3)$$

La solución de esta ecuación es:

$$M(L) \propto CL^D \quad (4)$$

Retomando la "Curva de Koch" (Figura 2) y considerando que el factor de incremento de la longitud es $b=1/3$, se percibe que la longitud (masa) total de la curva se incrementa por un factor de $1/4$, *i. e.*

$$M(1/3 L) = 1/4 M(L) \quad (5)$$

De esta manera $1/4=(1/3)^D$; *i. e.* la dimensión fractal $D=\log(4)/\log(3)=1.2618595$. ¡El resultado es similar al anteriormente indicado para la "Curva de Koch"!

La aplicación práctica de la dimensión fractal requiere de algunas otras condicionantes, porque las figuras auto-similares (formas invariantes cuando se magnifica isotrópicamente una parte pequeña del objeto al re-escalar los ejes por un factor común) son raramente encontradas en la naturaleza (Mandelbrot, 1967); de manera que generalmente se maneja el concepto de fractales auto-afines para caracterizar a los objetos invariantes cuando se magnifican anisotrópicamente. Las estructuras auto-similares o auto-afines pueden ser exactas o estadísticas. Las variantes estadísticas de auto-similitud y auto-afinidad son las más frecuentes.

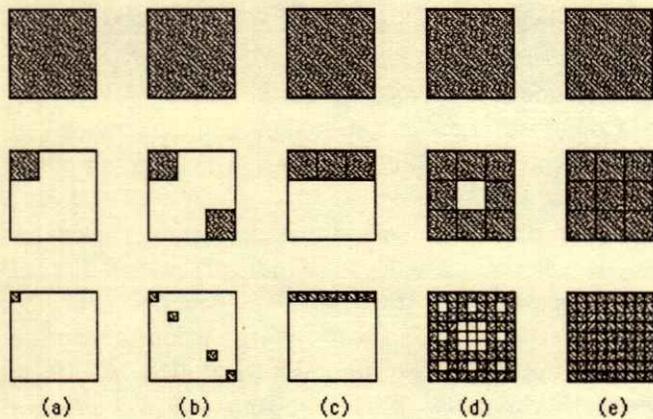


Figura 3. Cinco procesos de fragmentación de cuadrados de área unitaria para estimar la dimensión fractal.

Matemáticamente, la auto-similitud conlleva a una relación potencial entre el tamaño, $M(r)$ y la(s) unidad(es) de medición o escala r (Sander, 1986; Tyler y Wheatcraft, 1989; Young y Crawford, 1991):

$$M(r) \propto Br^D \quad (6)$$

donde B es una constante de proporcionalidad y D el índice de auto-similitud o dimensión fractal.

Esta función potencial y algunas variantes análogas han permitido aplicar los principios de la geometría fractal en las ciencias naturales, especialmente en la ciencia del suelo. Un tipo de esas variantes se ha usado en la descripción y la modelación de las propiedades y procesos edáficos, mientras que otro ha sido de particular importancia en la cuantificación de la heterogeneidad espacial del suelo.

GEOMETRIA FRACTAL EN LA CIENCIA DEL SUELO

Descripción y Modelación de Procesos Edáficos

Estos aspectos de la ciencia del suelo han sido realizados considerando la Ecuación 6 o alguna de sus variantes por analogía. Aunque también, la geometría fractal es una herramienta valiosa para integrar fenómenos biológicos, químicos y físicos dentro de un rango de escalas en espacio y tiempo (Perfect y Kay, 1995), pues los objetos naturales exhiben generalmente simetría y/o afinidad dentro de valores límites (superior e inferior) de escala.

Costas y Fronteras Fractales. Mandelbrot (1967) introdujo la geometría fractal en la geofísica al definir que algunas curvas geográficas son figuras continuas

auto-similares aleatorias con dimensión fractal (D) definida por la relación:

$$L(r) \propto Ar^{1-D} \quad (7)$$

donde L es la longitud o el perímetro, según el caso; r es el tamaño de la unidad de medición; y A es una constante; entonces, L se incrementa conforme r es menor.

A continuación se indican los valores de D para diferentes casos reportados por Mandelbrot (1967). La costa oeste de Gran Bretaña, $D=1.25$; la frontera terrestre de Alemania, $D=1.15$; la frontera terrestre entre España y Portugal, $D=1.14$; la costa de Australia, $D=1.13$; y la costa de Africa del Sur $D=1.02$. Ello significa que la costa oeste de Gran Bretaña y las fronteras terrestres de Alemania y entre España y Portugal son las más irregulares, pero en todas el grado de irregularidad es independiente de la escala y predominan los efectos de segmentos lineales relativamente grandes porque $D < 1.5$. En un contexto práctico entonces, no es necesario medir esas curvas geográficas con unidades de medida pequeñas (*i.e.* mm, cm, m) porque esas escalas no describen aspectos importantes de dichas curvas.

Partículas y Agregados Fractales en el Suelo. Mandelbrot (1982) y Turcotte (1986) sugirieron que la relación fractal para las distribuciones de las partículas o agregados por su tamaño es de la forma

$$N(r > R) \propto R^{-Dn} \quad (8)$$

donde $N(r > R)$ es el número de partículas o agregados de tamaño mayor que R y Dn es la dimensión fractal con base en el número de partículas o agregados.

Desafortunadamente, la variación de la densidad en función del tamaño de las partículas o agregados es raramente reportada (Tyler y Wheatcraft, 1992) a pesar de que el concepto más fácilmente entendido en la geometría fractal es el de densidad, puesto que la relación entre masa y volumen es inconstante conforme se cambia la escala (Orbach, 1986). La cantidad de masa dentro de un cuerpo esférico de radio r para un objeto homogéneo varía de acuerdo con $M(r) \propto Ar^d$, donde A es una constante y d es la dimensión espacial (euclidiana). Análogamente, la cantidad de masa de un cuerpo esférico auto-similar (*i.e.* fractal) varía de acuerdo con

$$M(r) \propto Br^{Dm} \quad (9)$$

donde B es el "índice de lagunaridad" o "índice de agregación de las partículas o agregados" y Dm es la dimensión fractal con base en la masa. Generalmente D es menor que d debido al carácter abierto de las

estructuras fractales, es decir, a la tendencia por exhibir arreglos no homogéneos de sus partículas, con grandes cantidades de espacios abiertos (poros) y arreglos atómicos irregulares. Así, la densidad de partículas de una estructura fractal se estima considerando el volumen $[V(r)=Cr^d]$, donde C es una constante]:

$$\rho(r)=M(r)/V(r)=Br^D/Cr^d \propto r^{D-d} \quad (10)$$

Puesto que D es menor que d, la densidad disminuye conforme se incrementa el tamaño de la escala, lo cual implica que los objetos fractales de gran tamaño pueden ser extraordinariamente livianos (Orbach, 1986).

Algunos investigadores han sugerido que las partículas del suelo se comportan como superficies fractales, lo cual indica que su área (A) se incrementa conforme a su tamaño de acuerdo con

$$A \propto r^{D_s} \quad (11)$$

donde la dimensión fractal superficial, $D_s=2.3$ a 2.5 (Avnir *et al.*, 1985; Sokolowska, 1989). De hecho, Mandelbrot (1982) argumentó que $2 < D_s < D_n$ o $D_m < 3$. Por consiguiente, también se reconoce que la interface sólido-poro en el suelo es un fractal superficial (Bartoli *et al.*, 1991; Anderson y McBratney, 1995), porque el límite entre ambas fases es irregular. Asimismo, Bartoli *et al.* (1991) indicaron que los poros del suelo muestran una relación potencial fractal con su radio circular

$$P(r) \propto r^{D_p} \quad (12)$$

donde P son los poros de radio mayor que r y D_p es la dimensión fractal de la porosidad.

Bartoli *et al.* (1991) señalaron que si $D_m=D_p=D_s=3$, el material no es fractal. Pero si $2 < D_s < 3$ y $D_m=D_p=3$, el material es fractal solamente con base en su área superficial. En cambio si $2 < D_s < 3$, $2 < D_m < 3$ y $D_p=3$, el material es fractal con base en superficie y masa. Y si $2 < D_s < 3$, $2 < D_p < 3$ y $D_m=3$, el material es fractal con base en superficie y porosidad. Matemáticamente, entonces, los agregados interconectados complejos deben ser caracterizados por valores diferentes de dimensión fractal con base en masa y superficie ($D_s \neq D_m$; $2 < D_s < 3$; $2 < D_m < 3$).

Algunas experiencias de partículas y agregados fractales. Turcotte (1986), Tyler y Wheatcraft (1989, 1992), Bartoli *et al.* (1991), Wu *et al.* (1993), Barak *et al.* (1996) utilizaron el concepto de dimensión fractal para caracterizar la distribución de las partículas del suelo por su tamaño; mientras que Perfect y Kay (1991), Perfect *et al.* (1992), Rieu y

Sposito (1991b), Eghball *et al.* (1993), Anderson y McBratney (1995) y Logsdon *et al.* (1996) caracterizaron la distribución de los agregados por su tamaño (Cuadro 1). Teóricamente, los valores de dimensión fractal relativamente bajos indican que el suelo es dominado por partículas o agregados grandes, mientras que valores altos indican la dominancia de partículas o agregados pequeños. En algunos de esos casos, la masa se convirtió a número de partículas o agregados considerando el supuesto típico de que tienen forma esférica o cúbica; sin embargo, ello no se ha comprobado. Otro error asociado a este procedimiento, es el referente a que el número de partículas o agregados se relaciona con el tamaño medio de dos clases sucesivas, es decir, se supone que la distribución de las partículas es discontinua cuando en realidad es continua.

Los resultados de Turcotte (1986) y Tyler y Wheatcraft (1989) no coinciden con respecto a los valores de dimensión fractal, debido posiblemente a la diferencia de las clases representadas por radios medios de las partículas y/o a que la textura de las muestras de suelo estudiadas por Turcotte (1986) eran más cuarzosas. Avnir *et al.* (1985) demostraron que el cuarzo puro y los suelos cuarzo-arenosos revelan valores (de dimensión fractal superficial) relativamente bajos, lo cual indica que predominan las partículas de tamaño relativamente grande en dichos suelos. Bartoli *et al.* (1991) confirmaron que los suelos de textura fina son bien caracterizados por una distribución fractal de las partículas mientras que los cuarzo-arenosos no.

Por su parte, Barak *et al.* (1996) caracterizaron la fracción arenosa de suelos arenosos mediante el análisis de imagen (con lo cual se elimina el supuesto de forma esférica) de los granos de arena y la variante de la Ecuación 11:

$$N(A > a) \propto a^{-D/2} \quad (13)$$

donde $N(A > a)$ es el número de objetos con área A mayor que a. Barak *et al.* (1996) concluyeron que la distribución log-normal mostró mejor bondad de ajuste que la distribución fractal; pues de hecho los granos de cuarzo no muestran fisuras al magnificarlos y su superficie es suave, de manera que la geometría fractal pudiera no proveer una descripción útil para la fracción arenosa de los suelos al caracterizarla considerando el número de partículas. Inclusive, esto se ha evidenciado al corregir los errores asociados a la

discontinuidad y al supuesto de densidad uniforme en varias clases texturales (Tyler y Wheatcraft, 1992). Sin embargo, ello también pudiera indicar la pertinencia de reconocer el carácter multifractal de las partículas del suelo, es decir, que a diferentes rangos de tamaño de partículas se asocian también diferentes valores de D . En este sentido, Wu *et al.* (1993) consideraron una distribución potencial del tipo Cermak o Pareto:

$$N(r) \propto r^{-D-1} \quad (14)$$

Wu *et al.* (1993) identificaron la naturaleza multifractal de la distribución de las partículas del suelo, sobre todo porque para $r > 60 \mu\text{m}$ ($D_n \approx D_m > 3$) y $0.03 \mu\text{m} < r < 40 \mu\text{m}$ ($D_n \approx D_m = 2.8 \pm 0.1$) la distribución potencial fue claramente evidente considerando varios métodos de dispersión de las partículas en diferentes clases de suelo. Wu *et al.* (1993) reportaron que 70 % de la masa del rango de clases de partículas de suelo con D_n y/o D_m entre 2 y 3 depende de partículas grandes, mientras que 70 % del área superficial está en función de partículas relativamente pequeñas, pero los límites superior e inferior de ese rango de clases son definidos por el tipo de suelo. Por lo tanto, la cuantificación del grado de irregularidad de las superficies (Avnir *et al.*, 1984) de las partículas del suelo es importante, en particular desde un punto de vista químico.

Las reacciones químicas son tratadas, tradicionalmente, en términos de tres aspectos (Avnir *et al.*, 1994): 1) La naturaleza del enlace químico que se forma entre las moléculas en reacción, 2) las restricciones que gobiernan la asociación, y 3) el perfil energético de la reacción.

Con el advenimiento de la "Química Heterogénea" se introdujo un cuarto aspecto: La estructura y la geometría del ambiente en el cual se efectúa la reacción (Avnir *et al.*, 1994). Sin embargo, este último aspecto se ha considerado en pocas ocasiones debido a que la superficie de los materiales es caracterizada por una geometría extremadamente compleja; por ello, el concepto de "Química Heterogénea" se maneja en los casos en que las reacciones son heterogéneas porque se presentan en medios porosos de grandes áreas superficiales con superficies irregulares. El problema de la complejidad geométrica tiene dos importantes consecuencias: 1) hace difícil estudiar las relaciones eficiencia-geometría, y 2) en sentido práctico, es relativamente más sencillo caracterizar las partículas por su tamaño, el área superficial y los poros por su

tamaño, lo cual orilla a olvidarse de la importancia de caracterizar las morfologías superficiales del material reactivo.

En este contexto la geometría fractal ofrece objetos teóricos cuyo aspecto es muy similar al de los objetos reales. Por ejemplo, el objeto fractal conocido como "Escalera del Diablo" asemeja mucho los bordes de los cristales imperfectos (Mandelbrot, 1982) y de las estructuras laminares como las arcillas y los grafitos (Avnir *et al.*, 1994), mientras que el "Triángulo de Sierpinski" aleatorizado asemeja las superficies defectuosas ("trigones") de los diamantes (Avnir *et al.*, 1994).

Debe considerarse, sin embargo, que la geometría fractal es una herramienta que contempla a la complejidad como punto de partida, no como una desviación; de manera que facilita la distinción entre al menos dos tipos de superficie que pueden o no coincidir (Avnir *et al.*, 1994): 1) la superficie disponible para que las moléculas reaccionen, y 2) la superficie que puede recibir radiación (como la de los rayos X, por ejemplo).

Es preciso aclarar que los rayos X penetran a grado tal que es factible cuantificar también la superficie totalmente inaccesible a las moléculas, como la de los poros cerrados o los poros con entradas en forma de cuello de botella. Entonces, A en la Ecuación 11 puede ser el área superficial accesible para la adsorción, el área reactiva, la intensidad de los rayos X emitidos, etc. Mientras que r en la misma Ecuación 11 pueden ser los cambios de magnificación en microscopía, el propio tamaño de los objetos, la distancia de difusión hacia la superficie, el ángulo de emisión de los rayos X, y la variación del tamaño de las moléculas que interactúan con la superficie. Por lo tanto, D podría ser la dimensión fractal de la superficie accesible para la adsorción y D_r la dimensión fractal del área que participa en la reacción.

Avnir *et al.* (1994) indicaron que si la superficie del material es fractal, el área superficial, A ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$), está en función del radio, r , de las partículas:

$$A \sim r^{D-3} \quad (15)$$

donde D puede ser igual a D_r y A sustituida por el área superficial efectiva de la reacción para estimar D_r , de manera que es posible que $D_r \approx D$, $D_r < D$, $D_r > D$.

$D_r \approx D$ se presenta cuando el material es prácticamente no poroso, es decir, en materiales cuya estructura es homogénea. La disolución del cuarzo es un claro

Cuadro 1. Referencias en que se reporta la caracterización de la distribución de partículas o de agregados del suelo mediante la dimensión fractal.

Referencia	Tipo de datos	Supuesto(s)	Dimensión fractal (D)†
Tyler y Wheatcraft (1989)	Distribución de partículas por tamaño	Densidad aparente de partículas invariante	2.7-3.485 (Dn)
Bartoli <i>et al.</i> (1991)	Distribución de partículas por tamaño	Densidad aparente de partículas invariante	2.69-3.26 (Dn) 2.69-3.28 (Ds) 1.9-2.02 (Dm)
Tyler y Wheatcraft (1992)	Distribución de partículas por tamaño	Densidad aparente de partículas invariante	2.682-3.499 (Dn) 2.006-2.839 (Dm)
Wu <i>et al.</i> (1993)	Distribución de partículas por tamaño	Densidad aparente de partículas diferente en los cuatro tipos de suelos involucrados	2.72-3 (Dn y Dm para radios, r, de partícula de 30 nm-60 µm) >3 (Dn y Dm; r>60 µm)
Barak <i>et al.</i> (1996)	Distribución de granos de arena por tamaño	—	1.94-2.01 (Ds igual a la dimensión topológica)
Perfect y Kay (1991)	Distribución de agregados por tamaño	Densidad aparente de agregados invariante	2.51-3.52 (Dn)
Rieu y Sposito (1991b)	Distribución de agregados por tamaño	Densidad aparente de agregados medida para cada clase de agregados por su tamaño	2.58-2.95 (Dn)
Perfect <i>et al.</i> (1992)	Distribución de agregados por tamaño	Densidad aparente de agregados invariante	0.67-3.92 (Dn) 0.79-4.06 (Dm)
Perfect <i>et al.</i> (1993)	Distribución de agregados por tamaño	—	2.53-3.46 (Dn)
Eghball <i>et al.</i> (1993)	Distribución de agregados por tamaño	Densidad aparente de agregados medida para cada clase de agregados por su tamaño	2.281-3.306 (Dn)
Rasiah <i>et al.</i> (1993)	Distribución de agregados por tamaño	Densidad aparente de agregados invariante	2.02-3.19 (Dm Rasiah) 2.32-3.28 (Dm) 2.46-2.84 (Dm Tyler)
Perfect <i>et al.</i> (1994)	Distribución de agregados por tamaño	—	1.179-2.803 (Dn) 1.818-2.663 (Dan) 1.876-2.775 (Ddan)
Perfect y Kay (1995)	Distribución de agregados por tamaño	—	-0.44-2.94 (Dm)
Anderson y McBratney (1995)	Distribución de agregados por tamaño	Densidad aparente de agregados medida para cada clase de agregados por su tamaño	2.88-2.953 (Dml) 2.883-2.955 (Dmn)
Logsdon <i>et al.</i> (1996)	Distribución de agregados por tamaño	Densidad aparente de agregados medida para cada clase de agregados por su tamaño	2.03-2.51 (Dan calculado) 2.41-2.44 (Dan contado)

† El tipo de dimensión fractal (D) se indica entre paréntesis y mediante el subíndice: s=superficial, n=con base en la distribución del número de partículas o agregados, m=con base en la distribución de la masa de las partículas o agregados, an=con base en la distribución acumulativa del número de partículas o agregados, dan=con base en la derivada de la distribución acumulativa del número de partículas o agregados, ml=Dm mediante la regresión log-log y mn=mediante un procedimiento no lineal.

ejemplo, sobre todo cuando es disuelto en HF concentrado, pues $D \sim D_{re} \sim 2.1$ (Avnir *et al.*, 1994).

El que $D_{re} < D$ indica que la superficie de los microporos del material tiene poco o ningún efecto sobre la reactividad química del material. Avnir *et al.* (1994) señalaron que la disolución ácida de las piedras calizas se caracterizan por esta particularidad.

$D_{re} > D$ se presenta cuando la reacción ocurre selectivamente en los microporos, tal es el caso de la

disolución de feldspatos (aluminio-silicatos naturales) en ácidos a varios niveles de pH. Casos similares seguramente ocurren sobre materiales con zonas superficiales con alta densidad de sitios de adsorción; pues por consecuencia, el tiempo de residencia de las moléculas cercanas a la superficie se incrementa, así como la probabilidad de reacción. Entonces, es factible incrementar la eficiencia de dichas reacciones (Avnir *et al.*, 1994): 1) aumentando el tamaño de las partículas

si $D_{re} > D$ y $[(D_{re}-3)/(D-3)] < 1$, y 2) reduciendo el tamaño de las partículas si $D_{re} < D$ y $[(D_{re}-3)/(D-3)] > 1$.

Crawford *et al.* (1993) demostraron una relación explícita entre la trayectoria de las partículas gaseosas y la geometría del espacio poroso del suelo a través del cual los gases se difunden, al tomar en consideración que la distribución de las partículas y de los poros por su magnitud pueden ser caracterizadas por la D y sustituyendo el coeficiente de difusión constante por un término que incluye a los valores de D en la ecuación de difusión. Sokolowska (1989) caracterizó geométricamente la irregularidad de la superficie de los poros en el suelo: Los valores de D (2.25-2.4) fueron obtenidos mediante las isotermas de adsorción de vapor de agua y desorción de nitrógeno en el suelo y se concluyó que la dimensión fractal para ambos casos es prácticamente similar.

Indudablemente, el uso de la geometría fractal en la ciencia del suelo para caracterizar las partículas, los agregados y la porosidad ha conllevado a mucha confusión, particularmente sobre el cómo debe ser estimada la correspondiente dimensión fractal y qué representa su valor. En el Cuadro 1 se aprecian valores estimados de $D > 3$, lo cual puede atribuirse, en algunos casos, a que se consideró el supuesto de invariabilidad de la forma (esférica o cúbica) y de la densidad aparente de las partículas o agregados conforme cambia su tamaño. En algunos otros casos [sobre todo los de Wu *et al.* (1993) y Perfect *et al.* (1993), quienes sí consideraron la variabilidad de la densidad con respecto al tamaño de las partículas y los agregados, respectivamente], las distribuciones con valores de $D > 3$ deberán ser consideradas distribuciones fractales porque debe aceptarse el punto de vista físico de la fragmentación de las partículas y los agregados del suelo y la multifractalidad en vez del punto de vista meramente matemático, pues de hecho el suelo es una matriz completamente fragmentada (Anderson y McBratney, 1995).

Precisamente, Eghball *et al.* (1993) cuantificaron la fragmentación de los agregados del suelo, como un indicador de la estructura, por efecto de diferentes métodos de labranza y sistemas de rotación de cultivos, mediante un análisis fractal. Ellos concluyeron que, en varios sistemas de rotación de cultivos, el cultivar maíz induce a la formación de agregados grandes, mientras que el cultivar soya provoca la disminución del tamaño

de los agregados. Al lector interesado en la aplicación de la geometría fractal en la investigación sobre labranza puede serle de gran utilidad la revisión de Perfect y Kay (1995).

Espacio poroso fractal. Katz y Thompson (1985) indicaron que la irregularidad o el incremento de la dimensión fractal que caracteriza la distribución de los poros obedece al aumento de la cementación y del grado de alteración diagenética en suelos arenosos. Por su parte, Tyler y Wheatcraft (1989) consideraron diferentes tipos de suelo por su textura y determinaron que los suelos con valores de dimensión fractal relativamente bajos se componen de partículas grandes con el consiguiente decremento significativo de partículas de tamaño pequeño; ello no es sorprendente porque, precisamente, esa característica se asocia a suelos arenosos; asimismo, indicaron que la dimensión fractal del espacio poroso expresa una medida de la tortuosidad [$D \geq 1.5$ indica un espacio poroso sumamente tortuoso (Tyler y Wheatcraft, 1989)]. En general, la dimensión fractal de la porosidad es dependiente principalmente de la textura (Pachepsky *et al.*, 1995), pues sus valores se incrementan conforme es mayor el contenido de arcilla en los suelos (Rasiah, 1995).

En el Cuadro 2 se aprecian algunas referencias en las que se aplicó la geometría fractal para caracterizar la distribución de los poros.

Al considerar que los agregados, en términos de masa, son fractales, Anderson y McBratney (1995) propusieron que el espacio poroso (\emptyset) está en función de los radios medios (r_i) de las íesimas clases de poros, la dimensión fractal (D), la co-dimensión o dimensión topológica ($d=3$) característica de un cuerpo regular y la densidad de los sólidos del suelo (ρ_s), es decir,

$$\emptyset = 1 - [kr_i^{(D-d)} / \rho_s] \quad (16)$$

Curva característica de retención de agua. Tyler y Wheatcraft (1989) modelaron la capacidad de retención de agua del suelo como cuerpo poroso. La congruencia de los resultados del análisis fractal con el significado físico de dicho proceso edáfico permitió a Tyler y Wheatcraft (1989) concluir que el modelo de Arya y Paris tiene significado físico, particularmente la constante empírica (α); aunque un valor constante de D (equivalente al parámetro α) puede ser inapropiado a tensiones hídricas altas en el suelo porque se subestima el contenido de agua. Este resultado obedece, posiblemente, a la dificultad de

Cuadro 2. Referencias en que se reporta la caracterización de la distribución de los poros del suelo mediante la dimensión fractal.

Referencia	Características	Dimensión fractal de poros (Dp)
Katz y Thompson (1985)	Suelo arenoso	1.57-1.87
Tyler y Wheatcraft (1989)	Suelos de diferente tipo textural. Usando el método de incrementos fractales	0.7-1.485
Bartoli <i>et al.</i> (1991)	Suelos de diferente tipo textural (análisis de imagen)	1.83-2.22 (Dp igual a la D topológica)
Brakensiek <i>et al.</i> (1992)	Suelos de diferente tipo textural (análisis de imagen)	1.01-1.94
Peyton <i>et al.</i> (1994)	Suelo migajón limoso (análisis por tomografía): Usando el perímetro ———— Usando el área —————	0.99-1.89 1.07-2
Pachepsky <i>et al.</i> (1995)	Suelo migajón arcilloso y franco Usando el radio geométrico medio	2.8-2.876
Rasihah (1995)	Suelo migajón arcillo-limoso y migajón limoso. Usando el área	1.47-1.81

conocer la forma de la interface sólido-líquido a escalas muy pequeñas, es decir, la aplicación de la geometría fractal tiene limitaciones en este contexto. Ello indica que una relación no lineal entre magnitudes de poro y de partículas puede ser más apropiada y debe ser incorporada en modelos de retención y conductividad de agua en el suelo.

Otros ejemplos de la aplicación de los conceptos de geometría fractal para modelar con bases físicas la curva de retención de agua en suelos son los de Toledo *et al.* (1990), Rieu y Sposito (1991a,b) y Pachepsky *et al.* (1995). En particular, Pachepsky *et al.* (1995) concluyeron que la conductividad hidráulica a saturación (K_s) de suelos estratificados depende de la porosidad total y la dimensión fractal correspondiente a la zona por debajo de la capa arable; también definieron que el flujo de agua se incrementa conforme la dimensión fractal del espacio macroporoso (poros de 1.5 a 5 mm de diámetro) disminuye en función del aumento del número de macroporos conectados.

Cuantificación de la Heterogeneidad Espacial de Procesos Edáficos

Este aspecto de la ciencia del suelo se ha desarrollado fundamentalmente tomando como base la teoría de las variables regionalizadas o geoestadísticas, específicamente la función variograma. Dicha función se conforma por la varianza de incrementos espaciales o temporales. Entonces, considerando el supuesto de que la varianza γ de los incrementos espaciales h es representada por

$$\gamma(h) \cong h^{4-2D} \quad (17)$$

La habilidad para diferenciar (*i.e.* calcular la pendiente de la curva de un punto a otro) la función variograma o semivariograma depende en gran

parte de su linearización mediante la transformación logarítmica de las abscisas y las ordenadas (Valdez-Cepeda, 1997); posteriormente, la pendiente de la nueva línea se estima al considerar

$$\log \gamma(h) / \log h = 4 - 2D \quad (18)$$

Entonces la regresión entre \log varianza *versus* \log intervalo de separación [$\log \gamma(h)$ *versus* $\log h$] produce un estimador de la dimensión fractal D :

$$D = 2 - [1/2 \{ \log \gamma(h) / \log h \}] \quad (19)$$

Lo anterior significa que la función variograma es considerada como una función fractal estocástica del tipo Weirstrass-Mandelbrot (Valdez-Cepeda y Olivares-Sáenz, 1998), y que es posible entonces estimar el valor de la dimensión fractal para todo proceso que haya sido sometido a un análisis geoestadístico. Además, es conveniente usar la dimensión fractal como índice o parámetro de comparación entre dos o más variables (Eghball *et al.*, 1995; Valdez-Cepeda, 1997) edáficas pues su valor depende del nivel de variabilidad y es independiente de la escala y de la magnitud y/o rango de medición de las variables.

Algunas experiencias. Burrough (1981, 1983) aplicó el concepto de dimensión fractal como indicador de la autocorrelación de algunos fenómenos naturales considerando varios rangos de escala. Sus resultados sugieren que las cantidades de sodio y piedra ($D=1.7$ a 1.9 y $D=1.1$ a 1.8 , respectivamente) son muy irregulares a distancias de separación pequeñas (<15.2 m) entre sitios de muestreo de suelo superficial, pues sus variogramas son descritos por funciones no diferenciables. Resultados similares reportó para la resistencia eléctrica del suelo superficial ($D=1.4$ a 1.6), la cantidad de oro en el suelo ($D=1.9$), los niveles freáticos ($D=1.3$ a 1.8) y la cantidad de arena en el

suelo ($D=1.6$ a 1.8). También, Burrough (1981) reportó una $D=2$ para el pH del suelo; ello significa que su distribución es totalmente irregular en el espacio y que su variograma es descrito por una función no diferenciable que ocupa o llena un plano, como el fractal determinístico conocido como "Curva de Peano".

Armstrong (1986) sugirió que la micro-topografía del suelo es un proceso fractal falso (pseudofractal) ya que al considerar escalas cada vez más pequeñas se incrementa el grado de detalle, es decir, la pendiente del variograma se incrementa y el valor de la dimensión fractal disminuye. En otras palabras, la micro-topografía del suelo es un proceso cuya forma varía cuando se cambia la escala, de manera que quizá sea necesario retomar el concepto de multifractalidad que han señalado algunos investigadores como Stanley y Meakin (1988) y Wu *et al.* (1993).

Eghball *et al.* (1995) concluyeron que tanto la aplicación de estiércol, y de diferentes cantidades de fertilizante nitrogenado, así como el no aplicar esos insumos al suelo durante un plazo largo (41 años) son acciones que no regularizan o estabilizan la variabilidad anual de los rendimientos medios en maíz, pues las dimensiones fractales obtenidas mediante las funciones variograma de los rendimientos son >1.9 . Ello significa también que la variabilidad de los rendimientos medios anuales en maíz son muy influenciados por las condiciones ambientales que varían significativamente año tras año.

Las variables conductividad eléctrica (CE) (Valdez-Cepeda, 1997), y las concentraciones de calcio (Ca) y de magnesio (Mg) en el suelo superficial (Valdez-Cepeda, 1997; Valdez-Cepeda *et al.*, 1997), como factores dominantes, de acuerdo con un análisis por componentes principales, en el espacio que ocupa una parcela comercial de maíz como monocultivo por más de 15 años, así como el rendimiento en grano se comportan irregularmente ($D>1.5$) tanto isotrópica como anisotrópicamente, de manera que las predicciones de esas variables mediante algún modelo estocástico y el interpolador kriging son imprecisas.

PERSPECTIVAS

Algunos investigadores se han enfrentado al problema de que sus resultados sugieren incongruencias con respecto a las expectativas al aplicar la geometría fractal, *i. e.* los valores de

dimensión fractal son mayores que los límites euclidianos (punto, $D=0$; línea, $D=1$; plano, $D=2$; y volumen, $D=3$). Este tipo de problemas surgen precisamente al hacer uso de alguna variante de la Ecuación $M(r) \propto Cr^D$ y/o un procedimiento de ajuste erróneos (Perfect y Kay, 1995), y de un patrón generador contrario a la naturaleza del objeto fractal final; por ejemplo, la curva de retención de humedad no es la misma si corresponde a un proceso de humedecimiento que a uno de secado, así como tampoco es lo mismo fragmentar un terrón o agregado que fomentar su conformación. Entonces es recomendable tomar precauciones con respecto a esos rubros y fundamentar los resultados con el significado mismo del proceso edáfico en estudio, pero debe tomarse en cuenta que el carácter multifractal del suelo como matriz fragmentada puede arrojar valores de $D>3$ para algunas distribuciones de partículas y agregados en escalas específicas (Anderson y McBratney, 1995). Quizá sea necesario uniformizar la naturaleza del patrón generador cuando se trate del mismo fenómeno edáfico, es decir, que ese patrón sea un proceso de incremento o de fragmentación únicamente, o bien explicar la naturaleza del fenómeno y/o el porqué de las diferencias si se usan ambos procedimientos.

Dado que en algunos suelos agrícolas tanto la distribución de las partículas y los agregados, como la geometría del espacio poroso y la propia morfología de la superficie del material reactivo pueden ser descritos mediante la geometría fractal, es conveniente su caracterización con la finalidad de hacer un uso racional y eficiente de los recursos necesarios en la producción de cosechas. De singular importancia sería, por ejemplo, caracterizar la superficie efectiva de un determinado suelo agrícola con respecto a la adsorción de nitrógeno y otros elementos fertilizante de uso generalizado para no correr los riesgos de sobre-fertilizar y la consiguiente contaminación del ambiente.

Han sido notables los esfuerzos para desarrollar modelos teóricos considerando parámetros fractales, sin embargo, son raros los esfuerzos realizados para probarlos con datos de suelos específicos, de manera que esta tarea es una oportunidad interesante.

Por lo general se reconoce que muchas de las distribuciones de variables que frecuentemente se manejan como factores limitativos de la producción son descritas adecuadamente por valores de dimensión fractal que indican un alto nivel de irregularidad en el

espacio y en el tiempo; de manera que puede ser imprescindible seguir caracterizando, mediante la aplicación de los conceptos de la geometría fractal, su comportamiento apoyándose con las geoestadísticas y con algunas otras herramientas como los análisis uni y multiespectrales. Al conjuntar los resultados de Valdez-Cepeda (1997) y los de Eghball *et al.* (1995), es sugestiva la idea de que el manejo de los suelos agrícolas a largo plazo induce a un comportamiento, temporal y espacial, de algunas variables edáficas sumamente errático, y también ha sido demostrado que el del rendimiento (Burrough, 1981; Eghball *et al.*, 1995; Valdez-Cepeda, 1997) en maíz (Eghball *et al.*, 1995; Valdez-Cepeda, 1997) lo es en términos de proceso fractal. Esta idea, y el que los incrementos en la eficiencia de uso de fertilizantes debido a la aplicación variable espacialmente dependen, en gran parte, de la respuesta (de acuerdo con el principio de los rendimientos decrecientes) de las plantas cultivadas a las cantidades de fertilizante aplicado (Tanaka, 1990; Cassman y Plant, 1992) y a la varianza, sesgo (y posiblemente a la curtosis) de la variabilidad espacial de los niveles de los nutrimentos nativos en el suelo (Cassman y Plant, 1992), resultan de particular interés para la denominada "Agricultura de Precisión" o "Agricultura por Sitios Específicos" que está cobrando auge (McCauley y Whittaker, 1993; Chancellor y Goronea, 1994; Borgelt *et al.*, 1994; Auernhammer *et al.*, 1994; y Schueller y Wang, 1994). Por ejemplo, Chancellor y Goronea (1994) demostraron que las aplicaciones, a niveles bajos e intermedios, de insumos (agua, fertilizante nitrogenado y herbicida) modeladas espacialmente en la producción de trigo incrementan la eficiencia de uso de los propios insumos, permiten el ahorro de energía total en el proceso productivo e implican reducciones importantes del potencial contaminante del ambiente por efecto de los productos agroquímicos.

AGRADECIMIENTOS

R. D. Valdez-Cepeda agradece el financiamiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología mediante el contrato No. I 26976-N.

LITERATURA CITADA

Anderson, A.N. A.B. McBratney. 1995. Soil aggregates as mass fractals. *Aust. J. Soil Res.* 33: 757-772.

- Armstrong, A.C. 1986. On the fractal dimension of some transient soil properties. *J. Soil Sci.* 37: 641-652.
- Avnir, D., D. Farin y P. Pfeifer. 1984. Molecular fractal surfaces. *Nature* 308: 261-263.
- Avnir, D., D. Farin y P. Pfeifer. 1985. Surface geometric irregularity of particulate materials: The fractal approach. *J. Coll. and Interface Sci.* 103: 112-123.
- Avnir, D., R. Gutfraind y D. Farin. 1994. Fractal analysis in heterogeneous chemistry. pp. 229-255. *In: Bunde, A. y S. Havlin (Eds.). Fractals in Science.* Springer-Verlag. Berlin.
- Auernhammer, H., M. Demmel, T. Muhr, J. Rottmeier y K. Wild. 1994. GPS for yield mapping combines. *Computers and Electronics in Agriculture* 11: 53-68.
- Barak, B., C.A. Seybold y K. McSweeney. 1996. Self similitude and fractal dimension of sand grains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 72-76.
- Barnsley, M.F. 1993. *Fractals everywhere.* Academic Press Inc. 2nd Edition. Cambridge, MA, USA.
- Bartoli, F., R. Philippon, M. Doirisse, S. Niquet y M. Dubuit. 1991. Structure and self-similarity in silty and sandy soils: The fractal approach. *J. Soil Sci.* 42: 167-185.
- Borgelt, S.C., S.W. Searcy, B.A. Stout y D.J. Mulla. 1994. Spatially variable liming rates: A method for determination. *Trans. ASAE* 37: 1499-1507.
- Brakensiek, D.L., W.J. Rawls, S.D. Logsdon y W.M. Edwards. 1992. Fractal description of macroporosity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1721-1723.
- Bunde, A. y S. Havlin. 1994. A brief introduction to fractal geometry. pp. 1-25. *In: Bunde, A. y S. Havlin (eds). Fractals in science.* Springer Verlag. Berlin-Heidelberg. Germany.
- Burrough, P.A. 1981. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. *Nature* 294: 240-242.
- Burrough, P.A. 1983. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *J. Soil Sci.* 34: 577-597.
- Cassman, K.G. y R.E. Plant. 1992. A model to predict crop response to applied fertilizer nutrients in heterogeneous fields. *Fertilizer Res.* 31(13): 151-163.
- Chancellor, W.J. y M.A. Goronea. 1994. Effects of spatial variability of nitrogen, moisture, and weeds on the advantages of site-specific applications for wheat. *Trans. ASAE* 37: 712-724.
- Crawford, J.W., K. Ritz y Y.M. Young. 1993. Quantification of fungal morphology, gaseous transport and microbial dynamics in soil: An integrated framework utilising fractal geometry. *Geoderma* 56: 157-172.
- Eghball, B., G.D. Binford, J.F. Power, D.D. Baltensperger y F. N. Anderson. 1995. Maize temporal yield variability under long-term manure and fertilizer application: Fractal analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1360-1364.
- Eghball, B., L.N. Mielke, G.A. Calvo y W.W. Wilhelm. 1993. Fractal description of soil fragmentation for various tillage methods and crop sequences. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1337-1341.
- Katz, A.J. y A.H. Thompson. 1985. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation. *Phys. Rev. Lett.* 54: 1325-1328.

- Logsdon, S.D., D. Gimenez y R.R. Allmaras. 1996. Fractal characterization of aggregate-size distribution: the question of scale invariance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1327-1330.
- Mandelbrot, B.B. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science* 156: 636-638.
- Mandelbrot, B. B. 1977. *Fractals: Form, chance and dimension*. W. H. Freeman & Co. London, England.
- Mandelbrot, B. B. 1982. *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman & Co. San Francisco, CA, USA. 468 p.
- Mandelbrot, B. B. 1993. *Los objetos fractales*. 3a. edición. Tusquets Editores, S. A. Barcelona, España. 213 p.
- McCauley, J. D. and A. D. Whittaker. 1993. Index for describing spatial variability in prescription farming. *Trans. ASAE* 36: 691-693.
- Orbach, R. 1986. Dynamics of fractal networks. *Science* 231: 814-819.
- Pachepsky, Ya. A., R. A. Shchervakov and L. P. Korsunskaya. 1995. Scaling of soil water retention using a fractal model. *Soil Sci.* 159(2): 99-104.
- Perfect, E. and B. D. Kay. 1991. Fractal theory applied to soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1552-1558.
- Perfect, E. and B. D. Kay. 1995. Applications of fractals in soil and tillage research: A review. *Soil & Tillage Research* 36: 1-20.
- Perfect, E., B. D. Kay and V. Rasiyah. 1993. Multifractal model for soil aggregate fragmentation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 896-900.
- Perfect, E., B. D. Kay and V. Rasiyah. 1994. Unbiased estimation of the fractal dimension of soil aggregate size distributions. *Soil & Tillage Research* 31: 187-198.
- Perfect, E., V. Rasiyah and B. D. Kay. 1992. Fractal dimensions of soil aggregate-size distributions calculated by number and mass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1407-1409.
- Peterson, I. 1984. Ants in labyrinths and other fractal excursions. *Science News* (January 21th): 42-43.
- Peyton, R. L., C. J. Gantzer, S. H. Anderson, B. Haefner and P. Pfeifer. 1994. Fractal dimension to describe soil macropore structure using ray computed tomography. *Water Resources Res.* 30: 691-700.
- Rasiyah, V. 1995. Fractal dimension of surface-connected macropore count-size distributions. *Soil Sci.* 159(2): 105-108.
- Rasiyah, V., B. D. Kay and E. Perfect. 1993. New mass-based model for estimating fractal dimensions of soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 891-895.
- Rieu, M. and G. Sposito. 1991a. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1231-1238.
- Rieu, M. and G. Sposito. 1991b. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: II. Applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1239-1244.
- Sander, L. M. 1986. Fractal growth processes. *Nature* 322: 789-793.
- Schueller, J. K. and Ming-Wen Wang. 1994. Spatially-variable fertilizer and pesticide application with GPS and DGPS. *Computers and Electronics in Agriculture* 11: 69-83.
- Sokolowska, Z. 1989. On the role of energetic and geometric heterogeneity in sorption of water vapour by soils: Application of a fractal approach. *Geoderma* 45: 251-265.
- Stanley, H. E. and P. Meakin. 1988. Multifractal phenomena in physics and chemistry. *Nature* 335: 405-409.
- Tanaka, D. L. 1990. Topsoil removal influences on spring wheat water-use efficiency and nutrient concentration and content. *Transactions of the ASAE* 33(5): 1518-1524.
- Toledo, P. G., R. A. Novy, H. T. Davis and L. E. Scriven. 1990. Hydraulic conductivity of porous media at low water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 673-679.
- Tyler, S. W. and S. W. Wheatcraft. 1989. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 987-996.
- Tyler, S. W. and S. W. Wheatcraft. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 362-369.
- Turcotte, D. L. 1986. Fractals and fragmentation. *J. Geophys. Res.* 91(B2): 1921-1926.
- Valdez-Cepeda, R. D. 1997. Análisis estocástico espacial de procesos edáficos y de plantas en *Zea mays* L. Tesis de Doctor en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León-Facultad de Agronomía. Marín, N. L., México. 91 p.
- Valdez-Cepeda, R. D. and E. Olivares-Sáenz. 1998. Fractal analysis of the Mexico's annual mean yields of maize, bean, wheat and rice. *Field Crops Research* (in press).
- Valdez-Cepeda, R. D., E. Olivares-Sáenz, F. Zavala-García, M. Luna-Flores, R. E. Vázquez-Alvarado y J. F. Pissani-Zuñiga. 1997. Análisis fractal de los factores nutricionales dominantes en la producción de maíz en el Norte de Tamaulipas, México. *Memorias del XXVIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Villahermosa, Tabasco, México. p. 87.
- Wu, Q., M. Borkovec and H. Sticher. 1993. On particle-size distributions in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 883-890.
- Young, I. M. and J. W. Crawford. 1991. The fractal structure of soil aggregates: Its measurement and interpretation. *J. Soil Sci.* 42: 187-192.

MICROORGANISMOS Y BIODIVERSIDAD

Microorganisms and Biodiversity

V. Olalde Portugal¹ y L.I. Aguilera Gómez

RESUMEN

El componente microbiano del suelo es importante para la salud de los ecosistemas. Los procesos agrícolas, así como el manejo de los recursos vegetales inciden sobre este componente afectando tanto su biodiversidad como la densidad de las poblaciones microbianas implicadas; los resultados a mediano y largo plazo pueden ser la pérdida de fertilidad de los suelos y su progresiva pauperización. La sostenibilidad de un agroecosistema yace también en su menor dependencia de fertilizantes y pesticidas químicos. El empleo de cepas de microorganismos con un alto potencial de acción sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas y el estudio de la diversidad biológica de sus patógenos son factores clave en su control y, por tanto, en el manejo integral de cultivos.

Palabras clave: Microbiología del suelo, ecología microbiana, sostenibilidad.

SUMMARY

The soil microbial component is important to the ecosystems health. Agricultural procedures and the management of vegetal resources affect biodiversity and density of involved microbial populations. Results in the medium and large terms may be losses in soil fertility and progressive erosion. Sustainability of agroecosystems lies also on a reduced chemical fertilization and pesticide dependence. The use of microbial strains with high action potential on growth and development of plants, and the study of biological diversity of their pathogens are key factors on integral management of crops.

Index words: Soil microbiology, microbial ecology, sustainability.

¹Departamento de Biotecnología y Bioquímica, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados IPN, Unidad Irapuato. Km. 9.6 Libramiento Norte, Carr. Irapuato-León. Apdo. Postal 629, 36500 Irapuato, Gto., México.

Aceptado: Septiembre de 1998.

INTRODUCCION

Como es bien sabido, los microorganismos son los seres más numerosos que existen en la tierra; son organismos ancestrales que han colonizado exitosamente cada nicho ecológico posible. Los microorganismos se encuentran prácticamente en todas las regiones del planeta, desde los polos, en ambientes bajo el punto de congelación y muy secos, hasta los trópicos con temperaturas altas y con elevada precipitación pluvial. Su presencia y actividad es esencial para la salud y funcionamiento adecuado de todos los ecosistemas (Olembó, 1991). Existen microorganismos que degradan la materia orgánica haciéndola nuevamente disponible para las plantas, actividad sin la cual el mundo sería un enorme basurero; otros han jugado un papel significativo en relación con el hombre y su productividad, participando en la agricultura y en la elaboración de alimentos y medicinas (Tate III, 1995). Algunos, como las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) son indispensables en la industria vinícola (a través de la fermentación alcohólica). Tanto bacterias como hongos intervienen en la elaboración de quesos y derivados lácteos. Ciertos hongos del suelo forman parte de un amplio abanico de productores de antibióticos; otros, como las bacterias y algas verde-azules, son organismos fijadores del nitrógeno atmosférico, lo cual los hace útiles al planear una adecuada rotación de cultivos (Brock, 1978).

La capacidad de los microorganismos para desarrollar tal variedad de funciones se debe a su gran versatilidad bioquímica, basada en la posibilidad de llevar a cabo una enorme cantidad de tipos de reacciones: oxidaciones, reducciones y precipitaciones, sobre los elementos componentes de lo que llamamos vida, y que de manera directa o indirecta gobiernan todos los procesos en la tierra (Atlas, 1984).

Biodiversidad

Desde el punto de vista genético se debe tener en mente que cada secuencia de ADN es única e irremplazable, con lo cual la desaparición de cualquier especie biológica implica la pérdida irreversible de un

conjunto único de información. Esto es aplicable a todo organismo vivo y, por tanto, también a los microorganismos. El anterior ensamblaje de genética y funcionalidad lleva a hablar de biodiversidad. Pero, ¿qué contempla dicho término?; biodiversidad, es la variedad y variabilidad de todas las formas de vida, el complejo ecológico en el cual están presentes y los procesos de los que forman parte (Atlas, 1984; Olembo, 1991). En este sentido, y en relación con los microorganismos, el suelo es un ecosistema de enorme riqueza microbiana y la misma definición de suelo quedaría incompleta si en ella no se considerara la actividad de este componente, entre cuya diversidad, la microflora está bien representada. Las bacterias son los organismos más numerosos en el suelo (entre 10^6 y 10^7 bacterias g^{-1} de suelo), mientras que los hongos dado su mayor tamaño aunque menor abundancia tienen la biomasa más significativa (Alexander, 1980; Tate III, 1995).

Los estudios sobre los microorganismos del suelo son numerosos, sin embargo, a la fecha no existe ningún ejemplo en el que se haya determinado completamente la biodiversidad de un suelo y aún más, tampoco se sabe cuál es la biodiversidad necesaria en cuanto a microorganismos para que un suelo agrícola funcione de manera óptima (Stewart, 1991).

En realidad, en el conocimiento actual se ha identificado el significado funcional de grupos particulares que afectan la productividad de las plantas en un contexto agrícola; así se han definido algunas de las actividades en las que participan los microorganismos del suelo: fijación de nitrógeno, degradación de celulosa, incorporación de fósforo a la planta, interacción con otros microorganismos y control biológico. El aprovechamiento de todas estas actividades microbianas de manera directa interviene en hacer realidad lo que se ha llamado agricultura sostenible, que consiste en mantener la producción sin deterioro del ambiente (Stewart, 1991; Bethlenfalvay, 1993).

Gran parte de la significancia de los microorganismos se expresa al mantener un balance adecuado entre el suelo, la planta y la microbiota nativa. El punto en donde se llevan a cabo las interacciones más importantes, es la rizósfera, la zona de influencia de la raíz. De modo que en una manera general se puede decir que la sostenibilidad depende

de mantener buenas condiciones físicas, químicas y biológicas en el suelo (Stewart, 1991).

Sostenibilidad

Como de alguna manera en esta revisión se ha tratado de relacionar la diversidad microbiana con la agricultura sostenible, un ejemplo que puede dar una idea más real de esta relación es la descripción del trabajo que se está realizando en un Bosque Espinoso dominado por *Prosopis laevigata* (mezquite) en el norte del estado de Guanajuato, demostrando que puede tratarse de un sistema sustentable (Frias *et al.*, 1993). El Cuadro 1 muestra los resultados que el laboratorio de Bioquímica Ecológica del CINVESTAV Unidad Irapuato ha encontrado en cuanto a la productividad de este ecosistema. Junto al predio con mezquite utilizado en este estudio, existe una parcela que fue desmontada y abierta al cultivo hace 14 años y comparando la producción, los beneficios económicos de una hectárea en tales condiciones son mucho menores que en el ecosistema natural bajo un manejo racional de los recursos.

El mezquite es un árbol de la familia *Leguminosae* de 10 a 15 m de alto, que crea bajo su copa condiciones muy favorables para el desarrollo de otras plantas herbáceas cuya cobertura forma islas de fertilidad (Aguilar, 1998). La cobertura vegetal bajo y fuera de la protección de la copa de este árbol difiere, encontrándose las mayores densidades dentro del área de influencia de la copa. Las diferencias que suelen observarse en la vegetación se reflejan también en cambios microbiológicos, puesto que el número de bacterias ($60 \times 10^6 \pm 15 \times 10^6$ bacterias g^{-1} de suelo) y de hongos ($17 \times 10^4 \pm 5 \times 10^4$ propágulos g^{-1} de suelo)

Cuadro 1. Productividad de un bosque espinoso con mezquite, en un predio de 30 ha, ubicado aprox. a 30 km de Dolores Hidalgo, sobre la carretera Dolores-San Luis de la Paz, en el norte del estado de Guanajuato.

Productividad/hectárea	Cantidad kg
Leña	15 000 ± 1800
Vaina	800 ± 96
Herbáceas	2600 ± 312
Nopal (<i>Opuntia</i> spp.)	2000 ± 240
Cholla (<i>Opuntia imbricata</i>)	940 ± 112
Paixtle (<i>Tillandsia recurvata</i>)	4000 ± 480
Miel de abejas	35 ± 4
Polen	1 ± 0.14

presentes en los suelos bajo el dosel del árbol fue mayor que en los campos que fueron abiertos a la agricultura ($20 \times 10^6 \pm 5 \times 10^6$ bacterias g^{-1} de suelo y $46 \times 10^3 \pm 10 \times 10^3$ propágulos g^{-1} de suelo, respectivamente) (Aguilar, 1998). Dichos resultados hablan claramente de una posible pérdida de biodiversidad microbiana que puede resultar importante en el mantenimiento del ecosistema.

Si estos datos parecen alarmantes, cuando se analizaron los datos sobre la presencia de microorganismos simbióticos, se observó que el número de esporas de hongos micorrízicos arbusculares existentes en el suelo bajo la copa del mezquite (2100 ± 120 esporas/100 g de suelo) fue mayor que en las zonas aledañas del bosque fuera del área del dosel (1600 ± 85 esporas/100 g de suelo) y se redujo significativamente en el campo abierto a cultivo (930 ± 45 esporas/100 g de suelo) (Aguilar, 1998). Aún más, mientras que en el bosque ya sea bajo la copa o fuera de ella, la diversidad de especies se mantiene con diferencias en número de propágulos, en la parcela abierta a la agricultura se encuentran menos especies indicando una clara pérdida de biodiversidad.

El mezquite también se asocia simbióticamente con *Rhizobium*, una bacteria fijadora de nitrógeno. Entre las bacterias de este género existen cepas que pueden mostrar una serie de efectos distintos sobre las plantas; algunas afectan positivamente su desarrollo de la misma manera que si se hubiese adicionado fertilizante nitrogenado, mientras que otras sólo estimulan con resultados similares a los testigos. Por tanto es muy importante conocer la diversidad bacteriana no solo intragenérica sino también intraespecíficamente (Smit y Swart, 1994).

El conocimiento de la diversidad microbiana puede ayudar a definir sistemas de reforestación o rehabilitación de zonas perturbadas puesto que como se ha dicho, los microorganismos ayudan directamente al desarrollo de las plantas por su aporte nutricional o bien mejorando las características del suelo mediante una mejor agregación de partículas, incrementando la retención de suelo, la porosidad, la retención de agua y el control de la erosión (Tate III, 1995).

Hablar de agricultura sustentable no solo implica hablar de agroforestería sino también de agricultura intensiva, en donde los microorganismos pueden disminuir el consumo de fertilizante nitrogenado u optimizar su aprovechamiento. Un ejemplo adecuado

puede ser el experimento realizado en el mismo laboratorio, en el que se inocularon diferentes cepas de *Azospirillum* a trigo en campo, ésta es una bacteria de vida libre que fija nitrógeno asociada a las raíces de gramíneas. Algunas de las cepas probadas hicieron que las plantas igualaran el crecimiento del testigo con fertilizante, mientras que otras incrementaron el aprovechamiento de nutrimentos en plantas tratadas conjuntamente con *Azospirillum* y el fertilizante nitrogenado. Una posible explicación de este fenómeno es la producción bacteriana de fitohormonas (Monter, 1993).

Por otra parte, los microorganismos pueden ser utilizados en el control de fitopatógenos y, por lo tanto, reducir el uso de pesticidas. Para lograr este tipo de control es necesario aislar del suelo microorganismos antagónicos y enfrentarlos al agente etiológico de la enfermedad. (En ocasiones de cada 1000 aislamientos sólo 1 % inhibe el desarrollo del patógeno *in vitro*). Los mecanismos que utilizan estos organismos para antagonizar a los fitopatógenos pueden ser la producción de antibióticos, competencia por nutrimentos, competencia por sitios de infección, parasitismo y producción de sustancias tóxicas. Por lo general un microorganismo de este tipo presenta un solo tipo de mecanismo o a lo sumo dos de ellos (Krupa y Dommergues, 1979).

Sin embargo, los fitopatógenos, entre los cuales destacan los hongos, presentan una enorme diversidad y diferentes comportamientos ecológicos aún tratándose de la misma especie (Garret, 1981). La costra negra de la papa, por ejemplo, es una enfermedad del tubérculo que si se utiliza para sembrar produce grandes pérdidas porque ataca los brotes y los seca. En el Bajío, el agente etiológico, *Rhizoctonia solani*, presenta dos tipos de infección producidos por dos grupos de anastomosis (Ag4 y Ag3) (Virgen *et al.*, 1996). Un grupo de anastomosis es aquel dentro del cual las hifas de dos aislados diferentes del hongo pueden fusionarse si se les hace crecer en una misma caja petri con medio nutritivo. Existen 11 grupos identificados a nivel mundial en la misma especie del hongo. A simple vista, las costras de la papa parecen iguales ya se trate de uno u otro grupo, pero cada uno mantiene una sensibilidad diferencial a los fungicidas y presenta un comportamiento diferente en su distribución espacial y temporal, lo que ha sido estudiado con éxito en el laboratorio de Bioquímica Ecológica de CINVESTAV, por lo que el conocimiento exacto de

este comportamiento permitirá buscar de manera más efectiva las bacterias antagonicas adecuadas para el biocontrol.

Otro problema que involucra la diversidad de una especie de fitopatógenos está siendo analizado en dicho laboratorio; la incidencia de la pudrición blanca del ajo se debe a la presencia de *Sclerotium cepivorum*, un hongo cuyos esclerocios producidos en número de miles en cada planta pueden permanecer viables en el suelo durante un periodo de tiempo de hasta 20 años. Diferentes aislados de este hongo en un mismo campo de cultivo presentan un patrón diferente de sensibilidad a fungicidas, por lo que el conocimiento de esta diversidad deberá conducir a mejores estrategias de control no solo químico sino también biológico (Pérez *et al.*, 1997).

El estudio de la diversidad microbiana no puede llevarse a cabo sin establecer colecciones de microorganismos que se consideren relevantes en una amplia gama de actividades biológicas y en este sentido falta aún mucho por hacer. Así mismo es necesario correlacionar las actividades de los microorganismos con las plantas con las que se asocian y conservar dichos sistemas biológicos.

Finalmente, los autores desean dejar a la consideración del lector algunas de las recomendaciones que el Comité Internacional sobre Biodiversidad ha sugerido a fin de llevar a cabo eficientemente esta labor de investigación:

1. Estudiar la distribución y diversidad de los microorganismos nativos.
2. Conocer el efecto de la biodiversidad en los sistemas productivos.
3. Utilizar los conocimientos sobre la diversidad biológica en sistemas de producción sustentable.
5. Conservar los microorganismos en colecciones o en hábitats naturales.

LITERATURA CITADA

- Aguilar L., A.L. 1998. Caracterización microbiológica y fisicoquímica de suelos de islas de fertilidad de mezquite en un ecosistema semiárido. Tesis de licenciatura, Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad de Guanajuato. Irapuato, Gto., México
- Alexander, M. 1980. Introducción a la microbiología del suelo. Ed. AGT. México, DF, México.
- Atlas, R.M. 1984. Diversity of microbial communities. In: K.C. Marshall (ed.). Advances in Microbial Ecology 7: 1-47. Plenum Press, New York, USA.
- Bethlenfalvay, G.J. 1993. The mycorrhizal plant-soil system in sustainable agriculture. In: R.Ferrera-Cerrato y R. Quintero Lizaola (eds.). Agroecología, sostenibilidad y educación. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México.
- Brook, T.D. 1978. Biología de los microorganismos. Ed. Omega. Barcelona, España.
- Frias, H.J.T., L.I. Aguilera G. y V. Olalde P. 1993. Productividad de una comunidad dominada por mezquite (*Prosopis laevigata*) bajo el enfoque de agricultura sostenible. Memorias del I simposium internacional y II reunión nacional sobre agricultura sostenible. CEICADAR, Colegio de Postgraduados, Puebla, Pue. (en prensa).
- Garret, S.D. 1981. Soil fungi and soil fertility. Pergamon Press, Oxford, UK.
- Krupa, S.V. e Y.R. Dommergues. 1979. Ecology of root pathogens. Elsevier Scientific Publ. Co., Amsterdam, The Netherlands.
- Monter, P.J. 1993. Respuesta a la inoculación con *Azospirillum* spp. en trigo y sorgo bajo condiciones de campo. Tesis de licenciatura, Escuela de Agronomía y Zootecnia, Universidad de Guanajuato.
- Olembo, R. 1991. Importance of microorganisms and invertebrates as components of biodiversity. pp. 7-15. In: D.L. Hawksworth (ed.). The biodiversity of microorganisms and invertebrates: Its role in sustainable agriculture. Redwood Press, Melksham, UK.
- Pérez L., M., V. Olalde-Portugal, J.R. Sánchez P. y C. Castañeda C. 1997. Sensibilidad *in vitro* de *Sclerotium cepivorum* Berk a fungicidas comúnmente usados para su control. Revista Mexicana de Fitopatología 15: 9-14.
- Smit, G.N. y J.S. Swart. 1994. Influence of leguminous and non-leguminous woody plants on the herbaceous layer and soil under varying competition regimes in mixed bushveld. African J. of Rangeland Forage Sci. 11: 27-33.
- Stewart, W.D.P. 1991. The importance to sustainable agriculture of biodiversity among invertebrates and microorganisms. pp. 3-5. In: D.L.Hawksworth. (ed.). The biodiversity of microorganisms and invertebrates: Its role in sustainable agriculture. Redwood Press, Melksham, UK.
- Tate III, R.L. 1995. Soil microbiology. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Virgen-Calleros, G., V. Olalde-Portugal y R. Rocha. 1996. Anastomosis groups of *Rhizoctonia solani* Khurm in potato from Guanajuato state, Mexico. Fitopatología 31: 48.

Aguilar L., A.L. 1998. Caracterización microbiológica y fisicoquímica de suelos de islas de fertilidad de mezquite en un ecosistema semiárido. Tesis de licenciatura, Instituto de